МОНГОЛ УЛСЫН ШИНЖЛЭХ УХААН ТЕХНОЛОГИЙН ИХ СУРГУУЛЬ

MONGOLIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

“ЭРДМИЙН ЧУУЛГАН 2026”

бакалавр, магистр оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал



№3

УЛААНБААТАР ХОТ

2026 он

ШИНЖЛЭХ УХААН, ТЕХНОЛОГИЙН ИХ СУРГУУЛЬ
ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ИНЖЕНЕРЧЛЭЛИЙН СУРГУУЛЬ
“ТОСОН ЭНЕРЖИ” ХХК, “РАЙД МОНГОЛИА” ХХК

“ЭРДМИЙН ЧУУЛГАН 2026”

бакалавр, магистр, доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал

№3

УЛААНБААТАР ХОТ
2026 ОН

ЭХИС-д суралцаж буй бакалавр, магистр, доктор оюутнуудын эрдэм шинжилгээний хурлыг зохион байгуулахад гүн туслалцаа үзүүлж хамтран ажиллан “Тосон Энержи” ХХК-ийн Тосон ДЦС болон Сэлэнгэ аймагт баригдаж буй ДЦС-ын төслийг хэрэгжүүлэгч “Райд Монголиа” ХХК-ийн хамт олонд нийт оюутнуудынхаа нэрийн өмнөөс гүн талархал илэрхийлж ажлын өндөр амжилт хүсэн ерөөе.

Энэхүү илтгэлүүдийн эмхэтгэлд ШУТИС-ийн ЭХИС-д суралцаж буй нийт бакалавр, магистр, доктор оюутнуудын эрдэм шинжилгээ, судалгааны ажлын явц, зарим үр дүнг илэрхийлсэн илтгэлүүдийг нэгтгэн оруулсан болно.

Хэвлэлд бэлдэж ирүүлсэн материалуудыг нэгтгэхдээ зохиогчийн санааг огт өөрчлөөгүй боловч зарим үг үсэг, зураг схемийн хэмжээг өөрчилсөн ба ямар нэгэн алдаа гарсан бол зохиогчоос нь хүлцэл өчье.

“ЭРДМИЙН ЧУУЛГАН 2026” бакалавр, магистр, доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал. Илтгэлүүдийн эмхэтгэл. УБ: 2026

Бүтээлийн эмхэтгэл хянан магадалсан:

Редакцын зөвлөлийн дарга: ЭХИС-ийн захирал, доктор (Ph.D) Б.Бат-Эрдэнэ

Редакцын зөвлөлийн гишүүд:
Доктор (Ph.D), дэд профессор Д.Үлэмж
Доктор (Ph.D), дэд профессор Х.Сарангэрэл
Доктор (Ph.D), дэд профессор Э.Энхсайхан
Доктор (Ph.D), дэд профессор М.Баттулга
Доктор (Ph.D) П.Бямбацогт
Доктор (Ph.D) М.Ганхүлэг
Доктор (Ph.D) Д.Даваацэрэн
Доктор (Ph.D) Т.Батгэрэл
Доктор (Ph.D) П.Түмэнбаяр
Доктор (Ph.D) О.Чимэд
Доктор (Ph.D) О.Цогбаяр
Доктор (Ph.D) Ж.Нандагсамба
Доктор (Ph.D) М.Цолмон

Эмхэтгэсэн: (11pt)
Хуудасны хэмжээ: 340
Бодит хэвлэлийн хуудас:
Үсгийн гарнитур: Times New Roman

ISBN 978-9919-544-03-4

ГАРЧИГ

1-р хэсэг. Магистр, Доктор оюутнуудын илтгэлүүд

Монгол гэрийн дулааны алдагдал ба түлшний хэрэглээний хамаарлын судалгааны зарим үр дүн 5
Магистрант Х.Ганзолбоо, Доктор (Ph.D) Б.Намхайням, Доктор (Ph.D)Б.Өлзийбадрах

“Баянхонгор-Эрчим хүч” цахилгаан түгээх сүлжээний тасралт, реле хамгаалалтын судалгаа 8
Магистрант А.Лхагвадорж, Магистрант М.Батмөнх, Доктор (Ph.D)М.Баттулга

Хүчний трансформаторын тусгаарлалтын насжилтын урьдчилсан таамаглал ба алсын зайн хяналтын систем 12
Магистрант О.Болд, Доктор (Ph.D)Бя.Бат-Эрдэнэ

3-фазын трансформаторын холболтын бүлгийг ашиглан 35, 10, 0.4 кВ-ын сүлжээн дэх гүйдлийн гармоникийг бууруулах судалгаа 17
Магистрант Д.Дорждэрэм, Магистрант Э.Дашдондов, Магистрант Х.Мөнхсайхан,
Доктор (Ph.D) Ж.Ням

Түгээх сүлжээнд холбогдох боломжтой нарны цахилгаан үүсгүүрүүдийн хүчдэл ба чадлын нөлөөллийн судалгаа 22
Магистрант Д.Авирмэд, Магистрант Л.Түмэнжаргал, Доктор (Ph.D)М.Баттулга

Сүлжээнд холбогдсон нарны цахилгаан үүсгүүрийн системд санамсаргүй аралжилтыг илрүүлэх, хамгаалах аргачлалын судалгаа 26
Магистрант Л.Түмэнжаргал, Магистрант Д.Авирмэд, Доктор (Ph.D) М.Баттулга

Цэций салхин цахилгаан станцын салхин турбин генераторын онцлог ба найдвартай ажиллагааны судалгаа 31
Магистрант, Р.Очирбат Доктор (Ph.D) Б.Батзаяа, Доктор (Ph.D)Ш.Гантөмөр

Нүүрсний илчлэгт нөлөөлөх хүчин зүйлс, түүнийг тодорхойлох арга зүйн судалгаа 36
Магистрант Н.Наранжаргал, Доктор (Ph.D)А.Түмэнбаяр

Новотел зочид буудлын барилгын дулаан алдалтыг бууруулах замаар дулааны эрчим хүчний хэмнэлт хийх боломжийн судалгаа 40
Магистрант Н.Энхманлай, Доктор (Ph.D) П.Бямбацогт, Доктор (Ph.D) Б.Өлзийбадрах

Уурын зуухны хаягдал дулааныг ашиглах боломжийн судалгаа 46
Магистрант А.Алтанпүрэв, Доктор (Ph.D) М.Оюун-Эрдэнэ

Шинь Шинь уурхайн дулааны станцын SHX7-1.1/115/70-H маркийн зуухны туршилтын үр дүн 51
Доктор (Ph.D) Д.Балдандорж, Магистрант Ж.Мөнхдалай

Цагдаагийн байгууллагын барилгын эрчим хүчний хэрэглээний хэв маяг ба хэмнэлтийн стратеги 56
Магистрант Х.Өсөхбаяр, Доктор (Ph.D) Э.Мөнхтуяа

Түлшний шаталт дэмжин утааны хийн бохирдлыг бууруулах “Гормикс” бүтээгдэхүүнийг бага чадлын ус халаах зууханд туршсан дүн 61
Магистрант С.Дугарсүрэн, Доктор (Ph.D) А.Түмэнбаяр

Цахилгаан шугам сүлжээний горим ажиллагааг бага чадлын цахилгаан станцаар сайжруулах судалгаа 65
Магистрант Б.Нар-Адъяа, Магистрант С.Энхболд, Г.Мөнхболор, Доктор (Ph.D) Ш.Гантөмөр

Дулааны төв магистраль шугамын таслах хаалтыг шинэчлэн алсын зайн хяналт удирдлагын системд холбосон нь 72
Магистрант Г.Уянга, Доктор (Ph.D) О.Чимэд

Станцын хаягдал дулааныг абсорбцон хөргөх системд ашиглах судалгаа (Амгалан ДС-ын жишээн дээр) 75
Магистрант М.Мөнхзул, Магистрант Д.Рэнцэндорж, Магистрант Г.Төрмөнх, Доктор (Ph.D) М.Оюун-Эрдэнэ

Гүний уурхайн агааржуулалтын хаягдал дулааныг кондиционерын системд сэргээн ашиглах судалгаа 81
Магистрант М.Мөнхзул, Доктор (Ph.D) М.Оюун-Эрдэнэ

Байгальд ээлтэй эрчим хүчний эх үүсгүүр сонгох судалгаа 85
Магистрант Д.Гэрэлсүрэн, Доктор (Ph.D) Б.Өлзийбадрах

Чойбалсан хотын дулааны хангамжийн системийн найдваржилтын тооцоо 88
Магистрант П.Мөнхдэлгэр, Доктор (Ph.D) П.Бямбацогт

Өндөр даралтын тогоот зуухны багасгасан фосфатын усны химийн горимын үр ашгийн шинжилгээ 94
Магистрант Ж.Жаргалмаа, Доктор (Ph.D) Б.Оюунсувд

“Эрдэнэт ДЦС” ТӨХК-ийн БКЗ-75-39 ФБ зуухны тоос бэлтгэлийн системийн ШБМ-287/410 маркийн үрлэн тээрмийн горимын судалгаа 99
Магистрант Г.Үүрийнтуяа, Доктор (Ph.D) Д.Балдандорж

Дарханы дулаан дамжуулах магистрал 800мм-ийн диаметртэй ил шугамын дулааны алдагдлыг бууруулах 104
Магистрант Ц.Болор-Эрдэнэ, Доктор (Ph.D) П.Бямбацогт, Доктор (Ph.D) Б.Өлзийбадрах

Монгол орны хүйтэн сэрүүн уур амьсгалд CIGS болон цахиурын төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүрийн туршилтын гүйцэтгэлийн харьцуулалт 107
Магистрант Д.Батдорж, Доктор (Ph.D) Э.Мөнхтуяа, Доктор (Ph.D)М.Ганхүлэг

K-MEANS++ бүлэглэл ба eelm алгоритмд суурилсан нарны цахилгаан станцын гаралтын чадлын урьдчилсан таамаглалын арга 112
Доктор (Ph.D) П.Эрхэмтөр, Магистрант М.Ванчин, Магистрант Б.Булганмаа

Эрчим хүчний системийн төлөв байдлын үнэлгээ, шинжилгээ 117
Магистрант Д.Ган-Отгон, Доктор (Ph.D) Б.Загдхорол

Улаанбаатар хотын дулаан хангамжийн системийн сүлжээний усны температурын графикийн судалгаа 122
Магистрант Э.Бумбаяр, Доктор (Ph.D) П.Бямбацогт, Магистрант Ч.Мөнхжаргал, Магистр Ө.Энх-Амар

Нар, салхи, батарей хосолмол системийн оновчлол 127
Магистрант Э.Жавхлантөгс, Доктор (Ph.D) Г.Мөнгөншагай

Дорноговь аймгийн Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийг сэргээгдэх эрчим хүчээр шийдэх боломжийн судалгаа 134
Магистрант Б.Батзориг, Доктор (Ph.D) П.Бямбацогт

Фаззи логик дээр суурилсан пропорциональ интеграл дифференциал удирдлага 142
Магистрант А.Амгаланбаатар, Доктор (Ph.D) Б.Нямбаяр

Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээтэй пропорциональ интеграл дифференциал удирдлага 147
Магистрант А.Амгаланбаатар, Доктор (Ph.D) Б.Нямбаяр

Уурхайн 10 кВ-ын цахилгаан хангамжийн системд SCADA удирдлага нэвтрүүлсэн инженерийн шийдэл ба ашиглалт 153
Магистрант З.Баасанжаргал, Доктор (Ph.D) Т.Батгэрэл

Компьютерт томографийн дүрсийн чанарыг фантом ашигласан хяналтын үр дүн 159
Магистрант О.Багабанди, Доктор (Ph.D) Д.Пүрэвдаш

ЦДҮС ТӨХК-ийн Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний тогтсон горимд сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэрүүдийн үзүүлэх нөлөөллийг квази-динамик симуляц хийн тодорхойлох 164
Магистрант Д.Баяржаргал, Магистрант И.Лувсанцэрэн, Доктор (Ph.D) Э.Энхсайхан

Дархан хотын дулаан хангамжийн хэтийн төлөв: Өсөн нэмэгдэх хэрэглээ ба хоёрдогч эх үүсвэрийн сонголт 173
Магистрант Б.Бат-Эрдэнэ, Магистр О.Пүрэвжал, Магистрант Э.Цэнгүүл, Доктор (Ph.D) П.Бямбацогт

Улаанбаатар хотын дулааны ачааллын тооцоолол, үр дүнгийн шинжилгээ 177
Докторант Х.Цолмон, Академич С.Батмөнх

Эсрэг осмосын мембран дахь хагжилтыг ОЭДФ хүчлийн босго утгаар оновчлох асуудал 185
Докторант Д.Анударь, Доктор (Ph.D) Б.Оюунсувд

2-р хэсэг. Бакалавр оюутнуудын илтгэлүүд

Хиймэл оюун ухааныг эмбэддэд системтэй хослуулан робот зохион бүтээх нь 192

Д.Чингүн, Доктор (Ph.D) М.Цолмон

Бага чадлын хийн түлшээр ажиллах эх үүсвэрийг сумын төвийн дулаан хангамжид ашиглах боломжийн судалгааны зарим үр дүн 197

Б.Угтахбаяр, Доктор (Ph.D) Б.Өлзийбадрах

Синхрон генераторын өдөөлтийн системийн судалгаа 200

Б.Түшиг-Эрдэнэ, Доктор (Ph.D) Б.Загдхорол

Микроконтроллёр ашиглан fft алгоритмд тулгуурлан хүчдэлийн гармоник шинжилгээний бодит цагийн хяналтын системийг хөгжүүлэх нь 210

Г.Өсөхбаяр, Т.Мөнхзул, Б.Доржсүрэн, Б.Хандсүрэн, Доктор (Ph.D) Б.Түвшинбаяр

Гэрийн автоматжуулалтын системд wi-fi ба zigbee сүлжээний харьцуулалт 215

Н.Бат-Оргил, Доктор (Ph.D) М.Цолмон

Түгээх сүлжээний хүчдэлийн уналт болон ихсэлтийн асуудлыг сэргээгдэх эрчим хүчний тархмал эх үүсвэрийн давтамж хувиргуурын удирдлагаар шийдвэрлэх судалгаа 219

Ю.Алтанбагана, Д.Амарболд, Б.Чинзориг, Э.Бархас, Доктор (Ph.D) Б.Түвшинбаяр

Түгээх сүлжээний богино залгааны симуляцын харьцуулсан дүн шинжилгээ 224

Д.Лхагвасүгар, Г.Ганбаяр, Доктор (Ph.D) Ж.Нандагсамба, Доктор (Ph.D) Ц.Чингэс

600 МВТ-ын чадалтай бөөрөлжүүт дулааны цахилгаан станцын маневрлах чадварыг дээшлүүлэх зорилгоор дулаан хуримтлуурын системийг нэгтгэх судалгаа 228

М.Төртогтох, Доктор (Ph.D) Ш.Энхбаяр,

Цэцэрлэг хотын дулаан хангамжийг сайжруулах судалгааны зарим үр дүн 236

А.Бямба-Очир, Доктор (Ph.D) Б.Өлзийбадрах

Аймгийн төвд бага чадлын ДЦТ байгуулах судалгааны зарим үр дүн 238

А.Бямба-Очир, Доктор (Ph.D) Б.Өлзийбадрах

Тэлмэн 110 кВ-ын ЦДАШ-ын гэмтлийн зайг Такаги арга болон Монте-Карло симуляцаар тодорхойлох 241

Э.Хүдэрхуяг, Магистр Ө.Баярмаа

БКЗ-220 зуухны галын хотлын аэродинамик загварчлалын судалгааны зарим үр дүн 246

Ч.Сандуйбазар, *Доктор (Ph.D)* Д.Дававцэрэн

Хөдөлгүүрийн хурдны тохируулгын пид ба фаззи логик контроллеруудын харьцуулсан судалгаа 250

Б.Нэргүй, Магистр Л.Атарцэцэг

Монгол орны бага хурдны салхины нөхцөлд Vortex bladeless салхин турбин ашиглах боломж 254

Г.Мөнхтүшиг, Б.Сайханбилэг, Б.Азжагал, О.Баттүвшин, Доктор (Ph.D) Э.Мөнхтуяа

ДХС-ийн дулааны дэд станц дахь даралт, даралтын зөрүүний хэмжих хэрэгсэл ба тохируулгын элементийн сонголтын судалгаа 259

Д.Мичидмаа, Магистр Х.Цолмон, Магистр Л.Атарцэцэг

Автомат удирдлагын Каскад системийн тохируулгын параметрийн оновчтой утгуудын харьцуулалт 264

Ц.Уганчимэг, Магистр Х.Цолмон

Их сургуулийн кампусын орчинд хүний алхалтын энергийг ашиглах Пьезоэлектрик системийн судалгаа 268

Б.Агиймаа, Х.Амарбаясгалан, Л.Мөнгөлжин, Ц.Оюун-Болор, Э.Эгшиглэн, Доктор (Ph.D) Х.Сарангэрэл

Нарны цахилгаан системийн хамгийн их чадлын цэгийг дагах хяналтын аргуудын загварчлал ба харьцуулсан судалгаа 275

Б.Батсувд, К.Нурбота, Доктор (Ph.D) Х.Сарангэрэл

Sarima арга ашиглан цахилгаан эрчим хүчний ачаалалд таамаглал хийх 281

Д.Отгондарь, Ү.Санчирмаа, Доктор (Ph.D) М.Цолмон

Гулууз болон ангилан савласан мах боловсруулах үйлдвэрийн эрчим хүчний харьцуулсан судалгаа 284
Д.Тилеухабыл, Магистр Э.Оюу-Эрдэнэ
Түгээх сүлжээний горимын үзүүлэлт, эрчмийн алдагдалд нарны тархмал эх үүсвэрийн нөлөөллийн харьцуулсан судалгаа 288
Э.Энхчимэг, Б.Анхбаяр, Доктор (Ph.D) П.Эрхэмтөр
Улаанбаатар хот дахь цахилгаан автомашины цэнэглэх дэд бүтэц: хэрэглэгчийн хандлага ба сэргээгдэх эрчим хүчний интеграцийн боломж 294
А.Маргад-Эрдэнэ, А.Энгүүн, Ж.Билгүүн-Эрдэнэ, Доктор (Ph.D) Э.Мөнхтуяа
Нарны цахилгаан үүсгүүрээр шууд тэжээгддэг тогтмол гүйдлийн диодон халаагуур 298
Б.Эрхэмбаяр, Г.Мөнгөншагай
Ухаалаг цахилгаан тоолуурын чадлын хязгаарлалтын функцийг ашиглаж цахилгаан эрчим хүчний хөнгөлөлт хийх боломжийн судалгаа 307
Б.Дэмбэрэлзодов, Т.Мөнхзул, Г.Баяр-Эрдэнэ, Доктор (Ph.D) Б.Түвшинбаяр
Асинхрон хөдөлгүүрийн өөр, өөр ачаалалтай үеийн өөрөө асаалт болон зөөлөн асаалтын гүйдлийн туршилтад суурилсан харьцуулсан судалгаа 312
Г.Лувсанжамба, М.Уртнасан, Ж.Ням, Доктор (Ph.D) Б.Түвшинбаяр
Утасгүй сүлжээний технологи ашиглаж реле хамгаалалтын төхөөрөмжөөс өгөгдөл цуглуулах бичил SCADA системийн судалгаа 316
Б.Мөнхтуяа, Э.Сэдзана, Б.Дэмбэрэлзодов, Доктор (Ph.D) Б.Түвшинбаяр
Нарны фотоцахилгаан модулиудын үйлдвэрлэлийн харьцуулсан судалгаа 320
М.Солонго, Доктор (Ph.D) Г.Мөнгөншагай
Орчин үеийн маммограф аппаратны техник үзүүлэлтийн харьцуулалт 326
С.Хүслэн, Доктор (Ph.D) Д.Пүрэвдаш
Автомат удирдлагын каскад системийн тохируулгын параметрийн оновчтой утгуудын харьцуулалт 330
Ц.Уганчимэг, Магистр Х.Цолмон
Даралт температурын шугаман хамаарлын онол ба туршилтын зөрүүг судлах нь 335
О.Билгүүн, Доктор (Ph.D) А.Түмэнбаяр
Үхрийн ялгадаст суурилсан анаэроб задралын биогаз үүсэлтийн ажиглалтын үр дүнг судалгааны эх сурвалжуудтай харьцуулсан судалгаа 338
М.Солонго, С.Мөнхшүр, Л.Сүх-Эрдэнэ

МОНГОЛ ГЭРИЙН ДУЛААНЫ АЛДАГДАЛ БА ТҮЛШНИЙ ХЭРЭГЛЭЭНИЙ ХАМААРЛЫН СУДАЛГААНЫ ЗАРИМ ҮР ДҮН

Хашгэрэлийн ГАНЗОЛБОО[1], Бүсжавын НАМХАЙНЯМ[2], Батсамбуугийн ӨЛЗИЙБАДРАХ[1]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль,

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, Дулааны Техник, Үйлдвэрлэлийн Экологийн Хүрээлэн

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: zzolboo0311@gmail.com[1]

Хураангуй: **Монгол орны хөдөө орон нутагт амьдарч буй малчин өрхийн орон сууцны үндсэн хэлбэр нь монгол гэр бөгөөд энэ нь уламжлалт, нүүдлийн амьдралын хэв маягт тохиромжтой боловч дулаан хангамжийн талаас харьцангуй их дулаан алдагдалтай сууц юм. Ялангуяа өвлийн улиралд агаарын температур эрс буурч, салхины нөлөө ихсэх үед гэрийн бүрээс, тооно, хаалга болон шалны хэсгээр дулаан алдагдах нь түлшний хэрэглээг нэмэгдүүлэх гол хүчин зүйл болдог. Үүний улмаас малчин өрхүүд нүүрс, мод зэрэг түлшийг их хэмжээгээр хэрэглэж, эдийн засгийн зардалаа өсгөхөөс гадна агаарын бохирдолд тодорхой хэмжээгээр нөлөөлж байна. Энэхүү судалгаанд монгол гэрийн дулаан алдагдлын үндсэн эх үүсвэрүүдийг тодорхойлж, дулаан техникийн шинжилгээ хийх замаар түлшний хэрэглээг бууруулах боломжит арга хэмжээнүүдийг судалсан болно. Судалгааны үр дүнд гэрийн дулаалга сайжруулах, бүтцийн зарим элементүүдийг оновчтой болгох, мөн үр ашиг өндөртэй халаалтын төхөөрөмж ашиглах нь түлшний хэрэглээг бууруулах, дулааны үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжтойг тогтоохыг зорилоо.**

Түлхүүр үг: дулааны алдагдал, монгол гэр, түлшний хэрэглээ, дулааны баланс, эрчим хүчний үр ашиг

I. УДИРТГАЛ

Судлаачид [1] судалгааны ажлын үр дүнгээр малчин өрхийн жилийн түлшний хэрэглээ, дулааны гаргалтыг тодорхойлсон. Харин энэ өгүүллээр монгол гэрийн дулааны алдагдлыг үнэлж, түлшний хэрэглээ болон гэр доторх агаарын температурын хамаарлыг тодорхойлон, түлшний нийт хэрэглээнээс үүдэх байгаль орчны нөлөөллийг тооцоолох зорилго тавьсан.

Судалгаанд түлшний бодит хэрэглээний өгөгдөл болон улирлын температурын мэдээллийг ашиглан дулаан дамжуулалтын балансын аргаар шинжилгээ хийв. Үр дүнгээс харахад монгол гэрийн нийт дулааны 60–70% нь яндан болон бүрээсээр алдагдаж байгаа бөгөөд дулаан алдагдлыг бууруулснаар түлшний хэрэглээг 25 хүртэл хувиар бууруулах боломжтой байна. [1] судалгаагаар тухайн өрх жилд 9.2 тн түлш хэрэглэж, 9.68 Гкал дулааныг бодитоор хэрэглэж байгааг тогтоосон. Түлшний болон гэрийн дотор агаарын хэмжилт, тооцоог Ховд аймгийн Эрдэнэбүрэн сумын жишээн дээр гүйцэтгэв. Монгол гэрийн бүтцийг 1 дүгээр зурагт дүрслэн үзүүлэв.



1-р зураг. Монгол гэрийн бүтэц

Нэгдүгээр зургаас үзэхэд монгол гэрийн бүрээс, туурга, тооно, хаалга, яндан эдгээр элементүүд нь дулааны алдагдлын үндсэн эх үүсвэр болохоор байна.

II. СУДАЛГААНЫ АРГАЗҮЙ

1. Дулааны балансын арга

Гэрийн дулааны алдагдлыг дараах аргачлалаар тооцоолно:

$$Q_{\text{д.д}} = \sum U_i \cdot F_i \cdot \left(T_{a.\text{д}} - T_{\text{а.г}}\right) \qquad (1)$$

Энд: U – дулаан дамжуулалтын коэффициент; F – хаших хийцийн талбай; ΔT – орчны температурын зөрүү.

Нүүрсхүчлийн хийн ялгарлыг дараах томьёогоор тооцно:

$$E_{co2} = M \cdot Q_{\text{доод}}^{\text{аж}} \cdot EF \cdot ce \cdot \frac{44}{12} \qquad (2)$$

Энд: M–түлшний жилийн бодит хэрэглээ, мян.тонн; q–түлшний дулаан гаргах чадвар, МДж/тн, EF–нүүрстөрөгчийн ялгарлын коэффициент, тнС/ТДж; ce – шаталтын коэффициент.

2. Судалгааны өгөгдөл

Ховд аймгийн Эрдэнэбүрэн сумын гадна агаарын температур зундаа +30С өвөлдөө -37С хүрдэг эрс тэс уур амьсгалтай газар нутаг юм. Судалгаанд монгол гэрт ашиглагдах түлшний нийт хэрэглээг хэмжих төхөөрөмжийн тусламжтайгаар тодорхойлж, хэрэглээний бодит хэмжээг бүртгэж тогтоосон. Үүний зэрэгцээ гэрийн дотор болон гадна орчны агаарын температурыг тогтмол хөтөлж, түлшний зарцуулалттай харьцуулан шинжилсэн. Улмаар цуглуулсан өгөгдөл нь монгол гэрийн дулааны хэрэглээ, түлшний зарцуулалтын хамаарлыг тодорхойлох, цаашдын эрчим хүчний хэмнэлттэй шийдлийг боловсруулахад суурь мэдээлэл болох юм. Хэмжилт хийгдсэн монгол гэрийн хаших хийцийн хэмжээс, дулаан дамжуулалтын коэффициентын утгуудыг 1 дүгээр хүснэгтэд, хэрэглэгдсэн түлшнүүдийн үзүүлэлтийг 2 дугаар хүснэгтэд тус тус үзүүлэв.

МОНГОЛ ГЭРИЙН ХАШИХ ХИЙЦИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

1-Р ХҮСНЭГТ

№	Хаших хийц	Материал	F, м²	λ, Вт/мС
1	Хана	Эсгий	40.81	0.05
		Агаарын завсар		0.06
		Мондон хийц		0.18
		Брезент		0.08
2	Шал	Эсгий	20.42	0.04
3	Дээвэр	Эсгий	16.81	0.05
		Брезент		0.08
4	Тооно	Шил	1.77	0.5

ТҮЛШНИЙ ДУЛААН ГАРГАХ ЧАДВАР

2-Р ХҮСНЭГТ

№	Нэр	Нэгж	Тоон утга
1	Нүүрс	ккал/кг	6084
2	Хөрзөн		3074
3	Аргал		2890
4	Харгана, бургас		2450

III. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

Монгол гэрийн дулаан алдагдлыг хаших хийцийн дулаан дамжуулалтын шинж чанарт тулгуурлан тооцоолсон. Тооцоонд гэрийн ханын бүрээс, дээвэр, хаалга болон шалны хийцээр дамжин алдагдах дулааны хэмжээг тус бүрд нь тодорхойлж, нийт дулаан алдагдлын бүтцийг гаргав. Ингэснээр монгол гэрийн дулааны горимд хаших хийцүүдийн үзүүлэх нөлөөг үнэлэх боломж бүрдсэн. Түүнчлэн дулаан алдагдлын хэмжээг бодит нөхцөлтэй уялдуулан харьцуулж, түлшний хэрэглээ болон дотоод орчны температурын өөрчлөлттэй холбон шинжилсэн.

Дулааны алдагдлыг тооцоолох нь барилгын эрчим хүчний хэрэглээг үнэлэхэд чухал үзүүлэлт болдог. Дулаан алдагдлын тооцооны үр дүнг 3 дугаар хүснэгтэд нэгтгэн үзүүлэв. Тооцооллын үр дүнгээс харахад гэрийн ханын бүрээс, шалны хэсгээр дулааны ихэнх алдагдал үүсэж байгаа бөгөөд нийт дулаан алдагдлын 65 гаруй хувийг эзэлж байна.

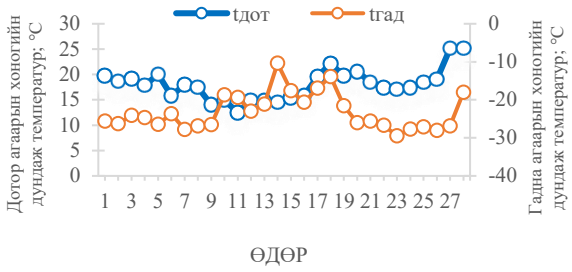
Гэрийн гадна дотор агаарын температурын 2 дугаар сарын хэмжилтийн үр дүнг 2 дугаар зурагт тус тус харуулав.

Хэмжилтийн аргаар тодорхойлсон түлшний зарцуулалтад үндэслэн нүүрсхүчлийн давхар ислийн ялгаралтыг тооллоо. Ингэснээр эрчим хүчний хэрэглээ болон байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөг илүү бодитой үнэлэх боломж бүрдэнэ. Судалгааны үр дүн нь хүлэмжийн хий бууруулах арга хэмжээг төлөвлөхөд ашиглагдана. Тооцооны үр дүнг 4 дүгээр хүснэгтэд харууллаа.

ДУЛААНЫ АЛДАГДЛЫН ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

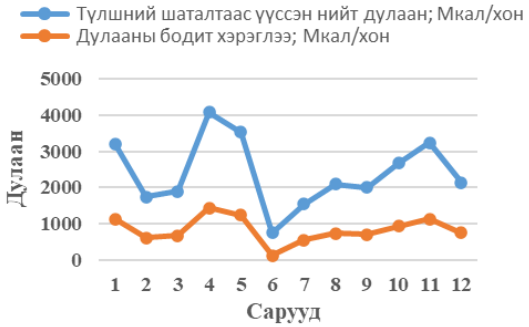
3-Р ХҮСНЭГТ

№	Нэр	Нэгж	Тоон утга
1	Хана	кВт	2.0
2	Шал		1.71
3	Дээвэр		1.06
4	Тооно		0.55
Нийт			5.32



2-р зураг. Малчин өрхийн гэрийн гадна болон дотор агаарын температурын график

Хоногт хэрэглэсэн түлшний шаталтаас үүссэн нийт дулаан болон бодит дулааны хэрэглээг 3-р зурагт харуулав.



3-р зураг. Малчин өрхийн түлшний шаталтаас үүссэн нийт дулаан болон бодит хэрэглээний график

CO_2 ЯЛГАРЛЫН ТОО ХЭМЖЭЭ

4-Р ХҮСНЭГТ

№	Нэр	Зарцуулалт, т/ц	E_{CO_2}, кг
1	Нүүрс	520.6	621
2	Хөрзөн	4.7	4108
3	Аргал	2.64	2302
4	Харгана	0.86	747
Нийт			7778

ДҮГНЭЛТ

1. Монгол гэрийн түлшний хэрэглээ нь зөвхөн ашиглаж буй түлшний төрлөөс бус, барилгын дулааны алдагдлын хэмжээнээс шууд хамааралтай байна. Дулааны алдагдал их байх тусам түлшний зарцуулалт нэмэгдэж, улмаар нүүрсхүчлийн давхар ислийн ялгаралт өсөх хандлага ажиглагдлаа. Судалгаагаар нийт дулааны алдагдал 5.32 кВт орчим байгаа нь түлшний хэрэглээнд мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлсэн

2. Гэрийн хаших хийцийн давхаргуудын хооронд чийг үүсэх нь дулаан хадгалах чадварыг эрс бууруулдаг. Иймээс өвлийн улиралд гэрийн дотор талаас хулдаасан материал (гялгар цаас зэрэг) ашиглан уур, чийгийн хамгаалалт хийх нь ханын болон туурганы дулаан тусгаарлах чанарыг хадгалахад чухал ач холбогдолтой.

3. Дулааны алдагдлыг бууруулахын тулд эсгийг давхарлах, яндангийн дулаан ашиглах төхөөрөмж суурилуулах, шал болон хаалгыг дулаалах, мөн агаар-агаарын дулааны насос ашиглах зэрэг арга

хэмжээг хэрэгжүүлэх боломжтой. Эдгээр арга хэмжээг хэрэгжүүлснээр түлшний хэрэглээг бууруулж, жилд ойролцоогоор 20-30 хувиар CO_2 ялгаралтыг багасгах боломж бүрдэнэ.Монгол гэрийн түлшний хэрэглээ нь зөвхөн түлшний төрөл бус, дулааны алдагдлын түвшнээс шууд хамааралтай байна. Дулаан техникийн арга хэмжээг хэрэгжүүлснээр малчин өрхийн эрчим хүчний ачааллыг мэдэгдэхүйц бууруулах боломжтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Х.Ганзолбоо Б.Намхайням “Малчин өрхийн түлшний хэрэглээний судалгаа”

[2] Монгол улсын үндэсний статистикийн хороо тайлан эмхэтгэл

[3] Б. Намхайням, Н. Цолмон Байгаль орчин эрчим хүч технологи 2014 он

[4] Монгол улсын шинжлэх ухааны академи “Био эрчим хүч” Шинжлэх ухаан танин мэдэхүйн цуврал-105 дугаар

[5] Daajav B. Yurt as the origin of Mongolian architecture, (in Mongolian) Ulaanbaatar, Mongolia, Translated, 2006.

[6] Б.Намхайням “Дулаан хангамжийн систем” Улаанбаатар хот, 2015 он

“БАЯНХОНГОР-ЭРЧИМ ХҮЧ” ЦАХИЛГААН ТҮГЭЭХ СҮЛЖЭЭНИЙ ТАСРАЛТ, РЕЛЕ ХАМГААЛАЛТЫН СУДАЛГАА

Алтанхуягийн ЛХАГВАДОРЖ[1], Мандширын БАТМӨНХ[2], Мөнхбаатарын БАТТУЛГА[3]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: battulga@must.edu.mn[3]

Хураангуй: **Түгээх сүлжээний найдвартай ажиллагаа нь хэрэглэгчдийг чанартай, тасралтгүй цахилгаан эрчим хүчээр хангах үндсэн нөхцөл болдог. “Баянхонгор-Эрчим хүч” ЦТ ХХК нь Баянхонгор аймгийн төв болон 12 сум, Шаргалжуутын 8 дугаар багийг хамарсан өргөн хүрээтэй түгээх сүлжээг ашиглаж, 249 дэд станц, 0.4–35 кВ-ын түвшний агаарын болон кабель шугам тоноглолттой ажиллуулж байна. Иймээс нөхцөлд сүлжээнд гарч буй гэмтэл, тасралтын тоог бууруулах, реле хамгаалалтын ажиллагаанд дүн шинжилгээг системтэй судлах нь онолын болон практик ач холбогдолтой юм. Энэхүү судалгаанд 2021–2025 оны хооронд тус түгээх сүлжээнд гарсан тасралтын статистик мэдээлэлд дүн шинжилгээ хийж, гэмтлийн шалтгаан, давтамж, улирлын хамаарал, тоноглолын төрлөөр ангилсан. Мөн ашиглагдаж буй реле хамгаалалтын төрлүүд, элементийн баазын ангилал, ажиллагааны найдвартай байдлыг тасралтын мэдээлэлтэй уялдуулан судаллаа. Судалгааны үр дүнгээс харахад тасралтын дийлэнх хувь нь кабелийн гэмтэл, байгалийн хүчин зүйл болон тогтворгүй газардлагатай холбоотой бөгөөд 3–9 дүгээр сард тасралтын давтамж огцом нэмэгддэг байна. 2025 оны байдлаар ашиглалтад буй реле хамгаалалтын 91% нь микропроцессорын элементийн бааз дээр суурилсан нь хамгаалалтын тавилын нарийвчлал, уялдаа зохицуулалтыг сайжруулж, буруу ажиллагааг бууруулж байгааг харууллаа. Өгүүлэлд эхний хэсэгт түгээх сүлжээ болон реле хамгаалалтын онолын үндэслэлийг авч үзсэн, хоёрдугаар бүлэгт тасралтын статистик судалгааны арга зүй, үр дүнг танилцуулсан, гуравдугаар бүлэгт реле хамгаалалтын ашиглалтын байдалд дүн шинжилгээ хийж, төгсгөлд нь судалгааны ерөнхий дүгнэлтийг оруулсан болно.**

Түлхүүр үг: Түгээх сүлжээ, гэмтлийн статистик, микропроцессорын хамгаалалт, цахилгаан шугамын найдвартай байдал, хамгаалалтын тавил.

I. УДИРТГАЛ

Цахилгаан эрчим хүчний түгээх сүлжээ нь үйлдвэрлэл, үйлчилгээ, хүн амын өдөр тутмын хэрэглээний үндсэн дэд бүтэц бөгөөд түүний найдвартай ажиллагаа нь бүс нутгийн нийгэм, эдийн засгийн хөгжилтэй шууд уялдаатай байдаг [1], [2]. Түгээх сүлжээнд гарч буй гэмтэл, тасралт нь эрчим хүчний дутуу түгээлт, тоноглолын эвдрэл, хэрэглэгчийн эдийн засгийн бодит хохирол үүсгэхээс гадна эрчим хүчний системийн найдвартай ажиллагаанд сөргөөр нөлөөлдөг. Иймд тасралтын шалтгаан, нөхцөлийг тодорхойлж, тэдгээрийг богино хугацаанд мэдрэх реле хамгаалалтын ажиллагааг судлах нь чухал асуудал юм.

Түгээх сүлжээний реле хамгаалалт нь гэмтэл гарсан тохиолдолд зөвхөн гэмтэлтэй хэсгийг богино хугацаанд тусгаарлах, эрүүл хэсгийг хэвийн горимоор үргэлжлүүлэн ажиллуулах үүрэгтэй [3], [4]. Орчин үеийн түгээх сүлжээнд уламжлалт цахилгаан механик реленээс гадна микропроцессорын элементийн бааз дээр суурилсан реле хамгаалалтууд өргөн нэвтэрч, хамгаалалтын мэдрэмж, сонгох чадвар, найдвартай ажиллагааг эрс сайжруулж байна [5]–[7]. Олон улсын судалгаанд микропроцессорын реле нь хамгаалалтын буруу ажиллагааг бууруулж, системийн тасралтын үргэлжлэх хугацааг багасгадаг болохыг онцолсон байдаг.

“Баянхонгор-Эрчим хүч” ЦТ ХХК-ийн түгээх сүлжээ нь газарзүйн хувьд уудам нутаг дэвсгэрийг хамарсан, агаарын болон кабель шугам хосолсон бүтэцтэй, байгалийн эрс тэс уур амьсгалын нөлөөнд ихээхэн өртдөг онцлогтой. Тус компанийн нийт 1127,9 км шугам сүлжээ, 248 дэд станцтай бөгөөд үүний 42% нь байгууллагын, 58% нь хувийн эзэмшилд хамаарна. 0.4–35 кВ-ын түвшний олон төрлийн тоноглол, урт шугам сүлжээ нь гэмтэл, тасралт гарах эрсдэлийг нэмэгдүүлж, түүнийг дагаад хамгаалалтын тавил тохируулга, хэвийн ашиглалтын горимд өндөр шаардлага тавигдаж байна.

Энэхүү судалгааны зорилго нь “Баянхонгор-Эрчим хүч” ЦТ ХХК-ийн түгээх сүлжээнд 2021–2025 онд гарсан тасралтын статистик мэдээлэлд дүн шинжилгээ хийж, гэмтлийн үндсэн шалтгаан, давтамж, улирлын хамаарлыг тодорхойлох, мөн ашиглагдаж буй реле хамгаалалтын төрлүүд, элементийн бааз, ажиллагааг үнэлэхэд оршино. Судалгааны үр дүн нь түгээх сүлжээний найдвартай ажиллагааг дээшлүүлэх, реле хамгаалалтын шинэчлэл, техникийн бодлогыг тодорхойлоход ашиглагдах боломжтой.

II. ГЭМТЭЛ, ТАСРАЛТЫН СТАТИСТИК СУДАЛГАА

Компанийн өөрийн болон хувь хэрэглэгчийн эзэмшлийн цахилгаан тоноглолд гарсан тасралтыг 2021–2025 оны хооронд авч үзэн ангилж, шалтгаан нөхцөлөөр нь задлан шинжиллээ. Судалгаанаас харахад жилд дунджаар 193 удаагийн тасралт бүртгэгдсэн бөгөөд 2025 онд өмнөх онтой харьцуулахад тасралтын тоо 15%-иар буурсан эерэг хандлага ажиглагдсан.

Гэсэн хэдий ч жил бүрийн 3–9 дүгээр сард тасралтын тоо огцом нэмэгддэг хэвээр байна. Энэ нь дулааны улиралд хамгаалалтын зурваст зөвшөөрөлгүй газар шорооны ажил гүйцэтгэх, аадар бороо, салхи шуурга зэрэг байгалийн хүчин зүйлсийн нөлөөгөөр шугам, тоноглолын гэмтэл 2–3 дахин өсдөгтэй холбоотой юм.

ШУГАМ, ТОНОГЛОЛЫН ГЭМТЛИЙН ШАЛТГААН

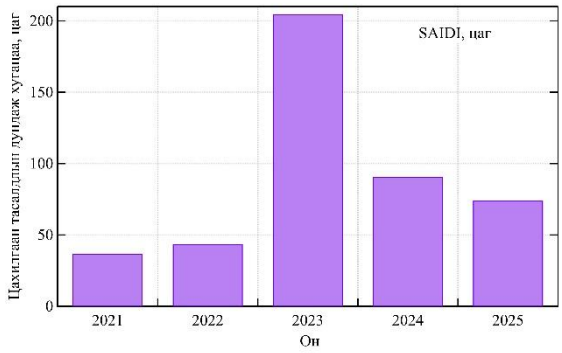
1-Р ХҮСНЭГТ

№	Гэмтлийн шалтгаан	2025 оны өссөн дүнгээр	
		Тоо	%
1	Кабель гэмтсэн	21	10.9%
2	трансформатор гэмтсэн	5	2.6%
3	0.4-35 кВ тоноглол гэмтсэн	31	16.1%
4	Тусгаарлагч гэмтсэн	6	3.1%
5	Гал хамгаалагч гэмтсэн	11	5.7%
6	Шугамын утас тасарсан	9	4.7%
7	Тулгуур гэмтсэн	2	1%
8	Гуравдагч этгээдээс шалтгаалсан	4	2.1%
9	Хувь хэрэглэгчийн шугам тоноглолын гэмтэл	12	6.2%
10	Байгалийн гамшиг	40	20.7%
11	Гэмтэл тодорхойгүй	52	26.9%
12	Нийт	193	100%

2025 оны тасралтын өссөн дүнгийн шинжилгээнээс харахад нийт 193 удаагийн гэмтэл бүртгэгдсэн бөгөөд үүний хамгийн өндөр хувийг гэмтэл тодорхойгүй ангилал эзэлж, 52 удаа буюу 26.9%-ийг бүрдүүлж байна. Энэ нь ихэвчлэн тогтворгүй газардлага, цаг агаарын нөлөөтэй богино хугацааны гэмтлийг нарийвчлан тодорхойлох боломж хангалтгүй байгаатай холбоотой гэж үзэж болно. Үүний дараагаар байгалийн гамшгаас шалтгаалсан гэмтэл 40 удаа буюу 20.7%, 0.4–35 кВ-ын тоноглолын гэмтэл 31 удаа буюу 16.1%-иар тус тус өндөр үзүүлэлттэй байна. Харин кабелийн гэмтэл 21 удаа буюу 10.9%-ийг эзэлж, кабель шугамын насжилт, үзүүрийн муфтын тусгаарлалтын доройтолтой шууд хамааралтай байгааг харуулж байна. Үлдсэн гэмтлүүдийн хувьд гал хамгаалагч (5.7%), хувь хэрэглэгчийн шугам тоноглол (6.2%), шугамын утас тасралт (4.7%) зэрэг нь дунд болон бага түвшинд ажиглагдаж байгаа бол трансформатор (2.6%), тусгаарлагч (3.1%), тулгуурын гэмтэл (1.0%), гуравдагч этгээдийн нөлөөлөл (2.1%) нь харьцангуй бага хувийг эзэлж байна (1-р хүснэгт).

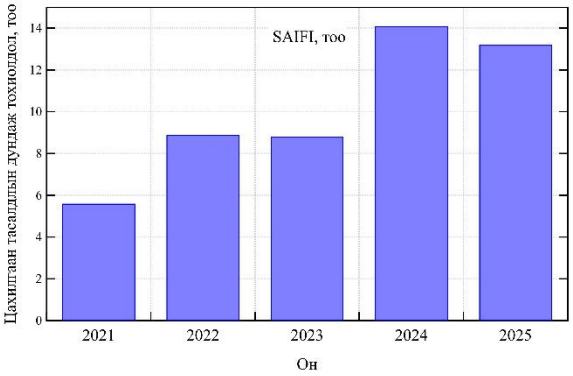
Тасралтын шалтгааныг ангилж үзэхэд кабелийн гэмтэл, байгалийн гамшиг, 0.4–35 кВ-ын тоноглолын гэмтэл хамгийн өндөр хувийг эзэлж байна. Мөн “гэмтэл тодорхойгүй” ангилалд хамаарах тасралт өндөр байгаа нь тогтворгүй газардлага, цаг агаарын нөлөөтэй тасралтыг илрүүлэх, бүртгэх аргачлалыг сайжруулах шаардлагатайг харуулж байна.

1-р зурагт SAIDI үзүүлэлтийг харуулсан ба 2021–2023 онд цахилгаан тасалдлын дундаж үргэлжлэх хугацаа огцом өсөж, 2023 онд хамгийн өндөр түвшинд хүрсэн байна. Энэ нь тухайн онд байгалийн гамшиг, шугам тоноглолын насжилттай холбоотой томоохон гэмтлүүд олноор гарч, тасралтыг сэргээх хугацаа уртассан болохыг илтгэнэ. Харин 2024–2025 онд SAIDI үзүүлэлт мэдэгдэхүйц буурсан нь реле хамгаалалтын шинэчлэл, микропроцессорын хамгаалалтыг өргөн нэвтрүүлсэн, мөн тасралтыг богино хугацаанд илрүүлж, засварлах чадавх сайжирсантай холбоотой гэж үзэх үндэслэлтэй. Гэсэн хэдий ч 2025 оны үзүүлэлт нь 2021–2022 оны түвшнээс өндөр хэвээр байгаа нь түгээх сүлжээний найдвартай ажиллагааг цаашид сайжруулах шаардлагатай байгааг харуулж байна.



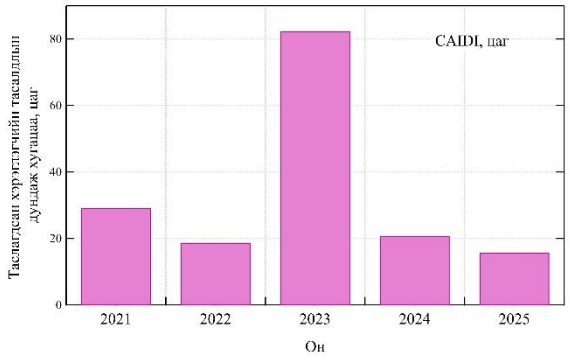
1-р зураг. Цахилгаан тасалдлын дундаж хугацаа - SAIDI, цаг

SAIFI үзүүлэлт нь жилд нэг хэрэглэгчид ноогдох тасалдлын давтамжийг илэрхийлдэг бөгөөд 2-р зургаас харахад 2021 оноос хойш тасралтын тоо ерөнхийдөө өсөх хандлагатай байна. 2024–2025 онд SAIFI хамгийн өндөр түвшинд хүрсэн нь нийт тасралтын тоо буураагүй, харин харьцангуй богино хугацаатай боловч олон давтамжтай тасралтууд нэмэгдсэнийг илтгэнэ. Энэ нь байгалийн хүчин зүйл, тогтворгүй газардлага, богино хугацааны шугамын гэмтлүүд давамгайлж байгаатай холбоотой байж болох юм. Өөрөөр хэлбэл тасралтыг хурдан сэргээж байгаа хэдий ч тасралт үүсэх давтамжийг бүрэн бууруулж чадаагүй байдал SAIFI үзүүлэлтээр илэрч байна.



2-р зураг. Цахилгаан тасалдлын дундаж тохиолдол – SAIFI, тоо

CAIDI үзүүлэлтийн өөрчлөлтөөс харахад (3-р зураг) 2023 онд хамгийн өндөр утгад хүрсэн нь нэг тасралтад ногдох сэргээх дундаж хугацаа уртассан, өөрөөр хэлбэл томоохон гэмтэл давамгайлж байсныг илтгэнэ. Харин 2024–2025 онд CAIDI мэдэгдэхүйц буурсан нь тасралт гарсан тохиолдолд хэрэглэгчийн цахилгаан эрчим хүчийг харьцангуй богино хугацаанд сэргээх чадвар сайжирсан байна.

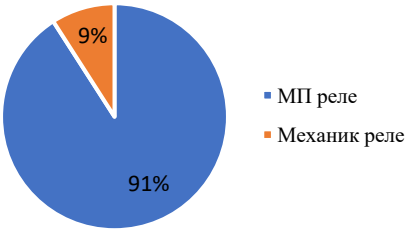


3-р зураг. Таслагдсан хэрэглэгчийн тасалдлын дундаж хугацаа - CAIDI, цаг

2021–2025 оны SAIDI, SAIFI, CAIDI үзүүлэлтүүдийн харьцуулсан шинжилгээнээс харахад түгээх сүлжээний найдвартай ажиллагаа нь тасралтын давтамж (SAIFI) болон үргэлжлэх хугацаа (SAIDI, CAIDI)-ын хам нөлөөгөөр тодорхойлогдож байна. 2023 онд SAIDI болон CAIDI огцом өссөн нь тасралтын давтамж харьцангуй тогтвортой байсан хэдий ч гарсан гэмтлүүд нь томоохон, засварлах хугацаа урттай байсныг илтгэнэ. Харин 2024–2025 онд SAIDI болон CAIDI буурч байгаа нь тасралтыг сэргээх хугацаа богиноссоныг, өөрөөр хэлбэл гэмтэл илрүүлэх, салгах, засварлах үйл ажиллагаа сайжирсныг харуулж байна. Үүний зэрэгцээ SAIFI өндөр түвшинд хадгалагдаж байгаа нь богино хугацаатай боловч олон давтамжтай тасралтууд давамгайлж байгааг илтгэж, тасралтын давтамжийг бууруулах арга хэмжээ цаашид шаардлагатайг харуулж байна. Иймд найдвартай ажиллагааг цогцоор нь сайжруулахад тасралтын үргэлжлэх хугацааг багасгахын зэрэгцээ тасралт үүсэх шалтгааныг үндсээр нь бууруулах шаардлагатай байна.

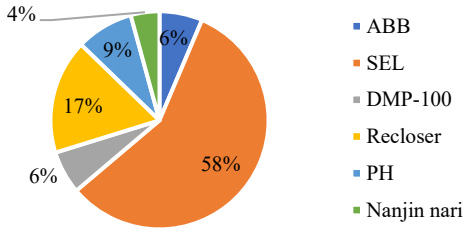
III. РЕЛЕ ХАМГААЛАЛТЫН АШИГЛАЛТЫН БАЙДАЛ

“Баянхонгор-Эрчим хүч” ЦТ ХХК-д микропроцессорын болон цахилгаан механик элементийн бааз дээр суурилсан реле хамгаалалтуудыг хослуулан ашиглаж байна. Үүнд ABB REX-610, SEL, Nanjin Nari, DMP-100, Recloser төрлийн микропроцессорын реле, мөн РН-54/160-УХЛ4, РН-53/60Д загварын реленүүд ашиглагдаж байна.



4-р зураг. Ашиглалтад байгаа реленүүдийн элементийн бааз ын ангилал

2025 оны байдлаар ашиглалтад буй реле хамгаалалтын 91% нь микропроцессорын, 9% нь цахилгаан механик реле байна. 2008 оноос эхлэн микропроцессорын релег үе шаттайгаар нэвтрүүлснээр хамгаалалтын элементийн баазын шинэчлэл эрчимтэй хийгдэж, сүүлийн жилүүдэд реле хамгаалалтын найдвартай ажиллагаа мэдэгдэхүйц сайжирсан.

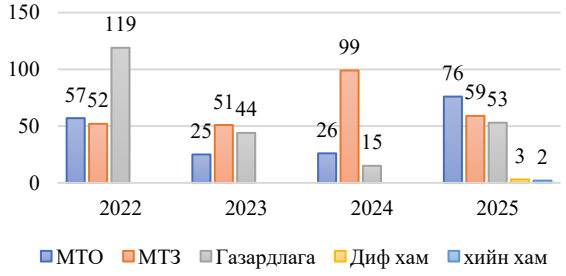


5-р зураг. Ашиглагдаж байгаа РХА-н төхөөрөмжүүд

Реле хамгаалалтын ашиглалтаас харахад 58% нь SEL фермийн микропроцессорын реле эзэлж байна. Энэ нь тус компанийн хувьд SEL реленүүдийг тоноглолын үндсэн хамгаалалт болгон өргөн ашиглаж байгааг илтгэх бөгөөд эдгээр реле нь найдвартай ажиллагаа, программчлагдах уян хатан байдал, ашиглахад хялбар байдагтай холбоотой. Үүний дараагаар Recloser төрлийн хамгаалалт 17%, РН серийн реле (цахилгаан механик) 9%-ийг тус тус эзэлж байгаа нь агаарын шугамын тасралтыг богино хугацаанд автоматаар сэргээх, мөн хуучин тоноглолуудын хамгаалалтад механик релег тодорхой хэмжээнд хадгалж байгааг харуулж байна.

Мөн ABB-ийн микропроцессорын реле 6%, DMP-100 6%, Nanjin Nari 4%-ийг эзэлж байгаа нь реле хамгаалалтын элементийн баазын хувьд олон үйлдвэрлэгчийн бүтээгдэхүүн ашиглагдаж байна. Энэ нь нэг талаас техник–эдийн засгийн уян хатан байдлыг хангаж байгаа боловч нөгөө талаас ашиглалт, тохируулга, засвар үйлчилгээний хийхэд инженер техникийн ажилчдад хүндрэлтэй асуудал юм.

”Баянхонгор-Эрчим хүч” ЦТ ХХК-ний тоноглолуудын реле хамгаалалт нь шугамын хувьд үндсэн хамгаалалтаар гүйдлийн отсечик хамгаалалт (ОТС), бэлтгэл хамгаалалтаар хугацааны барилттай гүйдлийн хамгаалалт (МТЗ); фидерүүдэд нумын хамгаалалт; трансформаторын хамгаалалтаар дифференциал хамгаалалт, хийн хамгаалалт, хугацааны барилттай гүйдлийн хамгаалалтыг (МТЗ) ашиглаж байна.



6-р зураг. Реле хамгаалалтын ажиллагаа

Дээр дурдсан гэмтлийн судалгаанаас харахад гэмтлийн дийлэнх хувийг кабелийн гэмтэл эзэлж байгаа бол түүнтэй уялдан реле хамгаалалтын хувьд

ч мөн ОТС, МТЗ хамгаалалтууд, трансформаторын хамгаалалтын хувьд Газ, МТЗ хамгаалалтуудын ажиллагаа ихэнх хувийг эзэлж байна. Реле хамгаалалтын ажиллагааны судалгааг 2022 оноос 2025 оны эхний 10 дугаар сарын байдлаар гүйцэтгэж, тэдгээрийн ажиллагааг 6-р зурагт үзүүлэв.

Түгээх сүлжээний цахилгаан тоноглол дээр гарч буй гэмтэл нь тухайн хамгаалалтын мужид болсон тохиолдолд реле хамгаалалт найдвартай ажиллах ёстой. Гэвч түгээх сүлжээ нь нарийн нийлмэл бүтэцтэй тул түүн дээр ажиллаж буй реле хамгаалалт зарим тохиолдолд тавил, тооцооны алдаанаас болж буруу ажиллах нөхцөл бүрдэж байгаа нь ажиглагдаж байна (ж.нь, шугамын хамгаалалтууд давж тасрах). Харин микропроцессорын элементийн бааз дээр суурилсан хамгаалалтыг өргөн нэвтрүүлж, тавилыг нарийвчлалтай тавьж, хамгаалалт хоорондын хугацааны тавилын нарийвчлал дээшилснээр хамгаалалтын буруу ажиллагаа буурч байна. Больниц, Хөхтолгой фидерийн гаргалгаануудын тасралт өндөр байгаа нь 6 кВ –оос 10 кВ хүчдэлийн түвшинд шилжүүлсэнтэй холбогдуулан 6 кВ ашиглагдаж байсан Ааблу маркийн кабелиуд үзүүрийн муфьтэнд нэвчилт өгч гэмтэл гарах шалтгааны дийлэнх хувийг эзэлж байна. Сум салбарын тасралтын Заг 35 кВ ЦДАШ, Галуут, Хүрээмарал, Баянбулаг ЦДАШ-д 2008 оноос ашиглагдаж байгаа ба агаарын шугам тасарч газардах, жилл дамжуулагч нь дундын баригч буюу чичиргээ намжаагч дээр тасрах, Газардлага их гарснаар тулгуурын арматур тасарч, тулгуур хугарах, тусгаарлагч нэвт цохигдох зэрэг томоохон гэмтлүүд ихээр гарч байна.

ДҮГНЭЛТ

“Баянхонгор-Эрчим хүч” цахилгаан түгээх сүлжээнд 2021–2025 онд гарсан гэмтэл, тасралтын статистик мэдээлэл болон реле хамгаалалтын ашиглалтын байдалд дүн шинжилгээ хийлээ. Судалгааны үр дүнгээс харахад 2025 онд нийт 193 удаагийн тасралт бүртгэгдсэн бөгөөд тасралт ихэвчлэн 3–9 дүгээр сард төвлөрч, байгалийн хүчин зүйл, кабель болон 0.4–35 кВ-ын тоноглолын гэмтэл давамгайлж байна. Мөн “гэмтэл тодорхойгүй” ангиллын тасралт өндөр хувь эзэлж байгаа нь гэмтэл илрүүлэх, оношлох аргачлалыг сайжруулах шаардлагатайг харуулж байна.

SAIDI, SAIFI, CAIDI үзүүлэлтүүдийн харилцан хамаарлаас үзэхэд 2024–2025 онд тасралтыг сэргээх дундаж хугацаа мэдэгдэхүйц буурч, ашиглалтын чанар сайжирсан эерэг хандлага ажиглагдсан боловч тасралтын давтамжийг илэрхийлэх SAIFI өндөр хэвээр байна. Энэ нь реле хамгаалалтын ажиллагаа болон сэргээх үйл явц сайжирсан хэдий ч тасралт үүсэх анхдагч шалтгаанууд бүрэн буураагүй байна.

Реле хамгаалалтын хувьд микропроцессорын элементийн бааз дээр суурилсан хамгаалалтууд нийт хамгаалалтын дийлэнх хувийг эзэлж, ялангуяа SEL болон Recloser төрлийн төхөөрөмжүүд түгээх сүлжээний найдвартай ажиллагаанд чухал нөлөө үзүүлж байна. Эдгээр хамгаалалтыг нэвтрүүлснээр хамгаалалтын тавилын нарийвчлал, сонгох чадвар сайжирч, буруу ажиллагаа буурсан нь CAIDI болон SAIDI үзүүлэлтүүдийн бууралтаар нотлогдож байна. Харин тус түгээх сүлжээнд ашиглагдаж байгаа цахилгаан механик релений ашиглалтын хугацаа дуусаж байгаа тул цаашид үе шаттай шинэчлэх шаардлагатай байна.

Цаашдын үйл ажиллагаанд тасралтын давтамжийг бууруулахад чиглэсэн урьдчилан сэргийлэх засвар үйлчилгээ, байгалийн хүчин зүйлд тэсвэртэй шугам тоноглолын шинэчлэл, гэмтэл тодорхойлох дижитал шийдлүүдийг нэвтрүүлэх, мөн реле хамгаалалтын стандартчилал, программ хангамжид суурилсан тавил тооцооллыг өргөн ашиглах нь зүйтэй. Эдгээр арга хэмжээ нь түгээх сүлжээний найдвартай ажиллагааг дээшлүүлэх бодит боломжийг бүрдүүлнэ.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Г.Чулуунбаатар, Цахилгаан системийн реле хамгаалалт, Улаанбаатар: ШУТИС хэвлэл, 2016.

[2] Б.Даваасүрэн, Цахилгаан түгээх сүлжээний ашиглалт ба найдвартай ажиллагаа, Улаанбаатар, 2018.

[3] IEEE Power & Energy Society, Protective Relaying and Control, IEEE Press, 2014.

[4] A. Phadke, J. Thorp, Computer Relaying for Power Systems, 2nd ed., Wiley, 2009.

[5] IEC 60255, Measuring relays and protection equipment, International Electrotechnical Commission, 2018.

[6] ABB Group, REX 610 Numerical Protection Relay – Technical Manual, ABB, 2022.

[7] Schweitzer Engineering Laboratories, SEL Protective Relay Instruction Manual, SEL Inc., 2021.

[8] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.

[9] J. Lewis Blackburn, T. Domin, Protective Relaying: Principles and Applications, 4th ed., CRC Press, 2014.

[10] IEC 60947, Low-voltage switchgear and controlgear, International Electrotechnical Commission, 2017.

ХҮЧНИЙ ТРАНСФОРМАТОРЫН ТУСГААРЛАЛТЫН НАСЖИЛТЫН УРЬДЧИЛСАН ТААМАГЛАЛ БА АЛСЫН ЗАЙН ХЯНАЛТЫН СИСТЕМ

Одгэрэлийн БОЛД[1], Бямбасүрэнгийн БАТ-ЭРДЭНЭ[2]

[1.2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг:boldodgerel0@gmail.com[1]

Хураангуй: **Эрчим хүчний трансформаторын тусгаарлалтын насжилтыг урьдчилан таамаглах нь эрчим хүчний системийн найдвартай ажиллагааг хангах, урьдчилан сэргийлэх засварын зардлыг бууруулах чухал асуудал юм. Тусгаарлагч целлюлозын цаас дулаан, чийг, исэлдлийн нөлөөгөөр задардаг бөгөөд трансформаторын үлдэгдэл ашиглалтын хугацааг урьдчилан тооцоолох практик хэрэгцээ нийтлэг тулгамдсан байдаг. Энэхүү судалгааны ажлын үндсэн зорилго нь Монголын нөхцөлд ажиллаж буй 35 кВ-ийн 4000 кВА-ийн ABB SB-4000/35 загварын хоёр ороомогтой хуваарилалтын трансформаторын тусгаарлалтын насжилтыг IEC 60076-7:2018 олон улсын стандартын дулааны загвар ашиглан тооцоолж, ESP32 микроконтроллёр болон 4G үүрэн холбоонд суурилсан алсын зайн хяналтын системийн загварыг боловсруулахад оршино. Аргазүйн хувьд 31 хоногийн бодит хэмжилтийн өгөгдлийг ашиглан IEC 60076-7 стандартын динамик дулааны загварын дагуу ачааллын хүчин зүйл, дээд тосны температур, ороомгийн хамгийн өндөр цэгийн температур, насжилтын хурдатгалын хүчин зүйл болон ашиглалтын насжилтын алдагдлыг цагийн алхам бүрд тооцоолсон болно. Трансформаторын нэрлэсэн чадал, гүйдэл, дулааны гарцын параметрүүдийг техникийн өгөгдлөөс гаргаж авсан бол KNAN хөргөлтийн горимд зориулсан загварын коэффициентуудыг олон улсын стандартын хүснэгтээс авсан болно. Үр дүнгээс үзэхэд трансформатор дундаж 36.9 хувийн ачааллаар ажилласан бөгөөд ороомгийн хамгийн өндөр цэгийн температурын дээд утга 45.8 хэм байсан нь IEC стандартын 98 хэмийн лавлах температураас хамаагүй доогуур байна. Нийт насжилтын алдагдал нэрлэсэн насжилтын 0.000164 хувийг эзлэн трансформатор нэрлэсэн ажиллагааны горимтой харьцуулахад 2540 дахин удаан насжиж байгааг тогтоолоо. Дүгнэхэд трансформатор одоогийн ачааллын нөхцөлд тусгаарлалтын насжилт маш аажуу явагдаж байгаа тул ашиглалтад аюулгүй байна. Судалгааны шинэлэг тал нь бодит өгөгдөлд үндэслэн IEC 60076-7 стандартыг Монголын нөхцөлд хэрэглэж тусгаарлалтын нөхцөл байдлыг үнэлсэн ба MQTT протоколоор бодит цагийн мэдээлэл дамжуулах 4G үүрэн холбоост алсын зайн хяналтын системийн бүтцийг боловсруулсанд оршино. Практикийн ач холбогдол нь трансформаторын гэнэтийн эвдрэлийг урьдчилан илрүүлэн засвар үйлчилгээний зардлыг бууруулахад тусална. Цаашид синтетик эстер тосны дулааны шинж чанарт тохирсон насжилтын тооцооны загвар боловсруулах, машин сургах аргачлалыг нэвтрүүлэх боломжтой.**

Түлхүүр үг: насжилтын загвар, ороомгийн температур, 4G modem, MQTT, IoT (Зүйлсийн интернэт), ухаалаг хяналт

I. УДИРТГАЛ

Эрчим хүчний трансформатор нь өндөр хүчдэлийн дамжуулах болон түгээх системийн чухал бүрэлдэхүүн хэсэг юм. Трансформаторын ашиглалтын насыг голчлон тодорхойлдог хэсэг нь ороомгийн целлюлозын тусгаарлагч цаас бөгөөд энэ нь халуун, чийг, исэлдлийн нөлөөгөөр задарч, механик болон цахилгаан шинж чанараа алддаг [1]. Тусгаарлагчийн насжилт эргэн буцашгүй процесс тул түүний хурдыг урьдчилан тааварлах нь ашиглалтын аюулгүй байдлыг хангахад шийдвэрлэх үүрэг гүйцэтгэдэг [2].

IEC 60076-7:2018 стандарт нь трансформаторын ороомгийн хамгийн өндөр цэгийн температур (HST) болон тусгаарлалтын насжилтыг тооцоолох математик загварыг тодорхойлсон олон улсын хүлээн зөвшөөрөгдсөн норм юм. Энэхүү стандарт нь динамик дулааны загвар ашиглан ачааллын хэлбэлзэл болон орчны температурын нөлөөллийг тусгасан тооцоолол хийх боломжийг олгодог [3].

Үүрэн холбоост технологийн хурдацтай хөгжлөөр 4G/LTE сүлжээгээр дамжуулан трансформаторын бодит цагийн хяналтыг хэрэгжүүлэх боломж өргөжиж байна [4]. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) протокол нь publish-subscribe загвар дээр суурилсан, хялбар, TCP/IP дэд бүтцэд ажилладаг IoT-д зориулсан стандарт мессежний протокол бөгөөд гурван QoS (Quality of Service) түвшнийг хангадаг [5]. Олон төрлийн IoT протоколуудтай харьцуулахад MQTT нь бага зурвасын өргөн шаардлага болон нөөц хязгаарлагдмал төхөөрөмжид хамгийн тохиромжтой гэж тогтоогдсон [6]. ESP32 зэрэг хямд өртөгтэй IoT микроконтроллёр нь энерги хэмжилт, температур мэдрэгчийн дохиог боловсруулан MQTT протоколоор серверт илгээх чадавхтай бөгөөд 240 MHz давтамжтай хос цөмт процессор, Wi-Fi болон Bluetooth холболт бүхий нэгдмэл системийн чипийн шийдлийг санал болгодог [7].

Энэхүү судалгааны зорилго нь Монголын нөхцөлд ажиллаж буй ABB SB-4000/35 загварын 35/6.3 кВ трансформаторын бодит ажиллагааны өгөгдлийг ашиглан IEC 60076-7 стандартын дагуу насжилтын тооцоо хийж, үүрэн холбоост алсын зайн хяналтын системийн загварыг боловсруулахад оршино.

II. ТРАНСФОРМАТОРЫН ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

Судалгааны объект нь ABB компанийн үйлдвэрлэсэн SB-4000/35 загварын 3 фазын трансформатор бөгөөд GB1094/GB6451 стандартын дагуу үйлдвэрлэгдсэн байна. Трансформатор нь 35 кВ-ийн өндөр хүчдэл, 6.3 кВ-ийн нам хүчдэлтэй, Dyn11 холболтын схемтэй, KNAN хөргөлтийн

горимтой, Midel Oil синтетик эстер тостой байна. Хүснэгт 1-д трансформаторын техникийн үзүүлэлт болон параметрүүдийг нэгтгэн үзүүлэв.

ABB SB-4000/35 ТРАНСФОРМАТОРЫН ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

Параметр	Утга	Нэгж
Үйлдвэрлэгч/Загвар	ABB / SB-4000/35	—
Нэрлэсэн чадал	4000	kVA
HV Өндөр талын хүчдэл	35 ±2×2.5%	kV
LV Нам талын хүчдэл	6.3	kV
HV нэрлэсэн гүйдэл	66.0	A
LV нэрлэсэн гүйдэл	366.6	A
Хөргөлтийн горим	KNAN	—
Тосны темп. өсөлт Δθ_or	60	K
Ороомгийн темп. өсөлт	65	K
Хоосон явалтын алдагдал	4.4038	kW
Ачааллын алдагдал	31.525	kW
Тосны төрөл	Midel Oil (синт. эстер)	—
Үйлдвэрлэсэн он	2021	—

Трансформаторын алдагдлын харьцаа R = Pk/P0 = 31.525/4.4038 = 7.159 байгаа нь KNAN горимтой трансформаторт ердийн утга юм. Nameplate дээр Δθ_or = 60 K, ороомгийн нийт температурын өсөлт 65 K байгаа тул Δθ_hr = 5 K болно. Гэвч IEC 60076-7 Table 4-т KNAN горимд зориулсан өгөгдмөл Δθ_hr = 23 K-ийг ашигласан болно [11].

III. IEC 60076-7 ТООЦООНЫ ПАРАМЕТРҮҮД

3.1 IEC 60076-7 Стандартын загвар

IEC 60076-7:2018 стандарт нь трансформаторын HST болон тусгаарлалтын насжилтыг тооцоолох динамик дулааны загварыг тодорхойлдог [8][11]. Тооцоог дараах алхмаар гүйцэтгэнэ:

Ачааллын хүчин зүйл:

$$K = I / I_rated \quad \ldots(1)$$

Тогтвортой дээд тосны температурын өсөлт:

$$\Delta\theta_o,ss = \Delta\theta_or \cdot [(1 + R \cdot K^2)/(1 + R)]^x \quad \ldots(2)$$

Дээд тосны динамик температур:

$$\theta_o(t) = \theta_o(t - \Delta t) + \alpha_o \cdot [\theta_amb + \Delta\theta_o,ss - \theta_o(t - \Delta t)] \quad \ldots(3)$$

$$\alpha_o = 1 - exp(-\Delta t / (K_{11} \cdot \tau_o)) \quad \ldots(4)$$

а) Ороомгийн хамгийн өндөр цэгийн температур (HST):

$$\theta_h(t) = \theta_o(t) + \Delta\theta_h(t) \quad \ldots(5)$$

$$\Delta\theta_h(t) = \Delta\theta_h(t - \Delta t) + \alpha_h \cdot [k21 \cdot \Delta\theta_hr \cdot K^y - \Delta\theta_h(t - \Delta t)] \quad \ldots(6)$$

$$\alpha_h = 1 - exp(-\Delta t / (K_{22} \cdot \tau_w)) \quad \ldots(7)$$

Насжилтын хурдатгал:

$$V = exp[15000/371 - 15000/(\theta_h + 273)] \quad \ldots(8)$$

Насжилтын алдагдал:

$$LOL = \Sigma(V_n \cdot \Delta t_n) \quad \ldots(9)$$

3.2 Тооцоонд ашигласан параметрүүд

Хүснэгт 2-т IEC 60076-7 тооцоонд ашигласан параметрүүдийг үзүүлэв. KNAN горимын цагийн тогтмол болон экспонент утгуудыг IEC 60076-7 Хүснэгт 4-өөс авсан болно [11].

IEC 60076-7 ТООЦООНЫ ПАРАМЕТРҮҮД

2-Р ХҮСНЭГТ

IEC 60076-7 Параметр	Утга	Эх сурвалж
Нэрлэсэн гүйдэл I_rated	366.6 A	Nameplate (LV)
Тосны темп. өсөлт Δθ_or	60 K	Nameplate
Ороомог-тосны зөрүү Δθ_hr	23 K	IEC Table 4 KNAN
Тосны цагийн тогтмол τ_o	3.0 цаг	IEC Table 4 KNAN
Ороомгийн цагийн тогтмол τ_w	7 мин	IEC стандарт
Алдагдлын харьцаа R = Pk/P0	7.159	31.525/4.4038
Ороомгийн тогтвортой температурын хүчин зүйл k21	1.0	IEC Table 4 (KNAN)
Тосны экспонент x	0.8	IEC Table 4
Ороомгийн экспонент y	1.3	IEC Table 4
Лавлах температур θ_ref	98 °C	IEC (ахисан бус)

IV. ҮҮРЭН ХОЛБООСТ АЛСЫН ЗАЙН ХЯНАЛТЫН СИСТЕМ

Алсын зайн хяналтын системийн архитектур нь дөрвөн үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгээс тогтоно:

(1) трансформаторын мэдрэгч — CT (гүйдлийн трансформатор) болон температур мэдрэгч,

(2) ESP32 микроконтроллёр — тооцоолол хийх, удирдлагын функц гүйцэтгэх хэсэг,

(3) 4G/LTE холбооны модем — утасгүй дамжуулалт,

(4) клауд серверийн хяналтын платформ — MQTT брокер болон дашбоард.

ESP32 нь dual-core 240 MHz Xtensa LX6 процессортой, 520 KB шуурхай санах ойтой, мэдээлэл дамжуулах Wi-Fi болон Bluetooth модультай бөгөөд IoT хэмжилтийн систем бүтээхэд өргөн хэрэглэгддэг [7].

4.1 Мэдрэгчийн систем

Трансформаторын хяналтад дараах хэмжилтийн хэрэгслүүдийг ашигласан: CT (гүйдлийн

трансформатор) мэдрэгч — LR-6.3 загвар, 400/1A харьцаа, 0.5 нарийвчлал, 10 ВА чадалтай бөгөөд LV талын 3 фазын гүйдлийг хэмждэг; OTI (Тосны температурын заагч); WTI (Ороомгийн температурын заагч); SCADA систем нь 6 цагийн алхамтайгаар өгөгдлийг бүртгэдэг.

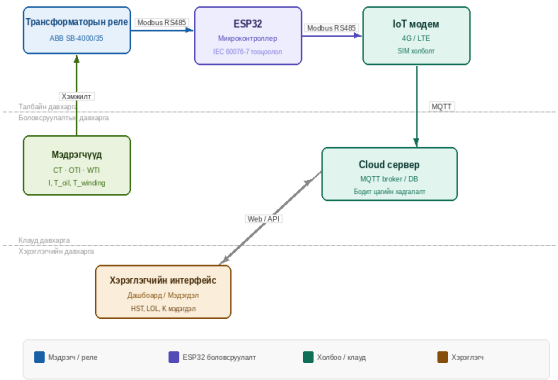
4.2 ESP32 болон 4G/LTE систем

ESP32 микроконтроллёр нь мэдрэгчийн дохиог боловсруулан IEC 60076-7 тооцоолол хийх, MODBUS RTU/TCP протоколоор SCADA системтэй холбогдох, MQTT протоколоор клауд серверт өгөгдөл дамжуулах үүргийг гүйцэтгэнэ [7][10]. MQTT протоколын publish-subscribe загварт MQTT брокер нь Publisher (ESP32 мэдрэгч) болон Subscriber (хяналтын клиент) хооронд өгөгдөл дамжуулах үүрэг гүйцэтгэдэг [5]. MQTT нь HTTP-тэй харьцуулахад пакетийн толгой хэсэг хамгийн багадаа 2 байт бөгөөд зурвасын өргөн хязгаарлагдмал 4G/LTE холболтод давуу тал үзүүлдэг [6]. QoS-2 (Quality of Service) түвшин нь мэдээлэл давхардалгүйгээр яг нэг удаа хүрч очихыг баталгаажуулах тул трансформаторын хяналтын чухал параметрүүдийг дамжуулахад ашиглана [4][9].

4.3 Үүлэн технологид суурилсан хяналтын платформ

Үүлэн серверт хадгалагдсан бодит цагийн өгөгдлийг ашиглан IEC 60076-7 загварын дагуу HST болон LOL (Loss of Life)-ийг тооцоолж хяналтын дашбоардад дүрслэн харуулах боломжтой. HST > 90°C, V > 2.0, K > 0.9 болох тохиолдолд автомат мэдэгдэл илгээнэ.

Доорхи зураг хяналтын системийн техник хангамжийн бүтцийг харуулав. Трансформаторын цахилгаан параметрүүдийг хэмжүүрийн багажаар дамжуулан хүлээж авах боломжтой ба доорхи зураг реле хамгаалалтын төхөөрөмжөөр дамжуулан авсан байна.



Зураг 1. Үүрэн холбоост хяналтын системийн техник хангамжийн бүтэц

V. ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

5.1 Өгөгдлийн шинжилгээ

2025-12-04-нөөс 2026-01-04 хүртэлх 31 хоногийн туршид 6 цагийн алхамтайгаар нийт 125 цэгийн өгөгдлийг ашигласан. LV гүйдлийн дундаж 135.3 А, хамгийн их 150.3 А байсан нь нэрлэсэн гүйдэл 366.6 А-ийн 36.9% юм. Нийт чадлын дундаж S = 1.492 MVA нь нэрлэсэн 4.0 MVA-ийн 37.3%-тай тэнцэнэ.

5.2 Ачааллын хүчин зүйл ба температур

Ачааллын хүчин зүйл K = 0.369 дундаж утгатай, K > 1.0 буюу хэт ачааллын нөхцөл нэг ч тохиолдоогүй. IEC 60076-7 тооцооны дагуу θ_o дундаж 30.0°C, хамгийн их 39.4°C байв. Хэмжигдсэн тосны дундаж температур 21.1°C байгаатай харьцуулбал тооцоолсон утга 8.9°C-ийн зөрүүтэй байгаа нь Midel Oil синтетик эстер тосны дулааны шинж чанарын онцлогтой холбоотой [12].

HST хамгийн дээд утга 45.8°C болсон нь IEC-ийн 98°C лавлах температураас 52.2°C доогуур байна. Судалгааны хугацаанд HST > 98°C гарсан тохиолдол байгаагүй нь тусгаарлалт дулааны нөлөөнд өртөөгүйг баталж байна.

5.3 Насжилтын шинжилгээ

IEC стандартын лавлах температур 98°C байхад манай трансформаторын ороомгийн хамгийн өндөр цэгийн температур дунджаар 36°C орчимд байсан. Температур хэт бага учраас насжилтын хурдатгалын хүчин зүйл V маш бага утгатай гарсан бөгөөд 31 хоногийн нийт насжилтын алдагдал ердөө 0.295 цаг болсон — өөрөөр хэлбэл трансформатор энэ хугацаанд бараг насжаагүйтэй адил байна. Хүснэгт 3, 4-т тооцооны нэгтгэсэн үр дүнг харуулав.

IEC 60076-7 ТООЦООНЫ НЭГТГЭСЭН ҮР ДҮН

3-Р ХҮСНЭГТ

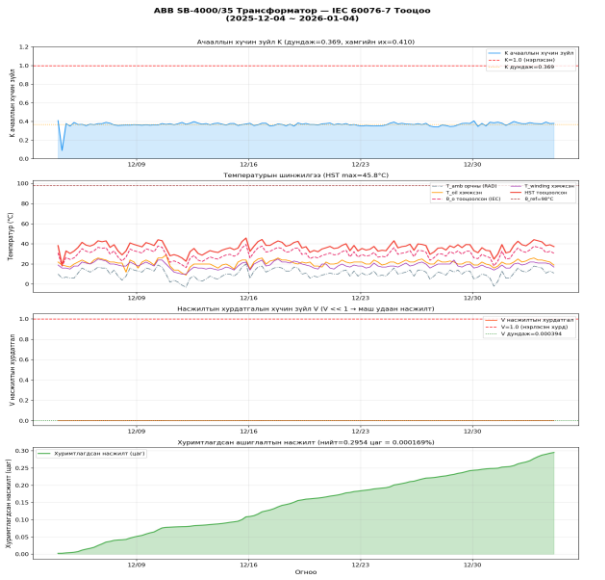
Үзүүлэлт	Дундаж	Хамгийн их
I_avg (A)	135.3	150.3
Ачааллын хүчин зүйл K	0.369	0.410
Бүрэн чадал S (MVA)	1.492	1.649
Орчны темп. T_amb (°C)	10.7	20.0
Тооц. тосны темп θ_o (°C)	30.0	39.4
Хэмжигдсэн тосны температур (°C)	21.1	29.0
HST тооцоолсон (°C)	36.3	45.8
HST > 98°C тохиолдол	—	0
Насжилтын хурдатгал V	0.000394	0.001337
LOL нийт (цаг)	—	0.295
LOL %	—	0.000164%

САРЫН НЭГТГЭСЭН ҮР ДҮН

4-Р ХҮСНЭГТ

Сар	K дунд/их	Amb °C	HST max °C	LOL цаг
2025-12	0.368/0.410	10.5	45.8	0.253
2026-01	0.381/0.401	12.6	44.2	0.043

Нийт	0.369/0.410	10.7	45.8	0.295



Зураг 2. ABB SB-4000/35-ийн IEC 60076-7 тооцооны үр дүн (2025-12 ~ 2026-01)

VI. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Судалгааны үр дүн нь Монголын нөхцөлд ажиллаж буй 35/6.3 кВ трансформаторын тусгаарлалт маш сайн байгааг баталгаажуулж байна. K = 0.369 дундаж ачаалал нь трансформаторын хүчин чадал бүрэн ашиглагдаагүйг харуулж байгаа бөгөөд ирээдүйд ачааллыг 2.7 дахин нэмэгдүүлэх нөөц байна.

Тооцоолсон θ_o болон хэмжигдсэн T_oil-ийн 8.9°C-ийн зөрүүг: (1) Midel Oil синтетик эстер тосны дулааны дамжуулалт эрдэс тосноос өндөр байдаг; (2) IEC 60076-7 нь эрдэс тосны загварт үндэслэсэн бөгөөд синтетик эстер тосонд шууд хэрэглэхэд тодорхой хязгаарлалттай тул насжилтын үр дүнг болгоомжтой тайлбарлах шаардлагатай [12]; (3) OTI мэдрэгчийн байрлалын нөлөөгөөр тайлбарлаж болно.

Үүрэн холбоост хяналтын системийн техник хангамжийн топологи нь таван давхаргаас тогтоно: (1) мэдрэгчийн давхарга — CT (гүйдлийн трансформатор), OTI, WTI; (2) боловсруулалтын давхарга — ESP32 микроконтроллёр; (3) холбооны давхарга — 4G/LTE модем; (4) дамжуулалтын давхарга — MQTT broker; (5) үүлэн давхарга — хяналтын платформ [5]. Мэдрэгчийн өгөгдлийг бодит цагаар дамжуулж, IEC 60076-7 тооцоолол хийн хяналтын дашбоардад дүрслэн харуулах боломжтой. HST > 90°C, V > 2.0, K > 0.9 үед автомат мэдэгдэл илгээх нь урьдчилан сэргийлэх засварт чухал үүрэг гүйцэтгэнэ.

Судалгааны хүрээнд 4G/LTE IoT модемийг MQTT протоколын ажиллагааг туршиж үзсэн бөгөөд хувийн MQTT брокер үүсгэж, модемийг Publisher болгон тохируулан трансформаторын хэмжилтийн өгөгдлийг тодорхой topic-д нийтлэх, publish-subscribe хийх механизмыг гүйцэтгэж байгаа билээ. Энэхүү туршилт нь алсын зайн хяналтын системийн техник хангамж болон программ хангамжийн нэгдэл бөгөөд цаашдын судалгааны ажилд үүлэн холбоост хяналтын системийн хэрэгжүүлэлтийг түлхүү хийхэд бэлтгэл суурийг тавьсан юм.

VII. ДҮГНЭЛТ

ABB SB-4000/35 загварын 35/6.3 кВ трансформаторын 31 хоногийн бодит өгөгдлийг IEC 60076-7:2018-аар боловсруулан дараах үр дүнд хүрсэн болно:

1) Трансформатор K=0.369 дундаж ачааллын хүчин зүйлтэй, хэт ачааллын нөхцөлгүйгээр ажилласан бөгөөд ачааллыг 2.7 дахин нэмэгдүүлэх нөөц байна.

2) HST хамгийн их 45.8°C бөгөөд IEC-ийн 98°C-аас 52.2°C доогуур байсан нь тусгаарлалт дулааны нөлөөнд өртөөгүйг баталж байна.

3) V = 0.000394 дундаж буюу нэрлэсэнтэй харьцуулахад ~2540 дахин удаан насжилт. IEC 60076-7:2018 Table 1-ийн 180,000 цагийн нэрлэсэн насжилттай [11] харьцуулахад LOL = 0.295 цаг (0.000164%) нь тусгаарлалт маш сайн байгааг илтгэнэ.

4) ESP32 болон 4G үүрэн холбоо дээр суурилсан алсын зайн хяналтын систем нь MQTT протоколоор бодит цагийн хяналтыг хэрэгжүүлэх бүрэн боломжтой [5][7].

Цаашдын судалгаанд гурван үндсэн чиглэлийг хөгжүүлэхээр төлөвлөж байна: (1) Midel Oil синтетик эстер тосны дулааны шинж чанарт тохирсон тусгай насжилтын загвар боловсруулах; (2) бодит хэмжилтийн өгөгдөл дээр суурилсан машин сургах аргачлалыг насжилтын урьдчилсан таамаглалд нэвтрүүлэх; (3) ESP32 болон 4G модемд суурилсан hardware системийн бүрэн хэрэгжүүлэлт, туршилт болон олон трансформаторын зэрэгцээ хяналтын платформ хөгжүүлэх.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] T. A. Prevost, T. V. Oommen, "Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part I," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 22, no. 1, pp. 28-35, 2006.

[2] T. V. Oommen, T. A. Prevost, "Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part II," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 22, no. 2, pp. 5-14, 2006.

[3] W. J. McNutt, "Insulation thermal life considerations for transformer loading guides," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 392-401, 1992.

[4] G. Gandhi, D. Adhyaru, "Cellular communication based remote predictive maintenance system for power transformers," Int. J. Electr. Eng. Technol., vol. 6, no. 7, pp. 48-60, 2015.

[5] B. Mishra and A. Kertesz, "The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey," IEEE Access, vol. 8, pp. 201071–201086, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035849.

[6] E. Al-Masri et al., "Investigating Messaging Protocols for the Internet of Things (IoT)," IEEE Access, vol. 8, pp. 94880–94911, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993363.

[7] A. Fanariotis et al., "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices," Sensors, vol. 23, no. 15, p. 6739, 2023, doi: 10.3390/s23156739.

[8] IEEE Std C57.91-1995, "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers," IEEE, New York, 1995.

[9] R. Setiawan, D. Rohendi, A. Rahmat, "IoT-based transformer monitoring system using machine learning for predictive maintenance," Electronics, vol. 12, no. 6, p. 1356, 2023.

[10] MODBUS Organization, "MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3," 2012. [Online]. Available: https://www.modbus.org/specs.php

[11] IEC 60076-7:2018, "Power transformers — Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers," 2nd ed., IEC, Geneva, 2018.

[12] N. Lelekakis, W. Guo, D. Martin, J. Wijaya, D. Susa, "A field study of aging in paper-oil insulation systems," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 28, no. 1, pp. 12-19, 2012.

3-ФАЗЫН ТРАНСФОРМАТОРЫН ХОЛБОЛТЫН БҮЛГИЙГ АШИГЛАН 35, 10, 0.4 КВ-ЫН СҮЛЖЭЭН ДЭХ ГҮЙДЛИЙН ГАРМОНИКИЙГ БУУРУУЛАХ СУДАЛГАА

Дагийцэрэвийн ДОРЖДЭРЭМ[1], Эрдэнэбаатарын ДАШДОНДОВ[2], Хадбаатарын МӨНХСАЙХАН[3], Жаргалсайханы НЯМ[4]

[1.2.3.4]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан хангамжийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: drmdrm351@gmail.com[1], j_nyam@must.edu.mn[4]

Хураангуй: **Хүчний трансформатор нь нэг хувьсах хүчдэлийг ижил давтамжтай өөр хувьсах хүчдэл болгон хувиргахаас гадна, анхдагч талын шугамын хүчдэл болон хоёрдогч талын шугамын хүчдэлүүдийн хооронд фазын шилжилт үүсгэдэг цахилгаан статик төхөөрөмж юм. Трансформаторын энэ онцлогийг ашиглан цахилгаан дамжуулах, түгээх компаниудад тулгарч буй гүйдлийн дээд гармоникийн асуудлыг хямд, үр ашигтайгаар шийдвэрлэх боломжтой. Ялангуяа хэрэглэгчийн гүйдлийн гармоник нь тухайн хэрэглэгчээс шууд хамаардаг тул гүйдлийн гармоникийг бууруулах оновчтой аргыг боловсруулахад хүндрэл учруулдаг. Энэхүү өгүүллээр бид янз бүрийн холболтын бүлэгтэй гурван фазын трансформатор ашиглан хэрэглэгчийн гүйдлийн дээд гармоникийг хэрхэн бууруулах талаар авч үзэн судалсан. Судалгааны үр дүнг туршилтаар баталж харуулсан бөгөөд янз бүрийн холболтын бүлэгтэй трансформаторыг цахилгаан хангамжийн системд зөв зохистой ашигласнаар цахилгаан эрчим хүчний чанарыг сайжруулж боломжтой юм. Туршилтын үр дүнгээс үзэхэд 5 болон 7-р гармоникоор баялаг хэрэглэгчийн гүйдлийн гармоникийг бууруулахын тулд 11 болон 1-р бүлгийн трансформаторыг 0-р бүлгийн трансформатор хамт ашиглах нь зүйтэй.**

Түлхүүр үг: Гурван фазын трансформатор, холболтын бүлэг, гүйдлийн гармоник, фазын шилжилт

I. УДИРТГАЛ

Эрчим хүчний системийн хэвийн ажиллагаанд хүчдэл болон гүйдэл нь синуслэг хэлбэртэй байх ёстой. Гэвч орчин үеийн цахилгаан хэрэглэгчдийн бүтэц, ажиллагааны онцлогоос шалтгаалан системд дээд гармоник үүсэх нь түгээмэл болсон. Дээд гармоникийн нөлөөгөөр гүйдэл болон хүчдэл нь синуслэг хэлбэрээ алдаж гажилт үүсгэдэг бөгөөд энэ нь цахилгаан хангамжийн системийн ажиллагаанд олон төрлийн сөрөг нөлөө үзүүлдэг. Ялангуяа эрчим хүчийг дамжуулах, түгээх явцад нэмэлт алдагдал бий болж, системийн үр ашиг буурах нөхцөл бүрддэг [1].

Гүйдлийн гармоник их хэмжээгээр үүсэх үед кабель дамжуулагч болон шугамын элементүүдийн идэвхтэй эсэргүүцэл нэмэгдэж, нэмэлт дулааны алдагдал бий болдог. Үүний үр дүнд кабель, трансформатор, цахилгаан хөдөлгүүр зэрэг төхөөрөмжүүд хэт халалтад орж, ашиглалтын хугацаа богиносох эрсдэлтэй. Мөн хамгаалах төхөөрөмжүүд буруу ажиллах, автомат таслуур болон хамгаалалтын реле үндэслэлгүй тасрах, хэмжилтийн болон удирдлагын нарийн мэдрэмтгий төхөөрөмжүүдийн ажиллагаанд доголдол үүсэх зэрэг сөрөг үр дагавар ажиглагддаг [2]. Иймд эрчим хүчний систем дэх гармоникийн нөлөөг бууруулах асуудал нь цахилгаан хангамжийн чанар, найдвартай ажиллагааг хангах чухал хүчин зүйлсийн нэг юм. Хэрэв эрчим хүчний систем дэх гүйдэл болон хүчдэлийн гармоникийг зохистой аргачлалаар бууруулж чадвал цахилгаан эрчим хүчний алдагдлыг тодорхой хэмжээгээр бууруулах, улмаар системийн нийт үр ашгийг дээшлүүлэх боломжтой [3]. Ялангуяа эрчим хүчний нөөц хязгаарлагдмал, чадлын дутагдал байнга тулгардаг Монгол Улсын нөхцөлд гармоникийг бууруулах замаар тодорхой хэмжээний эрчим хүчний хэмнэлт бий болгож, системийн найдвартай ажиллагааг сайжруулахад чухал ач холбогдолтой юм.

Цахилгаан хангамжийн системд үүссэн гармоникийг бууруулахын тулд практикт хэд хэдэн арга өргөн хэрэглэгддэг. Үүнд пассив болон актив шүүлтүүр суурилуулах, шугамын реактор ашиглах, фазын шилжилт үүсгэх зэрэг аргууд багтдаг. Пассив шүүлтүүрүүд нь тодорхой давтамжид тохируулан зохион бүтээгддэг бөгөөд тухайн давтамжид харгалзах гармоникийг бууруулахад үр дүнтэй байдаг. Харин актив шүүлтүүрүүд нь ачааллын үүсгэж буй гармоникийг бодит хугацаанд тодорхойлон, эсрэг фаз тай компенсатор гүйдэл үүсгэх замаар олон төрлийн гармоникийг бууруулах боломжтой. Мөн фазын шилжилттэй трансформатор ашиглах зэрэг аргуудыг практикт өргөн ашигладаг [4].

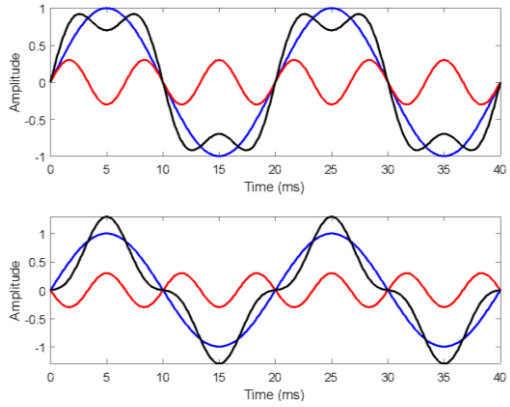
Трансформатор нь зөвхөн хүчдэлийг өсгөж бууруулах үүрэгтэй төхөөрөмж биш бөгөөд түүний ороомгийн холболтын бүлгээс хамааран анхдагч болон хоёрдогч хүчдэлүүдийн хооронд тодорхой фазын шилжилт үүсгэдэг онцлогтой [5]. Янз бүрийн холболтын бүлэг бүхий трансформаторуудыг ашигласнаар фазын тодорхой шилжилт бий болгож, цахилгаан хангамжийн системд үүсэх гүйдлийн гармоникийг бууруулах боломжтой байдаг. Иймд энэхүү өгүүлэлд янз бүрийн холболтын бүлэг бүхий трансформаторуудын хоёрдогч хүчдэлийн фазын шилжилтийн онцлогийг ашиглан цахилгаан хангамжийн систем дэх гүйдлийн гармоникийг бууруулах боломжийг судалсан болно. Судалгаанд онолын үндэслэл болон туршилтын аргуудыг ашиглаж, гармоник бууруулах үр дүнг харьцуулан үнэлэв.

Өгүүллийн бүтэц дараах байдалтай. 2-р хэсэгт эрчим хүчний систем дэх гармоникийн үндсэн ойлголт болон түүний үүсэх шалтгааны талаар товч

авч үзнэ. 3-р хэсэгт трансформаторын холболтын бүлгийн үндсэн ойлголт болон фазын шилжилтийн онцлогийг тайлбарлана. 4-р хэсэгт трансформаторын хоёрдогч хүчдэлийн фазын шилжилтийг ашиглан гүйдлийн гармоникийг бууруулах боломжийг судалж, аргачлалыг танилцуулна. 5-р хэсэгт туршилтын үр дүнг харуулж, судалгааны дүгнэлтийг гаргасан болно.

II. ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ СИСТЕМ ДЭХ ГАРМОНИКИЙН ТУХАЙ

Эрчим хүчний систем дэх цахилгаан тоног төхөөрөмжүүд 50Гц давтамжтай хувьсах хүчдэлд ажиллахаар зохион бүтээгддэг.

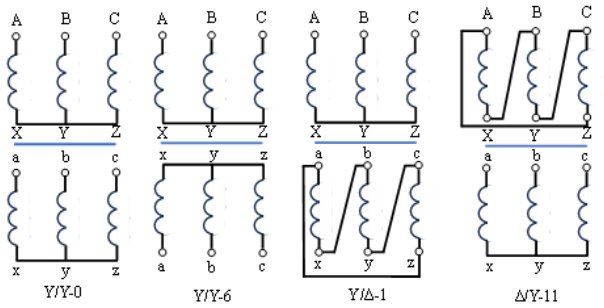


1-р зураг. Цэвэр синуслэг ба гажсан гүйдэл, хүчдэл

Зарим тохиолдолд цахилгаан тоног төхөөрөмжөөс болон хэрэглэгчээс үүдэн гүйдэл, хүчдэл нь синуслэг байдлаа алдаж гаждаг. 1-р зурагт гармоник агуулсан гажсан гүйдэл болон түүний гармоникуудыг үзүүлэв. Дэд гармоник гэх ойлголт нь энгийнээр тайлбарлав үндсэн давтамжаас олон дахин давтамжтай долгионыг хэлнэ. Жишээлбэл, үндсэн давтамж 50 Гц бол 3-р гармоник нь үндсэн давтамжаас 3 дахин их буюу 150 Гц, 5-р гармоник нь 5 дахин их буюу 250 Гц давтамжтай долгион байна. Үүний үр дүнд үндсэн давтамжтай гүйдэл хүчдэл нь түүний нөлөөгөөр синуслэг хэлбэрээ алдаж гаждаг. Гүйдлийн дэд гармоникийн нөлөөгөөр дамжуулагчууд хэт ачаалагдах болон халах, цахилгаан хөдөлгүүр болон хүчний трансформаторууд хэт халах, чадлын коэффициент багасах, компенсацилах төхөөрөмжийн багтаамжийн элементүүд хэт ачаалагдах, хамгаалалтын аппаратууд гэмтэлгүй үед ажиллах, зэрэг олон асуудлууд цахилгаан хангамжийн системд бий болдог.

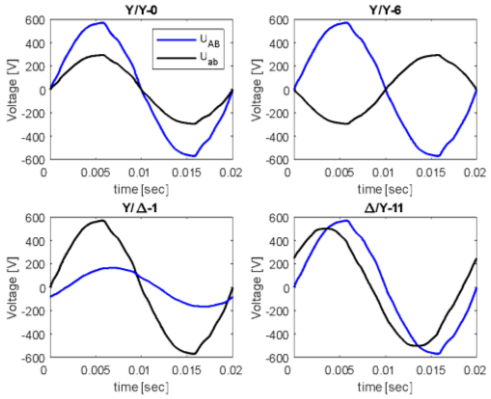
III. ТРАНСФОРМАТОРЫН ХОЛБОЛТЫН БҮЛЭГ

3-р хэсэгт бид 3-фазын трансформаторын холболтын бүлгийн талаар хэд хэдэн жишээн дээр ойлгомжтой авч үзье. Трансформаторын тодорхойлолтыг эргэн санавал “трансформатор гэдэг нь хувьсах хүчдэлийн давтамжийг нь өөрчлөхгүйгээр нэг хувьсах хүчдэлийг өөр нэг хувьсах хүчдэлд хувиргадаг цахилгаан статик төхөөрөмжийг трансформатор гэнэ” гэсэн байдаг. Гэхдээ трансформатор нь хүчдэлийг өсгөж бууруулахаас гадна трансформаторын хоёрдогч талын шугамын хүчдэлийг фазаар нь шилжүүлдэг төхөөрөмж гэж ойлгож болно. Трансформаторын паспортын өгөгдөл дээр холболтын бүлгийг Y/Y-0, Δ/Y-11 г.м тэмдэглэсэн байдаг. Энд Y/Y-0 гэдэг нь анхдагч тал нь од холболттой, хоёрдогч тал нь мөн адил од холболттой бөгөөд анхдагч болон хоёрдогч талын шугамын хүчдэлүүд нь фазаараа 0^0 буюу давхцах ёстой. Харин Δ/Y-11 гэдэг нь анхдагч тал нь гурвалжин холболттой, хоёрдогч тал нь од холболттой бөгөөд 11 нь бүлгийн дугаарыг заана. Бүлгийн дугаар нь анхдагч талын шугамын хүчдэлийн векторыг жишиг вектор болгон авч түүнээс цагийн зүүний дагуу хэдэн градус (0^0 эсвэл 330^0) байгааг тоолж түүнийг 30^0 (нэгж өнцөг)-т хуваснаар бүлгийн дугаар гарч ирдэг. 3-фазын трансформаторын ороомгуудыг ороосон чиг, эхлэл төгсгөлийн тэмдэглэгээ, болон ороомгийн холболтууд (од, гурвалжин)-аас хамаарч янз бүрийн холболтын бүлгийг гарган авч болдог [6, 7, 8].



2-р зураг. Y/Y-0, Y/Y-6, Y/Δ-1, болон Δ/Y-11 холболтуудын схем

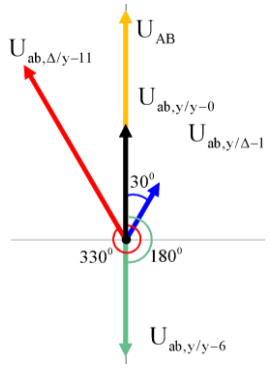
2-р зурагт 3 фазын трансформаторыг Y/Y-0, Y/Y-6, Y/Δ-1, болон Δ/Y-11-аар холбох схемүүд, 3 болон 4-р зургуудад тэдгээрийн анхдагч болон хоёрдогч талын шугамын хүчдэлүүдийн эгшин зуурын утгуудыг болон хүчдэлүүдийн векторуудыг тус тус хэмжин үзүүлэв.



3-р зураг. Анхдагч ба хоёрдогч талын шугамын хүчдэлүүдийн эгшин зуурын утгууд (Туршилтын үр дүн)

Бүх хэмжилтийн үед трансформаторын анхдагч ороомогт ижил хүчдэл өгсөн учир анхдагч талын шугамын хүчдэлийн эгшин зуурын утгыг хар өнгөөр

3-р зурагт үзүүлэв. Y/Y-0 холболттой трансформаторын хувьд анхдагч тал болон хоёрдогч талын шугамын хүчдэлүүд нь фазаараа давхцаж, Y/Y-6 холболттой үед фазаараа 180^0 буюу эсрэг, Y/Δ-1 холболттой үед хоёрдогч талын шугамын хүчдэл нь фазаараа 30^0-аар хоцорсон байна.

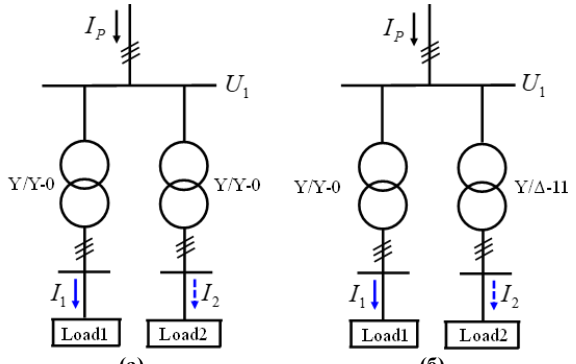


4-р зураг. Анхдагч ба хоёрдогч талын шугамын хүчдэлүүдийн фазын зөрүү

Мөн Δ/Y-11 холболттой трансформаторын хувьд хоёрдогч талын шугамын хүчдэл нь фазаараа 330^0-аар хоцорсон (эсвэл 30^0-аар түрүүлсэн) байгааг харж болно. Эндээс дүгнэн үзэхэд янз бүрийн холболтын бүлэгтэй трансформаторын хоёрдогч ороомгийн хүчдэлүүд нь фазаараа, бүлгийн дугаараас хамаарч, шилжинэ. Трансформаторын хоёрдогч ороомог нь хэрэглэгчтэй холбогддог учир хэрэглэгчийн хүчдэл фазаараа шилжих бөгөөд хэрэглэгчийн гүйдэл нь мөн адил фазын хувьд шилждэг. Трансформаторын энэ онцлогийг ашиглан цахилгаан хангамжийн систем дэх гүйдлийн гармоникийг үр ашигтай бууруулах боломжийн талаар дараа дараагийн хэсгүүдэд үзүүлэх болно.

IV. ФАЗЫН ШИЛЖИЛТ БА ГҮЙДЛИЙН ГАРМОНИКИЙГ БУУРУУЛАХ ТУХАЙ

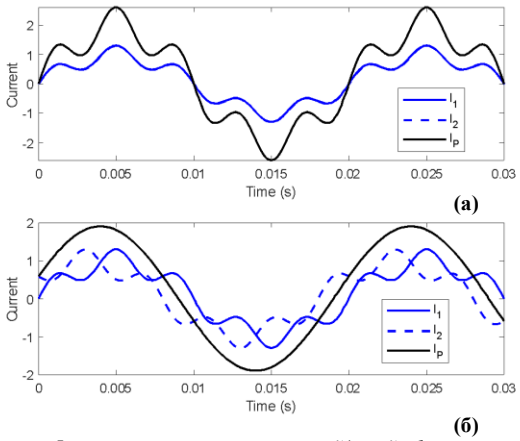
Өмнөх хэсэгт трансформатор нь янз бүрийн холболтын бүлэгтэй бөгөөд хоёрдогч хүчдэл нь анхдагч хүчдэлээс фазаараа холболтын бүлгээс хамаарч шилждэг болох талаар авч үзсэн. Тэгвэл үүнийг ашиглан гүйдлийн гармоникийг хэрхэн бууруулах талаар энэхүү хэсэгт авч үзье.



5-р зураг. Цахилгаан хангамжийн стандарт схем (а), гүйдлийн гармоник бууруулах схем (б)

Гүйдлийн гармоникийг бууруулах гол үндэс нь хоёрдогч талын хүчдэлийн шилжилтийг ашиглаж трансформатор анхдагч ороомгоор урсах гүйдлийг фазаар нь шилжүүлэх буюу гүйдлийн дээд гармоникийн гүйдлийг фазаар 180^0-аар зөрүүлж гүйдэл дэх гармоникийн хэмжээг устгаж болно [9].

5а-р зурагт үзүүлсэнчлэн 2 тусдаа бүлэг хэрэглэгч, **Load1** ба **Load2**, ижил чадалтай гэж үзье. Хэрэглэгч тус бүрээр ижил 5-р гармоник агуулсан I_1 ба I_2 гүйдлүүд тус тус гүйнэ гэж үзнэ. Энэ схемд ижил холболтын бүлэгтэй трансформатор ашигласан ба анхдагч талын шин дээрх гүйдэл I_P нь эдгээр гүйдлүүдийн нийлбэр юм. Энэхүү гүйдэл шууд нэмэгдэх бөгөөд 5-р гармоникийн гүйдлүүд нь мөн адил шууд нэмэгдэнэ. Үүнийг 6а-р зурагт хялбарчлан үзүүлэв.



6-р зураг. 5-р гармоник агуулсан хоёр гүйдэлийг фазын зөрүүгүй нэмэх үед (а), 5-р гармоник агуулсан хоёр гүйдлийг 30^0 зөрүү үүсгэж нэмэх үед (б)

Гүйдлийн гармоникийг бууруулахын (6б-р зураг) тулд аль нэг хэрэглэгчийн хүчдэлийн 30^0 зөрүүлэх шаардлагтай бөгөөд үүнийг хийхдээ Y/Δ-11 холболттой трансформатораар хоёр дах трансформаторыг сольсноор хэрэглэгчийн хүчдэл болон гүйдэл 30^0-аар шилжинэ. Үүний үр дүнд анхдагч шин дээрх гүйдлийн гармоникийн гажилтыг бууруулна.

Ийм байдлаар 3-р гармоникийн устгахын тулд хоёр трансформатор нь 60^0-аар шилжсэн байх, 5 болон 7-р гармоникийг устгахын тулд 30^0 – аар шилжсэн байх, 11 ба 13-р гармоникийг устгахын тулд 15^0-аар шилжих ёстой.

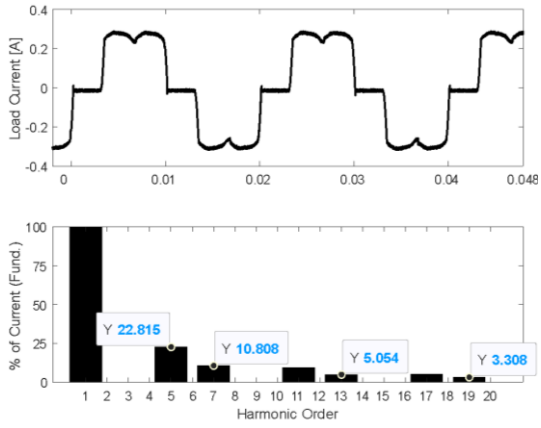
V. ТУРШИЛТЫН БА ХЭМЖИЛТ

Туршилт хийхдээ 5-р зурагт өгөгдсөн схемийг ашигласан бөгөөд хэрэглэгчийн гүйдэл болон шин дээрх гүйдлүүдийг хэмжиж авсан.

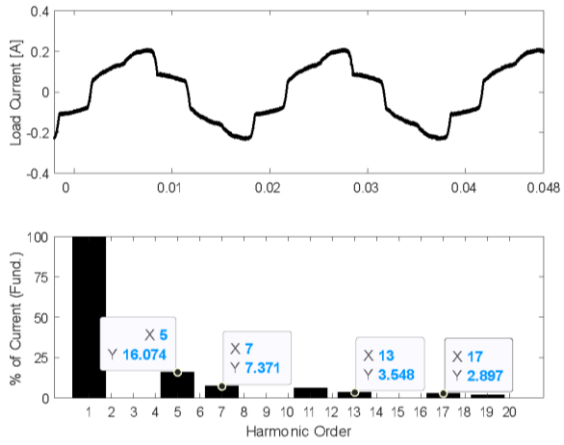
7-р зурагт хэрэглэгчийн (Load1 болон Load2) гүйдлийн эгшин зуурын утгыг үзүүлэв. Туршилтад гурван фазын удирдлагагүй шулуутгагч ашигласан. Эндээс үзэхэд шулуутгагч 3-р гармоникийг үүсгэдэггүй бөгөөд 5-р гармоник 22.815 %, 7-р гармоник 10.808 %, 11-р гармоник 9.084 %, 13-р гармоник 5.054 % байна.

5а-р зургийн өгөгдсөн схемийн анхдагч шин дээрх I_P гүйдлийг эгшин зуурын утгыг 8-р зураг харуулав. Эндээс үзэхэд I_P гүйдэлд 5-р гармоник 16.074%, 7-р гармоник 7.371%, 11-р гармоник

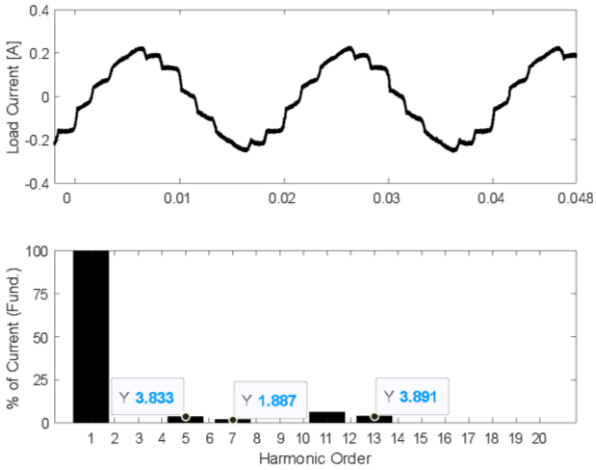
6.216%, 13-р гармоник 3.548% агуулагдсан байна. Гармоникийн хэмжээ бага хэмжээгээр буурсан байна. Энэ трансформатор нь өөрөө гармоникийг бууруулдаг нөлөөтэй учир гүйдлийн гармоникийн хэмжээ буурсан байгаа нь харагдаж байна.



7-р зураг. Хэрэглэгчийн I_1 болон I_2 гүйдлийн эгшин зуурын утгууд



8-р зураг. Хоёр Y/Y-0 трансформатор ашигласан үеийн I_P гүйдлийн хэмжилт (5а-р зурагт үзүүлсэн схем)



9-р зураг. Y/Δ-11 трансформатор ашигласан үеийн I_P гүйдлийн хэмжилт (5б-р зураг үзүүлсэн схем)

5б-р зурагт өгөгдсөн схемийн анхдагч шин дээрх I_P гүйдлийн хэмжилтийг 9-р зурагт харуулав. Эндээс үзэхэд I_P гүйдэлд 5-р гармоник 3.833%, 7-р гармоник 1.887%, 11-р гармоник 6.371%, 13-р гармоник 3.891% агуулагдсан байна. Гармоникийн хэмжээ бага хэмжээгээр буурсан байна. Энэ нь трансформатор өөрөө гармоникийг бууруулдаг нөлөөтэй учир гүйдлийн гармоникийн хэмжээ буурсан байгаа нь харагдаж байна. Туршилтын харьцуулсан үр дүнг 1-р хүснэгтэд дүгнэн үзүүлэв.

I_P ГҮЙДЛИЙН ДЭЭД ГАРМОНИКИЙН ХЭМЖЭЭ

1-Р ХҮСНЭГТ.

Гармоник ийн дугаар	Хэрэглэгч: Load 1 болон Load 2, I1 ба I2	Y/Y-0, Y/Y-0 I_P гүйдэл	Y/Y-0, Y/Δ-11 I_P гүйдэл
5	22.815	16.074	**3.833**
7	10.808	7.371	**1.887**
11	9.084	6.216	**6.371**
13	5.054	3.548	**3.891**
17	5.085	2.897	-
19	3.308	1.415	-

VI. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү өгүүллээр бид янз бүрийн холболтын бүлэгтэй гурван фазын трансформатор ашиглан хэрэглэгчийн гүйдлийн дээд гармоникийг хэрхэн бууруулах талаар авч үзэн судалсан. Судалгааны үр дүнг туршилтаар баталж харуулсан бөгөөд анхдагч шин дээрх гүйдлийн 5-р гармоник 16.074%-иас 3.833% хүртэл, 7-р гармоник 3.371%-иас 1.887% хүртэл, 17 болон 19-р гармоник утга тэг болсон байна. Эндээс дүгнэн үзэхэд хэрэглэгчийн гармоникийг бууруулахын тулд 11 болон 1-р бүлгийн трансформаторыг 0-р бүлгийн трансформатор хамт ашиглах нь зүйтэй.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] A. Taghvaie, T. Warnakulasuriya, D. Kumar, F. Zare, R. Sharma and D. M. Vilathgamuwa, "A Comprehensive Review of Harmonic Issues and Estimation Techniques in Power System Networks Based on Traditional and Artificial Intelligence/Machine Learning," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 31417-3144, 2023

[2] Y. Wang, P. Chen, J. Yong, W. Xu, S. Xu and K. Liu, "A Comprehensive Investigation On the Selection of High-Pass Harmonic Filters," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 5, pp. 4212-4226, Oct. 2022

[3] Ali, Ziad M., Martin Ćalasan, Francisco Jurado, and Shady HE Abdel Aleem. "Complexities of power quality and harmonic-induced overheating in modern power grids studies: Challenges and solutions." *IEEE Access* 12 (2024): 151554-151597.

[4] Daniel, Kamran, Lauri Kütt, Muhammad Naveed Iqbal, Noman Shabbir, Hadi Ashraf Raja, and Muhammad Usman Sardar. "A review of harmonic detection, suppression, aggregation, and estimation techniques." *Applied Sciences* 14, no. 23 (2024): 10966.

[5] M. Calar, E. Durna and K. Kayisli, "3-Phase Multi-Pulse Rectifiers with Different Phase Shifting Transformers and Comparison of Total Harmonic Distortion," *2022 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*, Alanya, Turkey, 2022

[6] Sahdev, S. K. (2017). *Electrical Machines*. Cambridge University Press.

[7] Д.Өлзий-Орших, “Цахилгаан машин, микромашин” сурах бичиг 2024.

[8] Н.Дашням, Д.Энхтүвшин, “Цахилгаан машин” сурах бичиг 2012.

[9] Gabriel Malagon Carvajal, Gabriel Ordonez Plata, Wilson Giraldo Picon and Julio Cesar Chacon Velasco, "Investigation of phase shifting transformers in distribution systems for harmonics mitigation," *2014 Clemson University Power Systems Conference*, Clemson, SC, USA, 2014, pp. 1-5

ТҮГЭЭХ СҮЛЖЭЭНД ХОЛБОГДОХ БОЛОМЖТОЙ НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРҮҮДИЙН ХҮЧДЭЛ БА ЧАДЛЫН НӨЛӨӨЛЛИЙН СУДАЛГАА

Дуламсүрэн АВИРМЭД[1], Лхагвадорж ТҮМЭНЖАРГАЛ[2], Мөнхбаатар БАТТУЛГА[3]

[1.2.3]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: battulga@must.edu.mn[3]

Хураангуй: **Монгол Улсын эрчим хүчний хэрэглээ жил бүр тогтмол өсөж, эрчим хүчний эрэлт нэмэгдэж байгаатай холбогдуулан түгээх сүлжээнд нэмэлт эх үүсвэрүүдийг холбох шаардлага улам бүр нэмэгдсээр байна. Байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөлөл багатай, зардал болон хөрөнгө оруулалтын хувьд хамгийн боломжит эх үүсвэр нь сэргээгдэх эрчим хүч бөгөөд түүний дотор нарны цахилгаан үүсгүүрүүд онцгой ач холбогдолтой юм. Монгол Улсын Засгийн газар болон Эрчим хүчний яамны дэмжлэгийн хүрээнд 2026 онд 20 кВт хүртэлх хүчин чадалтай нарны цахилгаан үүсгүүрийг орон нутгийн түгээх сүлжээнд холбох зөвшөөрлийг олгосон бөгөөд энэ нь хэрэглэгчдэд өөрийн хэрэглээнээс давсан эрчим хүчийг сүлжээнд нийлүүлэх боломжийг нээж байна. Энэхүү судалгааны гол зорилго нь одоо холбогдоогүй нарны цахилгаан үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд холбосноор тухайн фидерт үзүүлэх хүчдэл ба чадлын нөлөөллийг нарийвчлан тодорхойлох, мөн тухайн фидерт хамгийн ихдээ холбож болох нарны цахилгаан үүсгүүрийн хүчин чадлыг тогтоох явдал юм. Судалгаанд симуляц, тооцооллын арга болон олон төрлийн инженерийн шинжилгээний аргачлалыг ашиглан фидерт үүсэх хүчдэл ба чадлын хэлбэлзэл, интеграцийн боломж, системийн тогтвортой байдал зэрэг үзүүлэлтүүдийг нарийвчлан шинжилнэ. Судалгааны үр дүн нь түгээх сүлжээнд нарны цахилгаан үүсгүүрийг үр ашигтай, найдвартай, эдийн засгийн хувьд оновчтой интеграцчлах боломжийг тодорхойлоход чиглэнэ.**

Түлхүүр үг: Нарны цахилгаан үүсгүүр, түгээх сүлжээ, фидер, хүчдэл, чадал.

I. УДИРТГАЛ

Цахилгаан эрчим хүчний түгээх сүлжээ нь үйлдвэрлэл, үйлчилгээ, хүн амын өдөр тутмын хэрэглээний үндсэн дэд бүтэц бөгөөд түүний найдвартай ажиллагаа нь бүс нутгийн нийгэм, эдийн засгийн хөгжилтэй шууд уялдаатай байдаг [1], [2]. Монгол Улсын Эрчим хүчний системийн суурилагдсан хүчин чадал ойролцоогоор 1800 МВт бөгөөд үүнээс 270 МВт буюу 15% нь сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрээс бүрддэг [3], [4].

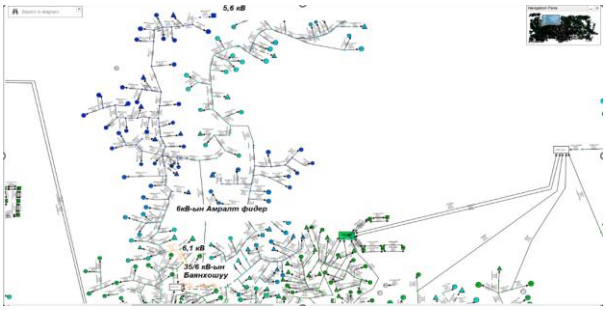
Монгол орны газар нутаг нь эх газрын уур амьсгалын онцлогтой, жилийн дунджаар 300 гаруй өдөр цэлмэг, салхитай байдаг нь сэргээгдэх эрчим хүч, тэр дундаа нарны болон салхины эрчим хүчний хөгжилд бүрэн боломжийг олгодог [5], [6]. Гэвч эдгээр эх үүсвэрүүд нь цаг агаарын болон орчны нөхцөлөөс хамааран бүрэн хүчин чадлаараа ажиллах боломжгүй бөгөөд өсөн нэмэгдэж буй хэрэглээтэй нийцүүлэхэд тодорхой хүндрэл үүсгэдэг [7]. Иймд түгээх сүлжээнд 20 кВт хүртэлх нарны цахилгаан үүсгүүрийг холбох нь хэрэглэгчдэд системээс хараат бус, өөрийн үйлдвэрлэсэн эрчим хүчийг хэрэглэх боломжийг олгож, түгээх сүлжээнд эерэг нөлөө үзүүлдэг [8], [9].

“Улаанбаатар цахилгаан түгээх сүлжээ” ТӨХК нь нийслэлийн 8 дүүрэг, Төв аймгийн 16 сумын иргэдэд 0.4–35 кВ-ын хүчдэлийн түвшний цахилгаан эрчим хүчийг түгээж хангах үндсэн үүрэгтэй бөгөөд Монгол Улсын төвийн бүсийн эрчим хүчний сүлжээний 50 орчим хувийн түгээлт, борлуулалтыг гүйцэтгэдэг [10], [11]. Судалгааны хүрээнд тус компанийн эзэмшлийн 35/6 кВ Баянхошуу дэд станцаас 6 кВ Амралт фидерт тооцоолол, дүн шинжилгээ хийгдсэн.

Энэхүү судалгааны гол зорилго нь Монгол улсын Засгийн газар болон Эрчим хүчний яамны сэргээгдэх эрчим хүчийг дэмжих бодлогын хүрээнд 20 кВт хүртэлх нарны цахилгаан үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд холбосон үед үүсэх ачааллын урсгалын тооцоог гаргах, фидерт үзүүлэх хүчдэл ба чадлын нөлөөллийг тодорхойлох, системийн интеграцийн боломж, техникийн бодлогын шийдлийг санал болгоход чиглэнэ.

II. НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРИЙГ ТҮГЭЭХ СҮЛЖЭЭНД ХОЛБОСОН ҮЕИЙН АЧААЛЛЫН УРСГАЛ, ТОГТСОН ГОРИМЫН ТООЦОО

Бодит хэмжилтийн судалгааг УБЦТС ТӨХК-н эзэмшилд байдаг 35/6 кВ Баянхошуу дэд станцаас 6кВ Амралт фидерт DIgSILENT PowerFactory программаар 2025 оны 11-р сарын станцуудын ачааллын тоон утгыг ашиглан хийж гүйцэтгэсэн. Симуляцыг 6 кВ Амралт фидерт Нарны цахилгаан үүсгэвэр Түгээх сүлжээнд холбож хэд хэдэн сонголтоор чадлыг өөрчилж шаардлагатай мэдээллийг бүртгэн авч дүн шинжилгээ хийв.



1-р зураг. DIgSILENT PowerFactory программаар хийсэн 6 кВ Амралт фидерийн схем

СХД-н 24-р хороо Баруун салаанд байрлах 6 кВ Амралт фидер 9 км урт шугам бөгөөд ААН-79, ГХ-4300 хэрэглэгч, 71ш дэд өртөөг цахилгаан эрчим хүчээр хангадаг.

6кВ Амралт фидерийн техникийн үзүүлэлт:

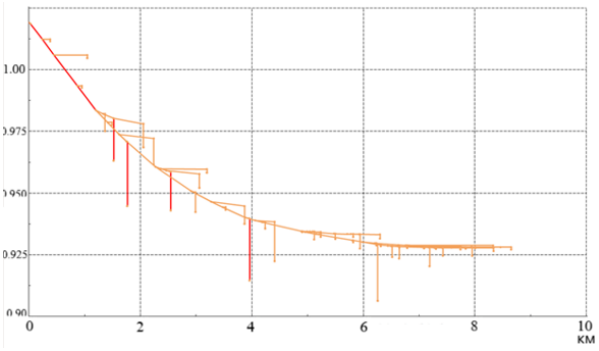
- Гаргалга кабель шугам: ААБлУ 3*120
- Гол шугамын утас: АС-70/11
- Баянхошуу дэд станц дээрх шинийн хүчдэл: 6.1 кВ
- Амралт фидерийн төгсгөлийн цэг дээрх хүчдэл: 5.5 кВ

35/6 кВ-ын Баянхошуу дэд станц дээрх 6 кВ-ын шинийн хүчдэл 6,1 кВ байгаа бөгөөд төгсгөлийн цэг дээрх хүчдэл 5,5 кВ хүртэл буурсан. Хүчдэлийн уналтын хэмжээ 9,8%-тай байгаа нь хэрэглэгч дээрх хүчдэл стандарт хүчдэлийн түвшинд хүрэхгүй байна. Дэд бүтцийн хувьд шугам тоноглол шинэчлэх, шинээр станц барих, ачаалал хөнгөлөх боломжгүй тул Нарны цахилгаан үүсгүүрийг ашиглах нь хамгийн боломжтой сонголт юм.

DIgSILENT PowerFactory программаар хийсэн 6 кВ Амралт фидерийн хэвийн горимын үр дүнг 2-р зураг, 3-р зурагт үзүүлэв.

Фидер	Гүйдэл (кА)	Шугамын актив чадал (кВт)	Шугамын реактив чадал (кВар)	Трансформаторын алдагдал (кВт)	Трансформаторын хоосон ажлын алдагдал (кВт)	Шугамын алдагдал (кВт)
6 кВ Амралт	0.230	2305.8	435.7	21.7	17.5	173

2-р зураг. Амралт фидерийн хүчдэлийн уналтын тооцооны үр дүн



3-р зураг. DIgSILENT PowerFactory программаар хийсэн хүчдэлийн уналтын симуляцын үр дүн

6 кВ-ын Амралт фидерийн ачаалал 230А гаргалга кабель шугам 86,7%, гол шугамын утас 83.6 %-тай ачаалагдаж байна. 6 кВ-ын Амралт фидерийн төгсгөлийн станцад 20кВт Нарны цахилгаан үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд холбож чадлыг ихэсгэх байдлаар үр дүнг үзүүлэв. Эдгээр тооцоонд Cosφ-0.9 гэж сонгож авж тооцоог хийв.

Хувилбар-1. 6 кВ-ын Амралт цахилгаан дамжуулах агаарын шугамын төгсгөлийн АТП-0036, АТП-3686 дэд станцуудын 0,4 кВ талд тус бүр 100 кВт чадалтай Нарны цахилгаан үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд холбосон үеийн дараах ачааллын урсгал, тогтсон горимын тооцоог хийв.

АЧААЛЛЫН УРСГАЛ, ТОГТСОН ГОРИМЫН ТООЦООНЫ ҮР ДҮН (ХУВИЛБАР 1)

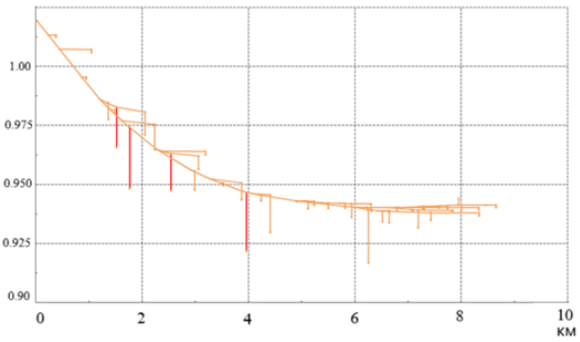
1-Р ХҮСНЭГТ

№	Станц	Хүчдэл өмнөх (кВ)	Хүчдэл дараах (кВ)
1	АТП-036	0.370/5.5	0.380/5.7
2	АТП-3686	0.370/5.5	0.380/5.7

1-р хүснэгтэд 0,4 кВ шиний хүчдэл болон 6 кВ төгсгөлийн цэг дээрх хүчдэл 0,97 хувиар өссөн байгааг харуулж байна. Энэ өсөлт нь трансформаторын ачаалал бага байх тусам Нарны цахилгаан үүсгүүрээс түгээх сүлжээнд нийлүүлэх хүчдэл тэр хэмжээгээр өсөж байгааг харуулж байна. 5-р зурагт Симуляцийн үр дүнд 35/6 кВ-ын Баянхошуу дэд станц дээрх 6 кВ-ын шинийн хүчдэл 6,1 кВ бөгөөд төгсгөлийн цэг дээрх шинийн хүчдэл 5,5-с 5,7 кВ хүртэл өссөн. Хүчдэлийн уналтын хэмжээ 9,8%-с 6,5% хүртэл буурсан боловч хангалттай хэмжээнд хүрэхгүй байна. Цахилгаан дамжуулах шугамын төгсгөлийн хэсэгт хүчдэлийн уналт тогтворжсон үр дүнг харуулж байна.

Фидер	Гүйдэл (кА)	Шугамын актив чадал (кВт)	Шугамын реактив чадал (кВар)	Трансформаторын алдагдал (кВт)	Трансформаторын хоосон ажлын алдагдал (кВт)	Шугамын алдагдал (кВт)
6 кВ Амралт	0.200	2074	419	22	18	142

4-р зураг. 200 кВт чадалтай нарны цахилгаан үүсгүүр холбосон үеийн хүчдэлийн уналтын тооцооны үр дүн



5-р зураг. DIgSILENT PowerFactory программаар хийсэн 200 кВт Нарны цахилгаан үүсгүүр холбосон үеийн хүчдэлийн уналтын симуляцын үр дүн

4-р зурагт 6 кВ-ын Амралт фидерийн ачаалал 200А гаргалга кабель шугам 76,8%, гол шугамын утас 75.3 %-тай ачаалагдаж байгаа нь сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэр залгагдсанаар фидерийн ачаалал 30А буюу гаргалга кабель шугам 9,9%, гол шугамын утас 8.3%-р буусан үзүүлэлттэй байна.

Хувилбар-2. 6 кВ-ын Амралт цахилгаан дамжуулах агаарын шугамын төгсгөлийн АТП-0036, АТП-3686, ХТП-0737, АТП-0051 дэд станцуудын 0,4 кВ талд тус бүр 100 кВт чадалтай Нарны цахилгаан үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд холбосон үеийн дараах ачааллын урсгал, тогтсон горимын тооцоог хийв.

2-р хүснэгтэд 0,4 кВ шиний хүчдэл болон 6 кВ төгсгөлийн цэг дээрх хүчдэл 0,94 хувиар өссөн байна. 7-р зурагт 35/6 кВ-ын Баянхошуу дэд станц дээрх 6 кВ-ын шинийн хүчдэл 6,1 кВ байгаа бөгөөд төгсгөлийн цэг дээрх шинийн хүчдэл 5,5-с 5,8 кВ хүртэл өссөн. Хүчдэлийн уналтын хэмжээ 9,8%-с 4,9% хүртэл буурсан байна.

АЧААЛЛЫН УРСГАЛ, ТОГТСОН ГОРИМЫН ТООЦООНЫ ҮР ДҮН (ХУВИЛБАР 2)

2-Р ХҮСНЭГТ

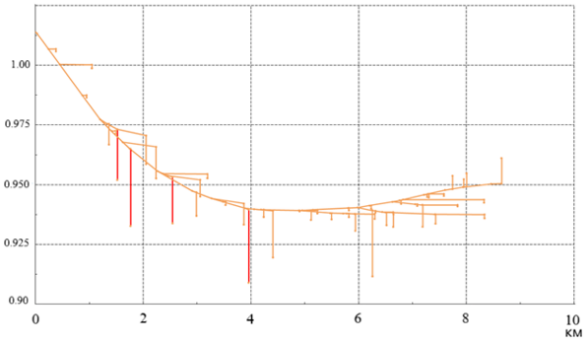
№	Станц	Хүчдэл өмнөх (кВ)	Хүчдэл дараах (кВ)
1	АТП-036	0.370/5.5	0.390/5.8
2	АТП-3686	0.370/5.5	0.390/5.8

3	ХТП-737	0.370/5.5	0.390/5.8
4	АТП-051	0.370/5.5	0.390/5.8

Цахилгаан дамжуулах шугамын төгсгөлийн хэсэгт хүчдэлийн уналт өсөх хандлага ажиглагдаж байна. Иймд нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадлыг зөвхөн түгээх сүлжээний тоног төхөөрөмжийн чадлаар бус, харин сүлжээний горимын тооцооны нарийвчилсан үзүүлэлтүүдэд үндэслэн оновчтой тодорхойлох шаардлагатай. Нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадлыг зохистой сонгож, тархмал эх үүсвэрийг шугамын төгсгөл хэсэгт байрлуулах нь тухайн цэг дэх хүчдэлийн уналтыг бууруулах, зарим тохиолдолд хүчдэлийн түвшнийг нэмэгдүүлэх боломжтойг үр дүн харуулж байна.

Фидер	Гүйдэл (кА)	Шугамын актив чадал (кВт)	Шугамын реактив чадал (кВар)	Трансформаторын алдагдал (кВт)	Трансформаторын хоосон явалтын алдагдал (кВт)	Шугамын алдагдал (кВт)
6 кВ Амралт	0.180	1862.2	412.4	23.1	18.8	123

6-р зураг. 400 кВт нарны цахилгаан үүсгүүр холбосон үеийн хүчдэлийн уналтын тооцооны үр дүн



7-р зураг. DIgSILENT PowerFactory программаар хийсэн 400 кВт Нарны цахилгаан үүсгүүр холбосон үеийн хүчдэлийн уналтын симуляцын үр дүн

6-р зурагт 6 кВ-ын Амралт фидерийн ачаалал 180А гаргалга кабель шугам 69,1%, гол шугамын утас 67.8 %-тай ачаалагдаж байгаа нь сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэр залгагдсанаар фидерийн ачаалал 50А буюу гаргалга кабель шугам 17,6%, гол шугамын утас 15.8%-иар буусан байна.

III. ТҮГЭЭХ СҮЛЖЭЭНД ХОЛБОХ НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРИЙН ЧАДЛЫН СОНГОЛТ

Судалгааны ажлын үр дүнгээс харахад Нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадал өндөр байх тусам системийн хүчдэл өсөж байгаа нь сайн боловч тухайн дэд станцын трансформаторын ачаалал 50%-с дээш ачаалагдсан байвал хүчдэл өсөх боломжгүй болох бөгөөд 2 эх үүсвэрийн ачаалал баланслагдах үед зөвхөн трансформаторын ачаалал багасах бөгөөд хүчдэлд өөрчлөлт үзүүлэхгүй байна.

Иймд түгээх сүлжээнд холбогдож байгаа Нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадал болон тухайн дэд станцын шугам тоноглолын ачааллыг харгалзан үзэх зайлшгүй шаардлага тулгарч байна.

Учир нь Нарны цахилгаан үүсгүүр нь зөвхөн өдрийн цагаар түгээх сүлжээнд эрчим хүч нийлүүлэх бөгөөд шөнийн цагаар үүсгэгч биш хэрэглэгч болох тул энэ ачааллыг тооцохгүй орхиж болохгүй. Тиймээс Трансформаторын ачааллыг 10-50% хүртэл тооцож түгээх сүлжээнд холбох Нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадлын сонголтын харьцуулалтыг доорх зурагт үзүүлэв. Үүнд хамгийн өргөн хэрэглэдэг 100, 160, 250, 400 кВА чадалтай трансформаторт харьцуулалт хийв.

100 КВА ЧАДАЛТАЙ ТРАНСФОРМАТОРТ НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮР ХОЛБОХ ЧАДЛЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ, ХҮЧДЭЛИЙН ӨӨРЧЛӨЛТ

3-Р ХҮСНЭГТ

№	Трансформаторын ачаалал (%)	Нарны цахилгаан үүсгүүр (кВт)	Хүчдэл (кВ)	Хүчдэл өөрчлөлт (кВ)
1	10%	80	0.370/5.5	0.380/5.7
2	20%	70	0.370/5.5	0.378/5.7
3	30%	60	0.370/5.5	0.376/5.6
4	40%	40	0.370/5.5	0.374/5.6
5	50%	30	0.370/5.5	0.372/5.5

160 КВА ЧАДАЛТАЙ ТРАНСФОРМАТОРТ НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮР ХОЛБОХ ЧАДЛЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ, ХҮЧДЭЛИЙН ӨӨРЧЛӨЛТ

4-Р ХҮСНЭГТ

№	Трансформаторын ачаалал (%)	Нарны цахилгаан үүсгүүр (кВт)	Хүчдэл (кВ)	Хүчдэл өөрчлөлт (кВ)
1	10%	140	0.370/5.5	0.380/5.7
2	20%	120	0.370/5.5	0.377/5.7
3	30%	100	0.370/5.5	0.375/5.6
4	40%	80	0.370/5.5	0.373/5.6
5	50%	60	0.370/5.5	0.371/5.5

250 КВА ЧАДАЛТАЙ ТРАНСФОРМАТОРТ НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮР ХОЛБОХ ЧАДЛЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ, ХҮЧДЭЛИЙН ӨӨРЧЛӨЛТ

5-Р ХҮСНЭГТ

№	Трансформаторын ачаалал (%)	Нарны цахилгаан үүсгүүр (кВт)	Хүчдэл (кВ)	Хүчдэл өөрчлөлт (кВ)
1	10%	200	0.370/5.5	0.385/5.7
2	20%	180	0.370/5.5	0.383/5.7
3	30%	150	0.370/5.5	0.378/5.6
4	40%	120	0.370/5.5	0.375/5.6
5	50%	90	0.370/5.5	0.371/5.5

400 КВА ЧАДАЛТАЙ ТРАНСФОРМАТОРТ НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮР ХОЛБОХ ЧАДЛЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ, ХҮЧДЭЛИЙН ӨӨРЧЛӨЛТ

6-Р ХҮСНЭГТ

№	Трансформаторын ачаалал (%)	Нарны цахилгаан үүсгүүр (кВт)	Хүчдэл (кВ)	Хүчдэл өөрчлөлт (кВ)
1	10%	330	0.370/5.5	0.387/5.7
2	20%	300	0.370/5.5	0.384/5.7
3	30%	270	0.370/5.5	0.380/5.6
4	40%	240	0.370/5.5	0.377/5.6
5	50%	210	0.370/5.5	0.374/5.5

IV. ДҮГНЭЛТ

“УБЦТС” ТӨХК-ийн тусгай зөвшөөрлийн бүсэд 2024–2025 оны хугацаанд нийт 60 хэрэглэгчээс 1540 кВА суурилагдсан чадал бүхий сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд холбох техникийн нөхцөлийн хүсэлт ирүүлсэн байна. 2026 оны 3 дугаар сарын 2-ны өдрийн Эрчим хүчний

сайдын А/42 дугаар тушаалаар “Хэрэглэгчийн сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүрээс үйлдвэрлэсэн эрчим хүчийг түгээх сүлжээнд нийлүүлэх журам” батлагдсантай холбоотойгоор цаашид ийм төрлийн хүсэлтийн тоо тогтвортой өсөх хандлагатай байна.

Сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд холбох нь хэрэглэгчийг хоёр талын эх үүсвэрээс тэжээгдэх боломжтой болгож, цахилгаан хангамжийн найдвартай байдлыг нэмэгдүүлэхийн зэрэгцээ байгаль орчинд ээлтэй эрчим хүчний үйлдвэрлэлийг дэмждэг. Үүнээс гадна түгээх сүлжээнд тархмал эх үүсвэр бий болж, системийн оргил ачааллын буурах, шугамын алдагдал багасах, хэрэглэгчийн хүчдэлийн түвшнийг стандартын шаардлагад барих зэрэг техник-эдийн засгийн үр ашиг бий болдог.

DIgSILENT PowerFactory программ ашиглан хийсэн тооцооллын үр дүнгээс үзэхэд нарны цахилгаан үүсгүүрийн холболтын зөвшөөрөгдөх чадлыг тухайн түгээх сүлжээний трансформаторын ачааллын түвшинтэй уялдуулан тодорхойлох нь системийн ажиллагаанд оновчтой шийдэл болох нь тогтоогдсон. Тухайлбал, трансформаторын ачаалал 50%-иас бага үед нарны эх үүсвэрийг холбох нь хэрэглэгч дээрх хүчдэлийг нэмэгдүүлэх нөлөөтэй байгаа бол ачаалал 50%-иас дээш үед хүчдэлийн өсөлт ажиглагдахгүй, системийн горимд нөлөө багатай байна.

Иймд сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд холбох техникийн нөхцөлийг олгохдоо трансформаторын ачааллын түвшнийг зайлшгүй харгалзан үзэх шаардлагатай бөгөөд энэ нь системийн тогтвортой ажиллагаа, хүчдэлийн стандарт түвшнийг хангахад чухал ач холбогдолтой юм.

Цаашид нарны цахилгаан үүсгүүрийг түгээх сүлжээнд өргөн нэвтрүүлж, хөдөө орон нутаг болон жижиг, дунд үйлдвэрлэлд ашиглах шаардлага нэмэгдэж байна. Иймд судалгааны үр дүнд тулгуурлан техникийн бодлого, шаардлагыг боловсронгуй болгож, тархмал эх үүсвэрийг ухаалаг, нэгдсэн системд оновчтой интеграцчилах нь чухал байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] A. R. Bergen, Power Systems Analysis, 2nd ed., New York: Wiley, 2000.

[2] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, 1994.

[3] Монгол улсын Эрчим хүчний сайдын тушаал, “Сэргээгдэх эрчим хүчийг дэмжих бодлого”, Улаанбаатар, 2026.

[4] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, 2nd ed., Chichester: Wiley, 2012.

[5] D. G. Infield, Renewable Energy in Power Systems, Chichester: Wiley, 2006.

[6] IRENA, Renewable Energy Statistics 2025, Abu Dhabi: IRENA, 2025.

[7] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, 5th ed., New York: McGraw-Hill, 2011.

[8] J. Arrillaga et al., Power System Harmonics, 2nd ed., Chichester: Wiley, 2000.

[9] S. B. Kjaer et al., “Overview of photovoltaic systems and grid integration,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1292–1300, 2005.

[10] Улаанбаатар Цахилгаан түгээх сүлжээ ТӨХК, “Сүлжээний үйлчилгээний тайлан 2025”, Улаанбаатар.

[11] K. Uhlen et al., Electrical Power Systems, Hoboken: Wiley, 2015.

[12] L. Gyugyi, High-Power Electronics and Electric Drives, New York: Wiley, 1999

СҮЛЖЭЭНД ХОЛБОГДСОН НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРИЙН СИСТЕМД САНАМСАРГҮЙ АРАЛЖИЛТЫГ ИЛРҮҮЛЭХ, ХАМГААЛАХ АРГАЧЛАЛЫН СУДАЛГАА

Лхагвадоржийн ТҮМЭНЖАРГАЛ[1], Дуламсүрэнгийн АВИРМЭД[2], Мөнхбаатарын БАТТУЛГА[3]

[1,2,3]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: battulga@must.edu.mn[3]

Хураангуй: **Сүүлийн жилүүдэд тархмал эрчим хүчний эх үүсвэрүүд, ялангуяа тархмал нарны цахилгаан үүсгүүр (НЦҮ)-ийн системүүд цахилгаан эрчим хүчний түгээх сүлжээнд эрчимтэй нэвтэрч, уламжлалт төвлөрсөн генерацийн бүтцэд бодит өөрчлөлт авчирсан. Энэхүү өөрчлөлт нь инвертерт суурилсан эх үүсвэрүүдийн динамик зан байдалд нөлөөлж, ялангуяа санамсаргүй аралжилт (unintended islanding) нь системийн найдвартай ажиллагаа, аюулгүй байдалд эрсдэл үүсгэх болсон. Анх IEEE 1547-2003 стандарт нь тархмал эх үүсвэрийн нэвтрэлт бага үед боловсруулагдсан бөгөөд сүлжээ доголдсон үед хурдан салгахыг шаарддаг байв. Харин тархмал эх үүсвэрийн нэвтрэлт эрс нэмэгдсэн өнөөгийн нөхцөлд стандартын хамрах хүрээ нийцэхгүй болж, шинэчлэгдсэн IEEE 1547-2018 стандарт нь тархмал эх үүсвэрийг сүлжээний идэвхтэй элемент болгон хөгжүүлэх шаардлагыг тусгасан. Үүнд ride-through, ramp rate control зэрэг ухаалаг функцүүд багтдаг. Энэхүү судалгаанд тархмал НЦҮ системийн аралжилтыг илрүүлэх аргачлалууд (Islanding Detection Methods, IDM)-ыг онолын болон симуляцын түвшинд иж бүрнээр судалсан. Matlab/Simulink орчинд 50 кВт хүчин чадалтай системийг загварчилж, сүлжээний холболтын цэг дээр үүсэх аралжилтын нөхцөл, сүлжээний гэмтлийн үед anti-islanding хамгаалалтын функцүүдийн хариу үйлдлийн хугацаа, мэдрэмжийг үнэлсэн.**

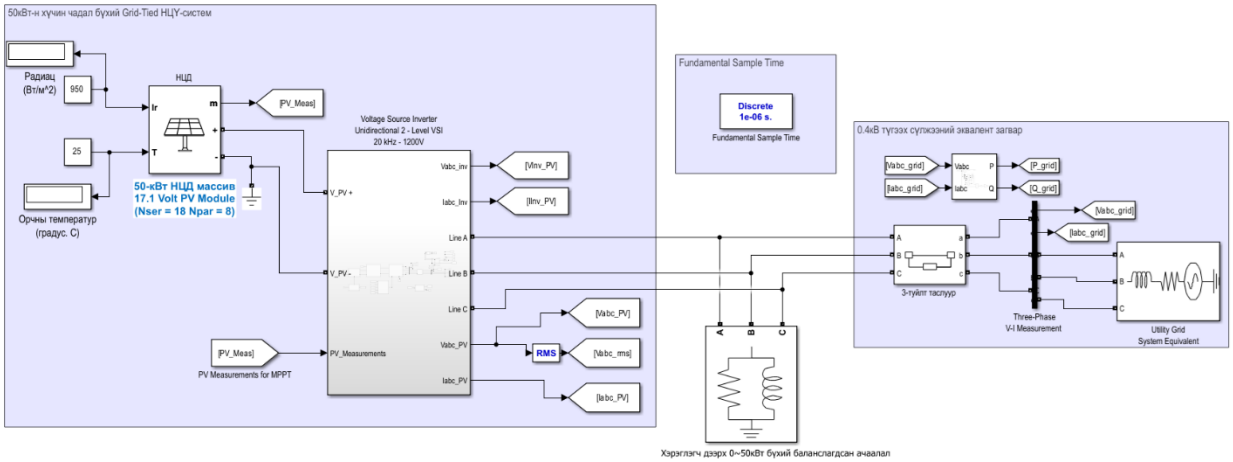
Түлхүүр үг: Түгээх сүлжээ,нарны цахилгаан үүсгүүр, санамсаргүй аралжилт, актив хамгаалалт, пассив хамгаалалт, найдвартай байдал, тохируулгын өсгөлтийн коэффициент.

I. УДИРТГАЛ

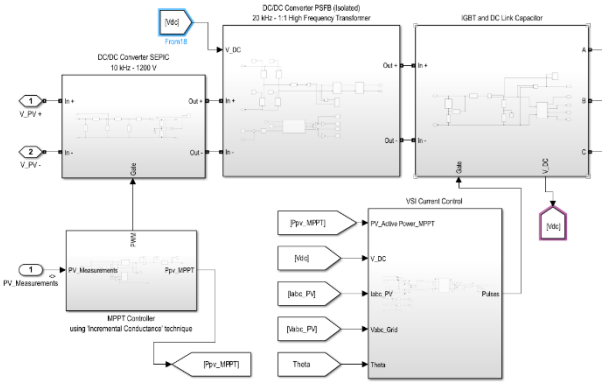
Дэлхий нийтийн хэмжээнд эрчим хүчний анхдагч нөөцийн хэрэглээний хувьд уламжлалт нөөцөөс уламжлалт бус нөөц рүү огцом хурдтайгаар шилжилт явагдаж байна. Эрчим хүчний хэрэглээ нь хүн амын өсөлт, амьжиргааны түвшний өөрчлөлт, хот сууриныхыг өргөжин тэлэх процесс, хөгжиж байгаа орнуудын эдийн засгийн өсөлт зэргээс хамаарч байнга нэмэгдэж байна. Харин эрчим хүчний анхдагч нөөц хязгаарлагдмал, улс орон бүрээр хэрэглээ болон нөөцийн харьцаа харилцан адилгүй байгаагаас хамаарч эрчим хүчний нөөцийн хангамжийн тогтвортой, хүртээмжтэй, аюулгүй байдал нь тогтвортой хөгжлийн зорилтын тулгамдсан асуудал байсаар байна. Иймд тогтвортой хөгжлийн зорилтод нийцүүлэн хязгаарлагдмал нөөцийг үр ашигтай, хэмнэлттэй зарцуулах, нөхөн сэргээгдэх нөөцийг түлхүү ашиглах, ингэснээр хүртээмжийг нэмэгдүүлэх нь улс орон бүрийн нийтлэг гол зорилт болж байна. Төвлөрсөн эрчим хүчний системд дамжуулах шугамаар алсын зайд цахилгаан эрчим хүч түгээхэд асуудал бэрхшээл учирч, шийдэх асуудал байнга гарч байдаг. Иймд 1990-ээд оноос төвлөрсөн бус, тархмал эрчим хүчний нэг төрөл болох тархмал НЦҮ-г олон улс даяар судалгаа хөгжүүлэлтийг гүйцэтгэж байна. Гэхдээ тархмал НЦҮ-г хөгжүүлэх нь төвлөрсөн эрчим хүчний эх үүсвэрээс эрс татгалзах зүйл биш бөгөөд эдгээр хоёр системийг зөв хослуулан ашиглах нь дамжуулах шугамын хөрөнгө оруулалтыг багасгах, түгээх цахилгаан сүлжээний үр ашгийг дээшлүүлэх, хэрэглэгчид очих цахилгаан эрчим хүчний чанарыг дээшлүүлэх нэг арга зам юм. Тархмал НЦҮ нь түгээх сүлжээ эсвэл цахилгаан эрчим хүч нийлүүлэх шаардлагатай байгаа хэрэглэгчтэй шууд холбогдсон горимоор ажиллана. Гэвч түгээх сүлжээнд холбогдсон тархмал НЦҮ-н системүүдийн хувьд аралжилт (islanding) нь томоохон техникийн сорилт болдог. Аралжилт гэдэг нь түгээх сүлжээний тодорхой хэсгийг нэгдсэн сүлжээнээс тусгаарласан буюу төлөвлөгөөт засвар үйлчилгээ болон төлөвлөгөөт бус тасралтын үед байхад тархмал НЦҮ-н нөлөөгөөр түгээх сүлжээнд эргэсэн хүчдэл өгөхийг хэлнэ. Иймд хэрэглэгч дээр суурилсан тархмал НЦҮ-н систем нь цахилгаан хангамж тасалдах үед сүлжээ рүү эргэх хүчдэл өгөхөөс хамгаалсан хамгаалалтаар бүрэн хамгаалагдсан байх шаардлагатай.

II. СҮЛЖЭЭНД ХОЛБОГДСОН НЦҮ-Н ЗАГВАРЧЛАЛ

Симуляцд ашигласан загвар нь Зураг 1-д үзүүлсэн бөгөөд [1]-д суурилан боловсруулагдсан болно. Энэхүү нарийвчилсан загвар нь 50 кВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан дэлгэцүүдийн массивыг тогтмол гүйдлийн (DC-DC) boost хөрвүүлэгч болон гурван фазын, гурван шатлалтай нэг чиглэлт хүчдэлийн удирдлагатай инвертер (Voltage Source Converter)-ээр дамжуулан 0.4 кВ-н түгээх сүлжээнд, хэрэглэгч дээрх Pload=50кВт ачаалалтайгаар холбосон. Аралжилтыг илрүүлэх зорилгоор хүчдэл ба давтамжийн хязгаарт суурилсан пассив хамгаалалтын функц ; бодит чадлын хэлбэлзэлд суурилсан актив хамгаалалтын функц, аралжилтыг илрүүлэх хугацааг тооцоолол функцүүдийг симуляцын орчинд загварчилсан.



1-р зураг. Сүлжээнд холбогдсон НЦУ-н системийн загварчлал



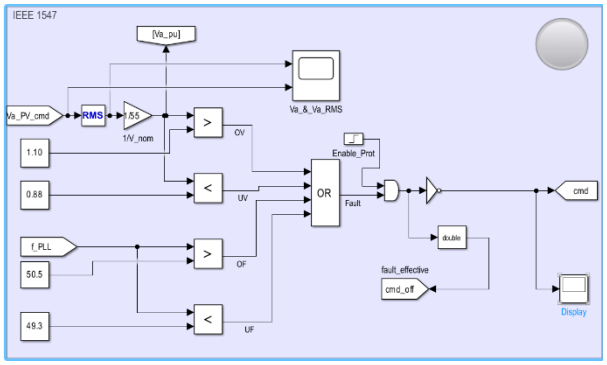
2-р зураг. MPPT удирдлагатай SEPIC ба PSFB хувиргач

Инвертерийн системд НЦД-с гарах тогтмол гүйдлийг тохируулах зорилгоор хоёр шатлалт DC/DC хөрвүүлэгчийг ашигласан бөгөөд үүнд SEPIC болон PSFB төрлийн хөрвүүлэгчүүд багтана. Эхний шатанд SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter) хөрвүүлэгчийг ашигласан. SEPIC хөрвүүлэгч нь гаралтын хүчдэлийг оролтын хүчдэлээс хамааран өсгөх болон бууруулах боломжтой (buck–boost горимтой) тул НЦД-с дамжих гаралтын хэлбэлзлийг үр дүнтэй зохицуулдаг. Энэ нь нарны радиац болон температурын өөрчлөлтөөс шалтгаалан НЦД-н гаралтын хүчдэл өөрчлөгдөх үед ч системийг тогтвортой ажиллуулах нөхцөлийг бүрдүүлнэ. Мөн SEPIC хөрвүүлэгч нь MPPT-н удирдлагатай уялдан ажиллаж, duty cycle-ийг өөрчлөх замаар хамгийн их чадлын цэг дээр системийг ажиллуулдаг. Хоёр дахь шатанд PSFB (Phase-Shifted Full Bridge) төрлийн тусгаарлагдсан DC/DC хөрвүүлэгчийг ашигласан [2].

Энэхүү хөрвүүлэгч нь өндөр давтамжийн трансформатор ашиглан галваник тусгаарлалт бий болгож, хүчдэлийг шаардлагатай түвшинд өсгөх үүрэгтэй. PSFB хөрвүүлэгчийн онцлог нь гүүрэн холболттой IGBT транзисторуудын хооронд фазын шилжилт үүсгэж, гаралтын чадлыг удирдана. Өөрөөр хэлбэл, удирдлагын дохионуудын хоорондох фазын зөрүүг өөрчилснөөр трансформатораар дамжих энергийн хэмжээг зохицуулж, гаралтын хүчдэлийг хянадаг. Энэ арга нь транзисторуудыг зөөлөн шилжилтийн нөхцөлд (soft switching) ажиллуулах боломж олгож, алдагдлыг бууруулан системийн үр ашгийг нэмэгдүүлдэг. Ийнхүү SEPIC болон PSFB хөрвүүлэгчүүдийг хослуулснаар НЦД-н гаралтын тогтворгүй шинж чанарыг бууруулж, хүчдэлийг оновчтой түвшинд тохируулан, дараагийн шатны инвертерийн ажиллагааг тогтвортой, найдвартай болгох нөхцөлийг бүрдүүлнэ. Инвертерийн гаралтаас үүсэх гармоник бүрэлдэхүүнүүдийг бууруулах зориулалттай 10 μH индукц L болон 2.1 омын R эсэргүүцэлтэй 17.2 кВА чадалтай RL бүхий идэвхгүй шүүлтүүртэй [3].

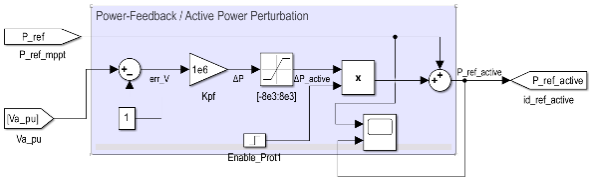
Холбогдсон 0.4кВ-ын түгээх сүлжээний холболтыг гурван фазын хүчдэлийн эх үүсвэр болон дотоод RL бүрэн эсэргүүцлийн нийлбэр эквивалент загвараар төлөөлүүлэн загварчилсан. Сүлжээний эх үүсвэрийг гүн газардуулсан од холболттойгоор фаз тус бүрийн хүчдэлийг 0.4кВ-ын шугамын хүчдэлд харгалзах 219 В (фазын хүчдэл) утгаар, 50 Гц сүлжээний давтамжтайгаар, фазуудын өнцгийн шилжилтийг стандарт гурван фазын системийн дагуу 0°, −120°, +120° гэж тохируулсан. Сүлжээний дотоод бүрэн эсэргүүцэл болон индукцээс бүрдэх RL загвараар илэрхийлсэн бөгөөд тухайн судалгаанд R = 0.5 Ом, L = 16.58 мГн утгуудыг ашигласан. Эдгээр параметрүүд нь сүлжээний богино залгааны тэсвэрлэх чадвар өөрөөр хэлбэл сүлжээний тогтворжилт өндөр эсвэл багатай шинжийг тодорхойлох үндсэн үзүүлэлт болдог. Өгөгдсөн индукцийн утгад харгалзах реактив эсэргүүцэл нь 50 Гц давтамжид ойролцоогоор 5.2 Ом бөгөөд нийт импеданс нь ~5.23 Ом орчим байна. Энэхүү харьцангуй өндөр бүрэн эсэргүүцлийн утга нь тогтворжилт багатай сүлжээний нөхцөлийг илэрхийлж байгаа бөгөөд иймд нөхцөлд хүчдэлийн хэлбэлзэл ихсэх, савлалтын үед системийн тогтвортой байдал буурах, мөн инвертерт суурилсан эх үүсвэрүүдийн синхрончлолын ажиллагаа алдагдах, хамгаалалтын алгоритмууд буруу ажиллах зэргээр удирдах нь илүү төвөгтэй болно. Иймд уг загвар нь тогтворжилт багатай сүлжээтэй холбогдсон тархмал НЦУ системийн ажиллагааг,

сүлжээнд ялангуяа аралжилт илрүүлэх алгоритм судлахад тохиромжтой [4].



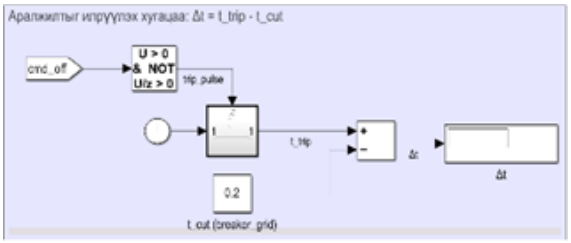
3-р зураг. OV/UV болон OF/UF хамгаалалт бухий пассив аралжилт илрүүлэх систем

3-р зурагт НЦҮ-н системийн санамсаргүй аралжилтыг илрүүлэх хамгаалалтын логик-ийг дүрсэлсэн болно. Тус схем нь хүчдэл болон давтамжийн параметрүүдийг бодит цаг хугацаанд хянах замаар сүлжээнээс тасарсан нөхцөлийг илрүүлж, инвертерийг сүлжээнээс салгах үйлдлийг гүйцэтгэнэ. Хүчдэлийн хяналтын хувьд инвертерийн гаралтын фазын хүчдлийг RMS утгаар тооцоолж, хүчдэлийн нэрлэсэн базис утгад шилжүүлсэн. Үүний дараа хүчдэлийн утгыг тогтоосон хязгааруудтай харьцуулж, хүчдэлийн ихсэлт (Over Voltage, OV) болон хүчдэлийн бууралтын (Under Voltage, UV)-ийн нөхцлүүдийг тодорхойлно [6]. Симуляцид ашигласан босго утгууд нь IEEE 1547 стандартын зөвлөмжид тулгуурласан бөгөөд хүчдэл 1.10 pu-ээс ихсэх эсвэл 0.88 pu-ээс буурах үед хамгаалалтын сигналыг үүсгэнэ. Давтамжийн хяналт нь фазын синхрончлолын блок (PLL)-оос тодорхойлогдсон сүлжээний давтамжид суурилна. Давтамж нь тавилын утгаас давсан тохиолдолд давтамжийг ихсэлт (Over Frequency, OF) болон давтамжийн бууралтын (Under Frequency, UF) нөхцөлүүд үүснэ. Тухайлбал, давтамж 50.5 Гц-ээс ихсэх эсвэл 49.3 Гц-ээс буурах үед хамгаалалтын сигнал идэвхжин. Хүчдэл болон давтамжийн дээрх бүх нөхцөлүүдийг логик OR үйлдлээр нэгтгэн, системийн алдааны төлөв (Fault)-ийг тодорхойлдог. Өөрөөр хэлбэл, эдгээр параметрүүдийн аль нэг нь зөвшөөрөгдөх хязгаараас хэтэрсэн тохиолдолд системийг аралжилтын нөхцөлд орсон гэж үзнэ. Үүссэн алдааны дохио нь хамгаалалтын идэвхжүүлэлтийн (Enable_Prot) блокийн хяналтаар дамжин, эцэст нь инвертерийн ажиллагааг зогсоох удирдлагын дохио (cmd_off) болгон хувирна. Энэхүү хамгаалалтын логик нь хүчдэл ба давтамжийн хязгаарт суурилсан пассив аралжилт илрүүлэх арга бөгөөд хэрэгжүүлэхэд энгийн, тооцооллын хувьд хөнгөн давуу талтай. Гэвч НЦҮ-н гаралтын бодит ба хуурмаг чадал нь хэрэглэгч дээрх ачаалалтай ойролцоо бланслагдаж байхад сүлжээ тасарсан ч хүчдэл ба давтамжийн утгад өөрчлөлт үүсэхгүй. Үүнээс шалтгаалж хүчдлийн ихсэлт ба бууралт (OV/UV), давтамжын ихсэлт ба бууралт (OF/UF) зэрэг пассив үзүүлэлтүүд өөрчлөгдөхгүй бөгөөд хамгаалалтын функцуудын аралжилтыг илрүүлэх чадвар буурч үл мэдрэх муж үүсгэх сул талтай [5]. Иймээс практикт илүү найдвартай ажиллагааг хангахын тулд ROCOF (давтамжийн өөрчлөлтийн хурд), фазын шилжилт (Vector Shift) зэрэг идэвхтэй эсвэл хосолсон аргуудтай хамтад нь ашиглах шаардлагатай байдаг. Ингэснээр уг хамгаалалтын схем нь IEEE 1547 стандартын шаардлагад нийцсэн байдлаар НЦҮ-н системийн аюулгүй, найдвартай ажиллагааг хангах үндсэн бүрэлдэхүүн хэсэг болж байна.



4-р зураг. Бодит чадлын зориудын өөрчлөлтөнд суурилсан аралжилт илрүүлэх актив систем.

4-р зурагт бодит чадлын хэлбэлзэлд суурилсан аралжилт илрүүлэх функциональ блок схемийг дүрсэлсэн. Энэхүү схем нь инвертерийн гаргах бодит чадлын урсгалд зориудаар бага хэмжээний өөрчлөлт оруулж, гаралтын хүчдэлийн утгыг хянах зарчимд тулгуурладаг. Хэрэв инвертер нь түгээх сүлжээнд холбогдсон хэвээр байвал сүлжээний хүчдэл ба давтамжаа барих тогтвортой шинж чанараас шалтгаалан энэхүү бага хэмжээний чадлын өөрчлөлт нь хүчдэлд бараг нөлөөлөхгүй. Харин сүлжээнээс тусгаарлагдаж, инвертер аралжсан нөхцөлд үйлдвэрлэл ба хэрэглээний баланс алдагдаж, хүчдэл болон давтамжийн мэдэгдэхүйц өөрчлөлт үүсгэж аралжилтыг илрүүлнэ. Тохируулгын үндсэн зарчим нь хүчдэлийн хазайлтайнд суурилсан гэдрэг холболтын удирдлага юм. Хүчдэлийг нэрлэсэн базис утгад харьцуулж дараах байдлаар алдааны дохиог тодорхойлно: $\Delta U=1-Up.u$. Хэрэв хүчдэл хэвийн байвал $\Delta U\approx 1$ улмаар алдааны дохио бага байна. Харин аралжилтын үед хүчдэл өөрчлөгдөж алдааны дохио нэмэгдэнэ [6]. Үүссэн алдааны дохиог өсгөлтийн коэффициентоор үржүүлэн бодит чадлын өөрчлөлтийг тодорхойлно: $\Delta P=K_{pf}*\Delta U$. Энд K_{pf} нь чадлын зориудын өөрчлөлтийн мэдрэмжийг тодорхойлох өсгөлтийн коэффициент юм. Энэхүү судалгаанд $K_{pf}=10^6$ буюу харьцангуй өндөр утгаар сонгосон нь хүчдэлийн бага өөрчлөлтөд түргэн хариу үйлдэл үзүүлэх боломжийг бүрдүүлж байна [7]. Гэвч хэт их чадлын зориудын өөрчлөлт нь системийн тогтвортой байдалд сөргөөр нөлөөлөх эрсдэлтэй тул чадлын зориудын өөрчлөлт ΔP-г IEC1547-н шаардлагын дагуу инвертерийн хүчин чадлын 10% буюу $\Delta P\in$ [-5000Вт, +5000Вт] хязгаарт багтаан хязгаарласан [8].



5-р зураг. Аралжилт илрүүлэх (Δt) тооцоолох функциональ схем

5-р зурагт үзүүлсэн функциональ блок схем нь аралжилт илрүүлэх хугацааг (Δt) тодорхойлох зорилготой. Түгээх сүлжээний таслуур тасарсан хугацааны агшнаас инвертер бүрэн зогсож унтарсан агшны хоорондох хугацааны зөрүүг тооцоолно. Энэ функцын үндсэн илэрхийлэл нь Δt= ttrip-tcut

- t_{cut}- түгээх сүлжээ хүчдэлгүй болсон буюу таслуур тасарсан агшин
- t_{trip} – инвертер хамгаалалтаар зогссон агшин

Схемийн ажиллагаа нь инвертер зогсоох дохио болох cmd_off сигналаас trip нөхцөлийг тодорхойлно. Энэ дохио нь логик нөхцөл хангагдсан үед үед trip_pulse хэлбэрээр үүснэ. Үүссэн trip дохио идэвхжих агшинд “clock” блокийн тухайн үеийн хугацааг хадгалж инвертер зогссон хугацааг ttrip гэж тодорхойлно. Сүлжээ хүчдэлгүй болж таслуур тасарсан агшныг тогтмол утгаар (tcut=0.2c) гэж өгсөн.

III. СИМУЛЯЦЫН ҮР ДҮН

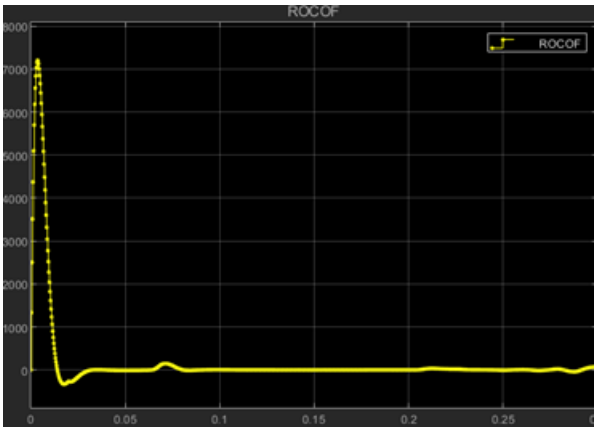
Хэрэглэгч дээрх ачааллын түвшингүүд ба актив, пассив хамгаалалтын функцуудын ажиллах хугацааны хамаарлыг 1-р хүснэгтэд харуулав.

АКТИВ, ПАССИВ ХАМГААЛАЛТЫН ФУНКЦУУДЫН АЖИЛЛАХ ХУГАЦААНЫ ХАМААРАЛ

1-Р ХҮСНЭГТ

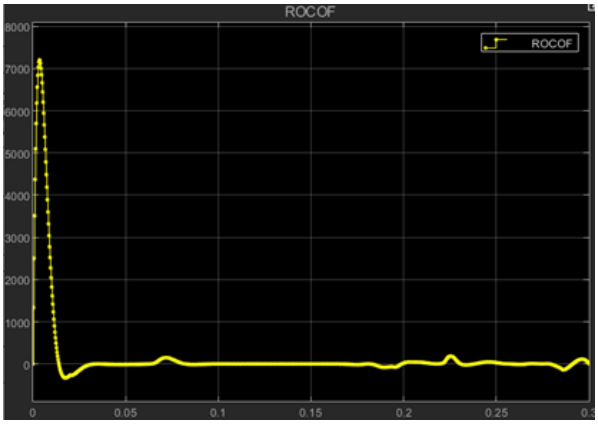
Хэрэглэгч дээрх суурьлагдсан ачаалал	Аралжилт илрүүлэх пассив функцын хугацаа t= м.с	Аралжилт илрүүлэх актив функцын хугацаа t= м.с
50кВт	24.42	6.872
45кВт	23.35	6.013
40кВт	22.13	5.062
35кВт	18.91	5.696
30кВт	18.69	-25.12
25кВт	18.51	-23.85
20кВт	18.31	-19.73
15кВт	18.06	-18.55
10кВт	18.06	-9
5кВт	17.81	-5
0кВт	-40	0

Пассив аргын хувьд хүчдэл болон давтамжийн хязгаарт суурилан аралжилтыг илрүүлж байгаа бөгөөд инвертерын гаралтын чадал ба ачааллын тэнцвэр алдагдсан нөхцөлд илрүүлэх хугацаа ойролцоогоор 17–24 ms-ийн хооронд хэлбэлзэж байв. Энэ нь хамгаалалтын алгоритм хурдан хариу үйлдэл үзүүлж байгааг харуулж байна. Гэсэн хэдий ч инвертерийн гаралтын чадал ба хэрэглэгч дээрх ачаалал ойролцоо үед пассив арга хангалттай үр дүн үзүүлэхгүй байгааг давтамжийн өөрчлөлтийн хурдаар (ROCOF) тодорхойлсон. Зураг-6 дээр давтамжийн өөрчлөлтийн хурд ба хугацааны хамаарлыг үзүүлсэн. Хугацааны эхний агшинд инвертер сүлжээнд залгагдаж (ROCOF)-н утга огцом өсч, хугацаа өнгөрхөд (ROCOF)-н утга огцом буурч инвертер ба сүлжээ хоорондох динамик шилжилтийн процессийг үзүүлж байна. Динамик шилжилт тогтворжсоны дараа сүлжээ талын таслуур t=0.2c тасрах үед давтамжийн өөрчлөлтийн хурд (ROCOF) үзүүлэлт өөрчлөгдөөгүй. Энэ нь пассив хамгаалалтын функц нь тухайн нөхцөлд аралжилтыг илрүүлэх боломжгүй үл мэдрэх мужд орж байна.



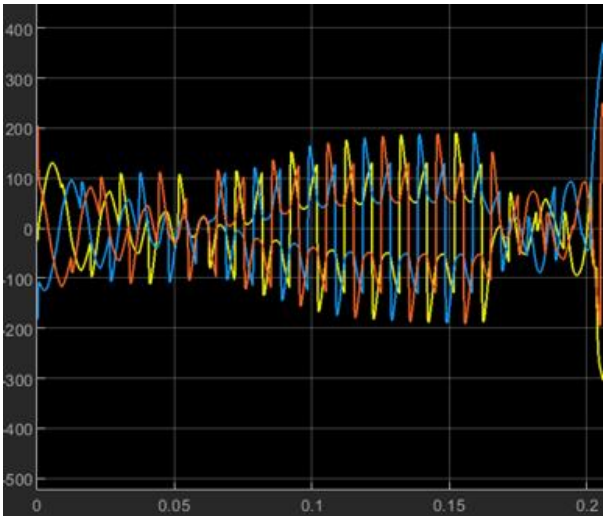
6-р зураг. Дан пассив хамгаалалтын функцыг идэвхжүүлсэн байхад хэрэглэгчийн ачаалал ба инвертерийн ачаалал Pl=PG үед аралжилтын горимд шилжих үеийн давтамжын өөрчлөлтийн хурд.

Актив аргын хувьд инвертерийн идэвхтэй чадалд зориудын жижиг өөрчлөлт оруулах замаар системийн тэнцвэрийг алдагдуулж, аралжилтыг илүү найдвартай илрүүлж байгааг харуулсан. Ялангуяа хүчдэлийн хазайлтад суурилсан зориудын өөрчлөгдөх алгоритм идэвхжих үед чадлын хэмжигдэхүүн огцом өөрчлөгдөж, системийн параметрүүдэд илүү тодорхой өөрчлөлт үүсгэж байгаа нь илрүүлэх чадварыг нэмэгдүүлж байна. Зураг-7 дээрх инвертер сүлжээнд залгагдаж динамик шилжилтийн процесс тогтворжсоны дараа сүлжээ талын таслуур t=0.2c агшинд тасрах үед давтамжийн өөрчлөлтийн хурд (ROCOF) үзүүлэлтнд өөрчлөлт илэрч байна.



7-р зураг. Актив хамгаалалтын функцыг идэвхжүүлсэн байхад хэрэглэгчийн ачаалал ба инвертерийн ачаалал P_l=P_G үед аралжилтын горимд шилжих үеийн давтамжын өөрчлөлтийн хурд.

Мөн тогтворжилт багатай сүлжээтэй нөхцөлд сүлжээ тал руу чадлын урсгал нь P_{flow}>20кВт дээш үед сүлжээний бүрэн эсэргүүцэл өндөр байснаас хүчдэлийн хэлбэлзэл нэмэгдэж актив хамгаалалтын алгоритм зарим тохиолдолд буруу ажиллах (false trip) магадлалтай байгааг ажигласан. 8-р зураг ба 1-р хүснэгтэд үзүүлсэн өнгөөр тодруулсан хэсэгт $t_{trip} < 0$ буюу сүлжээний таслуур t_{cut} = 0.2с тасрахаас өмнө инвертер нь актив хамгаалалтаар унтарсан.



8-р зураг. Инвертерээс сүлжээ рүү дамжих чадлын урсгал P_{flow}=20кВт -с дээш үед холболтын шин нь дээрх хүчдэлийн хэлбэлзэл.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар сүлжээнд холбогдсон тархмал НЦҮ-н инвертерийн системд аралжилт илрүүлэх пассив болон актив хамгаалалтын функцуудыг симуляцийн аргаар судалж, тэдгээрийн гүйцэтгэлийг харьцуулан үнэлэв. Үр дүнгээс харахад пассив хамгаалалтын функц нь инвертерийн үйлдвэрлэл ба ачааллын тэнцвэр алдагдсан нөхцөлд хурдан илрүүлэх чадвартай боловч үйлдвэрлэл ба хэрэглээ балансласан үед хамгаалалтын үл мэдрэх мужын найдвартай ажиллагаа хангалтгүй байгааг тогтоосон. Харин актив хамгаалалтын функц буюу чадлын зориудын өөрчлөлтөд суурилсан арга нь системд зориудын өөрчлөлт оруулснаар аралжилтыг илүү тодорхой илрүүлэх боломжийг бүрдүүлж, хамгаалалтын үл мэдрэх мужийн нөлөөг бууруулж байгааг харуулсан. Гэвч уг аргын гүйцэтгэл нь удирдлагын параметрүүд, ялангуяа өсгөлтийн коэффициент K_{pf} утгаас хамаарч байгааг ажиглав. Хэт их өсгөлт нь системийн тогтвортой байдлыг алдагдуулж, хэлбэлзэл үүсгэх бол хэт бага утга нь илрүүлэх мэдрэмжийг бууруулдаг. Мөн түгээх сүлжээний шинж чанар нь хамгаалалтын алгоритмын ажиллагаанд чухал нөлөө үзүүлдэг болох нь тогтоогдлоо. Тогтворжилт муутай нөхцөлд сүлжээний импеданс өндөр тул хүчдэлийн хэлбэлзэл ихсэж, актив хамгаалалтын функц буруу ажиллах (false trip) магадлал нэмэгддэг. Харин тогтворжилт илүү нөхцөлд пассив аргын мэдрэмж буурч, аралжилтыг илрүүлэхэд актив аргын үүрэг нэмэгддэг. Иймд аралжилт илрүүлэх хамгаалалтын функцуудын тавлыг тохируулахад түгээх сүлжээний тогтворжилтыг харгалзан үзэж, чадлын зориудын өөрчлөлтийн өсгөлтийн коэффициент Kpf-ийг оновчтой сонгох шаардлагатай. Практикт пассив болон актив аргуудыг хослуулан ашиглах нь илрүүлэх найдвартай байдал, тогтвортой ажиллагааг хангах оновчтой шийдэл болохыг энэхүү судалгаа баталж байна

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/130854-grid-tied-inverter-with-current-controller.

[2] Г.Энхбаяр, Хүчний хувиргах техник, Улаанбаатар, 2014.

[3] Ё. Молом, Сүлжээтэй зэрэгцээ ажиллагаатай инвертерийн судалгаа, 2019

[4] Ч. Амарсайхан, Инвертерт суурилсан сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүртэй цахилгаан системийн тогтворжилтын судалгаа, 2025.

[5] Inverter On-board Detection Methods to Prevent Unintended Islanding: Industry Practices. EPRI, Palo Alto, CA: 2018. 3002014728.

[6] Impact of IEEE 1547 Standard on Smart Inverters and the Applications in Power Systems, IEEE Power & Energy Society , August 2020.

[7] Dr.-Ing. Paul Christiani GmbH& Co. KG, Тохируулгын техникийн түргэвчилсэн сургалт, 2013.

[8] See. IEEE Std 1547TM-2018, clause7

ЦЭЦИЙ САЛХИН ЦАХИЛГААН СТАНЦЫН САЛХИН ТУРБИН ГЕНЕРАТОРЫН ОНЦЛОГ БА НАЙДВАРТАЙ АЖИЛЛАГААНЫ СУДАЛГАА

Рэнчингийн ОЧИРБАТ[1], Бат-Очирын БАТЗАЯА[2], Шагдарсүрэнгийн ГАНТӨМӨР[3]
Монгол Улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль,
[1]Цахилгааны инженерийн тэнхим
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: r.ochirbat57@gmail.com[1]

Хураангуй: **Сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг эрчим хүчний системд их хэмжээгээр холбох нь хүчдэлийн тогтворжилт, реактив чадлын баланс зэрэг техникийн шинэ асуудлуудыг бий болгодог. Монгол Улсад салхины эрчим хүчний нөөц асар их боловч том чадлын салхин цахилгаан станцуудыг системд холбох үед сүлжээний горим ажиллагаанд тодорхой нөлөөлөл үзүүлэх боломжтой байдаг. Энэхүү судалгааны ажилд Өмнөговь аймагт байрлах Цэций салхин цахилгаан станцын ажиллагаа болон Тавантолгой 220/110/35 кВ-ын дэд станц дээр суурилуулсан SVC (Static Var Compensator) төхөөрөмжийн хүчдэлийн горим, реактив чадлын зохицуулалт болон гармоник гажилтад үзүүлэх нөлөөллийг судлав. Судалгааг станцын ашиглалтын өгөгдөл, реле хамгаалалтын бичлэг болон гармоникийн хэмжилтийн үр дүнд тулгуурлан хийсэн. Судалгааны дүнгээс харахад SVC-ийн реакторыг гармоник фильтергүйгээр ажиллуулах үед трансформаторын хэвийн бус дуу чимээ үүсэж, гармоник гажилт нэмэгдэж байгааг тогтоосон. Харин SVC-ийг автомат горимд фильтертэй ажиллуулах үед гармоник гажилт буурч, хүчдэлийн горим тогтворжиж байгааг тодорхойлов. Судалгааны үр дүн нь салхин цахилгаан станцыг эрчим хүчний системд найдвартай холбох, хүчдэлийн тогтвортой ажиллагааг хангах, гармоник гажилтыг бууруулахад SVC төхөөрөмжийн тохиргоо чухал ач холбогдолтойг харуулж байна.**

Түлхүүр үг: ***Салхин цахилгаан станц, гармоник хэлбэлзэл, найдвартай ажиллагаа***

I. УДИРТГАЛ

2012 оны 11 сард Ньюком ХХК-ийн 51 хувь, Японы улсын Софтбанк корпорацын охин компани болох “SB Energy” компанийн 49 хувийн эзэмшлээр хамтран Монгол Улсад сэргээгдэх эрчим хүчний нөөцийн хайгуул судалгаа хийх, улмаар Монголын өмнөд бүсийг сэргээгдэх эрчим хүчээр хангах зорилготой “Клин Энержи Ази” ХХК-ийг албан ёсоор байгуулсан.

Салхины судалгааны ажлыг 2008 оноос эхлүүлж, салхины хэмжилтийг 50м-ийн өндөрт байрлуулсан 3 хэмжилтийн станцаар хийсэн. Зургаан жилийн судалгааны үр дүнд 80м өндөрт салхины дундаж хурд 8.4 м/с байхаар тооцоологдсон [1].

Монгол Улсын салхины нийт боломжит нөөц 1130 ГВт бөгөөд одоогоор суурилагдсан хүчин чадал 155 МВт байна.

Цэций салхин цахилгаан станц нь Монгол Улсад баригдсан хоёр дахь том салхин цахилгаан станц юм. Энэхүү төсөл нь олон улсын байгууллага болох ЖАЙКА (JICA) ба Европын Сэргээн Босголт Хөгжлийн Банк (EBRD)-ын санхүүжилттэй хөнгөлөлттэй зээлээр хэрэгжсэн. Хөрөнгө оруулалтын хувьд тогтвортой, үр ашигтай төсөл бөгөөд анхны хөрөнгө оруулалтын хэмжээ 120 сая ам. доллар байна.

Мөн уг төсөл нь салбарын хувьд олон улсын стандарт, хөрөнгө оруулалтын туршлагыг Монгол улсад нэвтрүүлсэн онцлогтой.

Энэхүү станц нь ашиглалтад орсноор жилд дунджаар 120,000 тонн нүүрс, 1.6 сая тонн цэвэр ус хэмнэх бөгөөд 180,000 тонн нүүрс хүчлийн хий (CO_2) бууруулахаар төлөвлөгдсөн.

Энэхүү судалгааны ажлын зорилгыг дараах байдлаар дэвшүүлсэн. Үүнд:

- Цэций салхин цахилгаан станцын ажиллагааг судлах
- Сүлжээний горимд гарсан тасалдлын нөлөөллийг шинжлэх
- SVC төхөөрөмжийн ажиллагаа ба гармоник гажилтын өөрчлөлтийг тодорхойлох явдал юм.

II. САЛХИН ЦАХИЛГААН СТАНЦЫН ҮЙЛ АЖИЛЛАГАА

Цэций СЦС нь говийн бүсийн салхины өндөр нөөцтэй бүсэд байрладаг тул ажиллагаатай хугацаандаа их хэмжээний цэвэр эрчим хүч үйлдвэрлэх дараах давуу талтай. Үүнд:

- Том диаметртэй далбаа (110 м) → бага салхины үед ч илүү их эрчим хүч үйлдвэрлэнэ.
- Орчин үеийн pitch + full converter систем → сүлжээний горимд уян хатан, реактив чадлын тохируулга сайн
- Говийн бүсийн өндөр салхины нөөц → үйлдвэрлэлийн коэффициент (CF) өндөр
- Үйлдвэрлэх, хүлэмжийн хий CO_2-ийг жилд ойролцоогоор 230 000 тн бууруулах, нүүрс, ус хэмнэх үр дүн өгч байна.

Станц нь үйлдвэрлэсэн цахилгаан эрчим хүчийг 110 кВ-ын дамжуулах шугамаар Тавантолгой дэд станц руу дамжуулж, Монгол Улсын төвийн эрчим хүчний нэгдсэн сүлжээнд нийлүүлж байна.

Сүүлийн жилүүдэд дэлхий даяар сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээ эрчимтэй өсөж, эрчим хүчний системийн хөгжлийн чухал чиглэл болж байна. Ялангуяа салхины эрчим хүч нь байгаль орчинд ээлтэй, түлш шаарддаггүй, хүлэмжийн хий ялгаруулдаггүй давуу талтай тул хамгийн хурдацтай хөгжиж буй технологийн нэг юм [2,3].

Монгол Улс салхины эрчим хүчний асар их нөөцтэй бөгөөд судалгаагаар ойролцоогоор 1100 ГВт орчим техникийн боломжит нөөцтэй гэж үнэлэгддэг. Гэсэн хэдий ч салхины эрчим хүчийг эрчим хүчний нэгдсэн системд их хэмжээгээр холбох үед хүчдэлийн хэлбэлзэл, реактив чадлын баланс алдагдах зэрэг техникийн асуудлууд гардаг [4,5].

Салхин цахилгаан станцыг системд найдвартай холбох, хүчдэлийн горимыг тогтвортой байлгах зорилгоор Тавантолгой дэд станц дээр SVC төхөөрөмж суурилуулсан. Энэ төхөөрөмж нь реактив чадлыг зохицуулж хүчдэлийн тогтвортой байдлыг хангах үүрэгтэй [6,7].

Монгол Улсад баригдсан томоохон салхин цахилгаан станцуудын нэг нь Өмнөговь аймгийн Цогтцэций суманд байрлах Цэций салхин цахилгаан станц юм. Энэхүү станц нь 50 МВт суурилагдсан хүчин чадалтай бөгөөд Монгол Улсын төвийн эрчим хүчний системд холбогдсон хоёр дахь том салхин цахилгаан станц юм [8].

Цэций СЦС нь олон улсын хөрөнгө оруулагч түнш олон улсын байгууллагууд болон хувийн хэвшлийн байгууллагын дэмжлэгийг хослуулсан жишиг төсөл юм. Үүний ач холбогдол нь цаашид сэргээгдэх эрчим хүчний салбарт хөрөнгө оруулалт татах боломжийг нэмэгдүүлсэн байна [9,10].

III. ГОРИМ АЖИЛЛАГАА

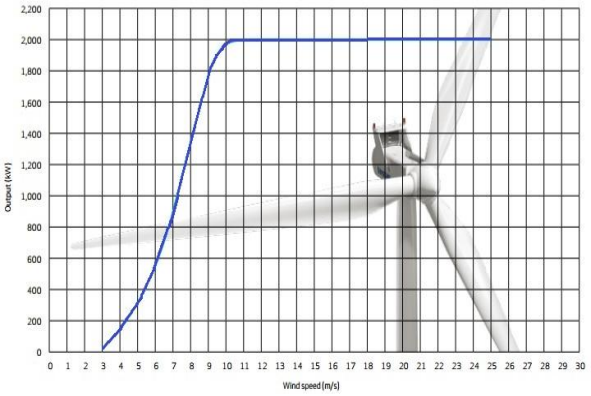
Салхин цахилгаан станц нь өвөл, зуны хоёр горимоор үйл ажиллагаа явуулдаг.

“Диспетчерийн үндэсний төв” ТӨХХК-аас өгсөн горимын дагуу цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэнэ. Тогтвортой өндөр салхитай, хэрэглээ бага үед 10-50 МВт-ын хооронд тохируулгын станцын хэмжээнд ажилладаг. 10 МВт-аас доош хязгаарлах тохиолдолд салхин турбин генератор зогсож эхэлдэг.

Салхин цахилгаан станц нь 110 кВ-ын АШ-147, 110 кВ-ын АШ-148, 110 кВ-ын СШ-I, 110 кВ-ын СШ-II, 110 кВ-ын ШХЭТ, Т-1 (Зун), Т-2 (Өвөл), 35 кВ-ын Секц-1, 35кВ-н Секц-2 , 35кВ-н СХВТ Багц-1,2,3,4, Нум унтраах ороомог-1,2, ДХТ-1 (Зун), ДХТ-2 (Өвөл), СТГ-25 ширхэг ажиллах ба нөөц бэлтгэлд Т-1 (Зун), Т-2 (Өвөл), ДХТ-1 (Зун), ДХТ-2 (Өвөл), КБ-1, 2, дизель генератор зэрэг үндсэн тоноглолуудын тусламжтайгаар үйл ажиллагаа явуулдаг.

Эдгээр үндсэн тоног төхөөрөмжүүд нь дэлхийд тэргүүлэх ABB компанийн тоноглол, 110 кВ-ын ил хуваарилах байгууламж, SFZ-55000/110 Хүчний трансформатор 2 ширхэг, 40.5 кВ-ын GIS буюу хийн тусгаарлагчтай хуваарилах байгууламж, Schweitzer Engineering Laboratories реле хамгаалалтын төхөөрөмжүүдтэй.

Салхин цахилгаан станцын турбины чадлын муруйг 1-р зурагт харуулав.



1-р зураг. Турбины чадлын муруй

Салхин турбины генераторын хамгаалалтын дараах үндсэн төрлүүд байдаг. Үүнд:

1. Ихсэх гүйдлийн хамгаалалт (Overcurrent protection). Сүлжээ болон тоног төхөөрөмжид хэт их гүйдэл үүсэх үед генераторыг сүлжээнээс салгах хамгаалалт юм. Шат 1 – 50 А – 1.6 сек, Шат 2 – 300 А – 0.35 сек, Шат 3 – 700 А – 0.03 сек. Шат ахих тусам гүйдлийн хэмжээ ихсэж, ажиллах хугацаа богиносдог.

2. Газардлагын хамгаалалт. Газардлагын гэмтэл үүсэх үед турбиныг сүлжээнээс салган хамгаална. Шат 1 – 40 А – 5 сек, Шат 2 – 200 А – 0.02 сек.

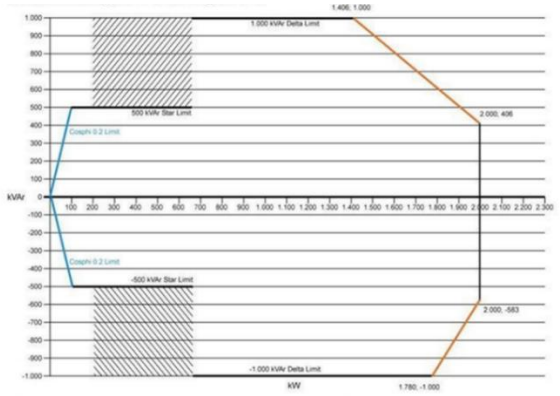
3. Хүчдэлийн хамгаалалт. Хүчдэл буурах эсвэл ихсэх үед турбиныг хамгаалах систем ажиллана. Салхин турбин, генераторын хүчдэл бууралт, ихсэлтийн үед тэсвэрлэж гарах хамаарлын график. ***Хүчдэл бууралт*** (Under voltage): 100–105 kV – 60 сек, 94–100 kV – 11 сек, 0–94 kV – 2.5 сек, ≈0 kV – 0.45 сек.

   Хүчдэл ихсэлт (Over voltage): 130–136 kV – 300 сек, 136–142 kV – 30 сек, 142–145 kV – 2 сек, 145–160 kV – 0.1 сек, >160 kV – 0.033 сек.

4. Давтамжийн хамгаалалт нь 47 Hz-ийн давтамж бууралтад 0.2 сек, 53 Hz-ийн давтамжийн ихсэлтэд 0.2 сек гэж тооцдог.

5. Температурын хамгаалалт: 125^0C – Trip, 140^0C – Trip, 150^0C – Trip байна.

6. Бодит (P) ба уурмаг (Q) чадлын хамаарал: Салхин турбины инвертер нь нийт чадлын хязгаартай байдаг. Өөрөөр хэлбэл СТГ (салхин турбин генератор) нь реактив боломж нь актив чадлаас хамааралтай бөгөөд актив чадал буурах тусам реактив чадал үйлдвэрлэх болон шингээх боломж нэмэгддэг.



2-р зураг. Бодит хуурмаг чадлын хамаарлын график

2-р зурагт P=2000 кВт үед Q= 400-583 кВар хуурмаг чадал авах болон үйлдвэрлэх, P=1406 кВт буюу түүнээс бага үед Q=1000 кВар хүртэл хуурмаг чадал үйлдвэрлэх, P=1780 кВт буюу түүнээс бага үед Q= -1000 кВар хүртэл хуурмаг чадал системээс авах боломжтойг харуулж байна.

1. LVRT / UVRT (Low Voltage Ride Through). Хүчдэл огцом буурах үед турбин шууд салдаггүй, тодорхой хугацаанд сүлжээнд ажиллах чадвартай байдаг.
2. Fault үед турбины ажиллах зарчим. Сүлжээнд гэмтэд (fault) гарсан үед: Генераторыг хамгаална - Реактив чадал үйлдвэрлэж хүчдэлийг дэмжинэ. Ийм нөхцөлд P (бодит чадал) буурч Q (реактив чадал) нэмэгдэнэ.

IV. СҮЛЖЭЭНИЙ ГОРИМ БА ГАРСАН ТАСРАЛТ, SVC-Н ҮЙЛ АЖИЛЛАГАА БА ГАРМОНИК ШИНЖИЛГЭЭ

Улаанбаатар-Мандалговь 330 кВ-ын габариттай ЦДАШ 2019 оны сүүлээр ашиглалтад орсон нь говийн бүсийн цахилгаан эрчим хүчний найдвартай ажиллагааг дээшлүүлсэн маш чухал ажил болсон. Мөн Таван толгой ДС-ын 220/110/35 кВ-ын дэд станцын автотрансформаторын 35 кВ-ын талд SVC суурилуулсан нь тухайн хэсгийн хүчдэлийн тогтворжилтыг ханган ажиллаж байна. Энэхүү төхөөрөмж Цэций СЦС-ын горим ажиллагаанд тоноглолд хэрхэн нөлөөлж байгааг 1-р хүснэгтээр харуулав.

ТАСРАЛТЫН СУДАЛГАА

1-Р ХҮСНЭГТ.

№	207, 225-р ЦДАШ	Хүчдэл савлалтаас
2018	12	5
2019	44	22
2020	19	2
2021	1	0
2022	0	0
2023	0	0
2024	0	0
2025	0	0
Нийт	76	29

220/110/35 кВ-ын Багануур болон Чойр дэд станц, мөн Чойр ба Мандал дэд станц хооронд гарсан тасралтуудын улмаас нийт 76 удаа хүчдэл тасарч, станц 0 чадалд суусан байна.

Мөн хүчдэлийн савлалтаас шалтгаалан 29 удаа ачаалал хаясан тохиолдол бүртгэгдсэн байна.

Сонгино-Мандалын агаарын шугам ашиглалтад орж, мөн Тавантолгой дэд станц дээр 35кВ-ын SVC суурилуулснаар 2021 оноос хойш дээрх станцуудтай холбоотой болон хүчдэл савлалтаас шалтгаалж тасралт гараагүй байна.

ТАСРАЛТЫН СУДАЛГАА

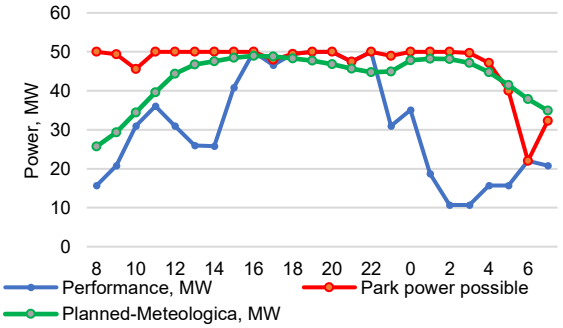
2-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Хүчдэл савлалт	39	53	23	59	34	75	6
Тасралт	2	0	0	0	0	0	0

2-р хүснэгтээс харахад хүчдэлийн савлалт жил бүр их хэмжээтэй бүртгэгдэж байгаа ч тасралт 2020 онд 2 удаа гарсан ба 2021 оноос хойш хүчдэлийн савлалтаас шалтгаалсан тасралт гараагүй байна. Энэ нь дээрх ажлууд хийгдсэнээр говийн бүсийн эрчим хүчний системийн найдвартай ажиллагаа эрс сайжирсныг харуулж байна.

Цэций салхин цахилгаан станцын хувьд анх төсөл хэрэгжихэд жилд системд 198 сая кВт цахилгаан эрчим хүч нийлүүлэхээр төлөвлөсөн. 2018-2020 онуудад төлөвлөсөн хэмжээний 67-75 хувийг нийлүүлж байсан бол 2021 оноос хойш 90-ээс дээш хувь, зарим жилд 198 сая кВт цагаас илүү хэмжээг нийлүүлж байна.

Тасралт багассанаар нийлүүлэлт өссөн хэдий ч “Диспетчерийн үндэсний төв” ТӨХХК-ийн шийдвэрээр жил бүр боломжит үйлдвэрлэх хэмжээнийхээ 13 хувь орчмыг хязгаарлуулж дутуу үйлдвэрлэж байна. Үүнээс харахад Цэций салхин цахилгаан станц нь анх нийлүүлэхээр төлөвлөж байсан цахилгаан эрчим хүчийг хангалттай нийлүүлэх салхины потенциалтай станц гэдэг нь харагдаж байна.



Тавантолгой дэд станц дээр 35кВ-ын SVC (Static Var Compensator) тавигдсанаар Цэций салхин цахилгаан станцын үндсэн тоноглол 110/35 кВ-ын хүчний трансформаторт хэвийн бус дуу үүсгэж байгаатай холбогдуулан дараах гармоник шинжилгээ хийгдсэн.

SVC нь системийн хүчдэлийн тогтвортой байдлыг хангах зориулалттай, цахилгаан байгууламж юм. SVC нь Тиристорны удирдлагатай реактор /TCR/, Шүүгч конденсатор /FC/ гэсэн хоёр хэсгээс бүрдэнэ. TCR нь дараалал залгагдсан реактор болон параллель тиристорын хавхалгаас бүрдэх ба

системийн реактив чадлын балансыг тохируулдаг. TCR-ын контроллер нь системийн реактив чадлын балансыг барих болон реактив чадлын тохиргоог хийхийн тулд сүлжээний хүчдэл болон гүйдлийн фазын өнцгийг тооцоолж багтаамжийн болон нөлөөмжийн эсэргүүцлийн чадлыг автоматаар тохируулдаг.

Шүүгч конденсатор нь байнгын залгаатай байдаг ба 3 болон 5-р гармоникийг шүүх, чадлын коэффициентыг тогтвортой барих, тэгш бус хэмт ачааллыг фаз тус бүрээр тохируулах үүргийг гүйцэтгэнэ. Үр дүнг 3-р хүснэгтээр харуулав.

SVC-ын үзүүлэлт

Тавигдсан SVC-ын тооцоот реактив чадал:

- 30Мвар /багтаамжийн/-аас 30МВар /индуктив/ хүртэл
- Тиристорны удирдлагатай реакторын компенсацлах чадвар нь 60МВар /индуктив/
- Шүүгч конденсаторын компенсацлах чадвар нь -30Мвар /багтаамж/

SVC-ЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ

3-Р ХҮСНЭГТ.

Parameter Calculation				
filter branch	3	5	TCR	
voltage level, kV	35.00	35.00	35.00	
calculation voltage, kV	35.00	35.00	35.00	
installation capacity, kVar	24000	24000	60000	
fundamental compensation capacity, kVar	14086	16091	60000	
voltage of single capacitor, kV	7.00	6.30		
capacity of single capacitor, Kvar	500.0	500.00		
total number of capacitors	48	48		
number of capacitors in series	4.00	4.00		
number of capacitors in parallel	4.00	4.00		
capacitance (phase), μF	32.48	40.10		
fundamental capacitive reactance (phase), Ω	98.00	79.38		
inductance value of Reactor-mH	35.13	10.35	111.75	2×55.88
fundamental current-- A	232	265	571 (inside the angle)	990 (outside he angle)
rated current -- A	286	317	629 (inside he angle)	1089 (outside the angle)

ТТ Д/СТ-ын 35кВ статик вар компенсатор төхөөрөмжийн горим ажиллагаанаас хамаарч Цэций СЦС дээрх гармоник утга 2020.09.01-2020.09.06-ны өдрүүдэд Тавантолгой дэд станцын АТ-ын 35кВ талд суурилуулсан Статик вар компенсаторыг дараах горимуудаар ажилд залгаж, ажиллагааг зүгшрүүлэх туршилт, тохируулгын ажлыг гүйцэтгэсэн.

- 2020.09.01-02-нд SVC-1 гар горимд /-20МВар/ SVC-2 гар горимд /-10МВар/
- 2020.09.03 SVC-1 автомат горимд /тиристорын удирдлагатай реактор+ 3-р гармоникийн фильтер 14Мвар
- 2020.09.03 SVC-1 гар горимд -20МВар
- 2020.09.03 SVC-1 гар горимд -20МВар /Оюутолгой д/ст дээр 20МВар-н реактор тасалсан.
- 2020.09.03 SVC тасархай.
- 2020.09.05 SVC-2 гар горимд 2Мвар+ SVC-1 автомат горимд /тиристорын удирдлагатай реактор+ 3 болон 5-р гармоникийн фильтер/
- 2020.09.05 SVC-1 автомат горимд /тиристорын удирдлагатай реактор+ 3 болон 5-р гармоникийн фильтер/
- 2020.09.06 SVC-2 автомат горимд /тиристорын удирдлагатай реактор+ 3 болон 5-р гармоникийн фильтер

Эдгээр горимын үед Цэций СЦС дээр үүсэх синусын гажилтыг буюу гармоник бүрэлдэхүүнийг РХА-ийн бичлэг болон Осциллографын хэмжилтийн аргаар тодорхойлов.

Реле хамгаалалт автоматжуулалтын бичлэгийн нэг циклд 128 цэгээр хэмжилт хийх тохиргоо хийж, синусын долгионы гажилтыг нарийвчлан тодорхойлох боломж бүрдүүлсэн.

2020.09.01-2020.09.06-ны өдрүүдэд 110/35кВ Цэций дэд станцын тухайн үеийн горим ажиллагаа дараах байдалтай байсан.

Ажилд: 110кВ 147-р АШ, 110кВ-н СШ 1, Т-1, 35кВ-ын Секц 1, 35кВ-ын Секц 2, 35кВ-ын СХВТ Багц-1,2,3,4 , НУО-1,2, ДХТ-1, СТ-25 ширхэг

Бэлтгэлд: 110кВ 148-р АШ,110кВ-ын СШ 2, 110кВ-ын ШХЭТ, Т-2 , ДХТ-2, КБ-1,2

Засварт: Тоноглол байхгүй.

SVC-ЫН ГОРИМ АЖИЛЛАГААНЫ ҮЕИЙН ХЭМЖИЛТ

4-Р ХҮСНЭГТ.

ТТ д/ст SVC горим ажиллагаа	Цаг минут	Ачаалал P,Q Хүчдэл U	Phase Voltage	THDV %	3th	5th	7th	9th	11th
SVC-1 гар горимд /- 20МВар/ SVC-2 гар горимд /-10МВар/	9:52:02 PM	P=17.7	Va	4.75	0	4.37	0.36	0	0.28
			Vb	4.5	0.48	4.06	0.43	0	0.39
		Q=5.4	Vc	4.92	0.4	4.43	0.43	0	0.36
		U=116.3	AVG	4.72	0.29	4.29	0.41	-	0.34
	10:38:58 PM	P=-0.16	Va	3.65	0.48	3.31	0.3	0	0.3
			Vb	3.9	0.26	3.58	0.31	0	0.28
		Q=1.4	Vc	4.04	0.2	3.69	0.31	0	0.3
		U=113	AVG	3.86	0.31	3.53	0.31	-	0.29
	8:04:00 PM	P=34.7	Va	4.45	0.07	4.25	0.29	0	0.29
			Vb	4.41	0.2	4.21	0.27	0	0.34
		Q=7.3	Vc	4.47	0.16	4.25	0.29	0	0.34
		U=115.3	AVG	4.44	0.14	4.24	0.28	-	0.32

Гармоникийн фильтергүйгээр залгах үед Цэций СЦС-ын хүчний трансформатор дээр гармоник THD дээд тал нь 4.55 хувь хүртэл өсөж байгаа нь олон улсын IEE519-2014 стандартад заасан хэмжээ 2.5 хувиас өндөр байна.

ХҮЧДЭЛИЙН ГАЖУУДЛЫН ЗӨВШӨӨРӨГДӨХ ХЯЗГААР

5-Р ХҮСНЭГТ

PCC цэг дээрх шинийн хүчдэл V	Нэг гармоникийн хязгаар (%)	Нийт гармоник гажуудал THD (%)
V ≤ 1.0 kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5

161 kV < V	1.0	1.5

5-р хүснэгтэд олон улсын IEE519-2014 стандартын дагуу хүчдэлийн түвшнээс хамаарч гармоникийн зөвшөөрөгдөх дээд хувь хэмжээг харуулсан байна. 110кВ-н тоноглолд гармоникийн хэмжээ 2.5 хувь дотор байхаар байна.

V. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын үр дүнд дараах дүгнэлтүүдийг гаргаж байна. Үүнд:

Цэций салхин цахилгаан станцын төслийн үзүүлэлтээр жилд 198 сая кВт цахилгаан эрчим хүч системд нийлүүлэхээр төлөвлөсөн. 2018-2020 онуудад төлөвлөсөн хэмжээний 67-75 хувийг, 2021 оноос хойш 90-ээс дээш хувь, зарим жилд 198 сая кВт цагаас илүү хэмжээг нийлүүлж байна.

2020 оны 8 сарын 15-наас эхлэн Т1 хүчний трансформаторт хэвийн бус дуу чимээ үүссэн нь Тавантолгой дэд станц дээрх Статик вар компенсаторын реакторыг /нөлөөмжийн/ гармоникийн фильтергүйгээр /багтаамжийн/ буюу дангаар нь ажиллуулсантай холбоотой байсан.

Энэ нь Цэций СЦС-ын хүчний трансформаторыг гэмтээх эрсдэлтэй байгаа учир 35кВ-ын SVC-г гармоникийн фильтергүйгээр удаан ажиллуулж болохгүй гэдгийг харуулж байна. Гармоникийн фильтерүүд бүрэн залгаатай THD 0.5-0.7 хувьтай хэвийн байна.

Тавантолгой дэд станц дээр Статик вар компенсаторын ажиллагааг зүгшрүүлэхтэй холбоотойгоор 2020.09.01-ээс 2020.09.06-ны хооронд SVC-ийг нийт 8 өөр горимоор ажиллуулж туршилт, тохируулгын ажил хийсэн. Энэ хугацаанд Тавантолгой дэд станц болон Цэций салхин цахилгаан станц дээр гармоникийн хэмжилтийг хийж синусын гажилтыг тодорхойлсон.

Хэмжилтийн үр дүнгээс харахад SVC тасархай үед болон SVC-2-ыг гармоникийн фильтертэй автомат горимд ажиллуулах үед Цэций салхин цахилгаан станцын хүчний трансформаторын дуу чимээ хэвийн болсон.

Мөн Тавантолгой дэд станц дээр SVC-ийн хүчдэлийн тохируулгыг 228 кВ-аар тохируулсан үед 110 кВ-ын хүчдэлийн түвшин 108–113 кВ хооронд буюу бага байсан. Үүний улмаас Цэций салхин цахилгаан станцын СТГ-ууд РРС-ийн тохируулгын дагуу хүчдэлийг барихын тулд реактив чадлыг системд их хэмжээгээр нийлүүлж байсан. Энэ нь реактив чадлын нөөц багасах эрсдэл үүсэж байна.

Хүчдэлийн түвшнийг хэвийн болгохын тулд Тавантолгой дэд станц дээр SVC-ийн хүчдэлийн тохируулгыг 232 кВ, РРС-ийн тохируулгыг 116.7 кВ болгон өөрчилснөөр хүчдэлийн түвшин хэвийн болсон. Үүний үр дүнд реактив чадлыг системээс хэрэглэж эхэлсэн.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] International Electrotechnical Commission Wind Turbine, Generator Systems – IEC 61400 Series. (2019).

[2] International Energy Agency Renewables 2022: Analysis and Forecast to 2027. (2022). IEA Publications.

[3] Тавантолгой дэд станц дээр 35кВ-ын SVC-н горим бүрт гармоник хэмжсэн судалгаа. “Клин Энержи Ази” ХХК-ны үйлдвэрлэлийн менежер Д.Балсанжамц

[4] Global Wind Energy Council (2023). Global Wind Report 2023.

[5] Kundur, P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, New York. (1994).

[6] Bollen, M. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press. (2000).

[7] N. G. Hingorani & Laszlo Gyugyi Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press. (2000).

[8] Ackermann, T. Wind Power in Power Systems. John Wiley & Sons. (2005).

[9] Japan International Cooperation Agency Renewable Energy Development in Mongolia. (2017).

[10] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Standard 519-2014).

[11] Arrillaga, J., & Watson, N. Power System Harmonics. John Wiley & Sons. (2003)

НҮҮРСНИЙ ИЛЧЛЭГТ НӨЛӨӨЛӨХ ХҮЧИН ЗҮЙЛС, ТҮҮНИЙГ ТОДОРХОЙЛОХ АРГА ЗҮЙН СУДАЛГАА

Нямүрэв НАРАНЖАРГАЛ[1], Авирмэд ТҮМЭНБАЯР[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим Хүчний сургууль, Дулааны цахилгаан станцын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: naranjargaln7@gmail.com[1], tumee_79@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Нүүрсний илчлэг нь түүний чанар, эдийн засгийн үр ашгийг тодорхойлох хамгийн чухал үзүүлэлт юм. Энэхүү өгүүлэлд нүүрсний илчлэгийн физик-химийн шинж чанарт нөлөөлөх гол хүчин зүйлс болох түүний элементийн бүрэлдэхүүн болон техникийн үндсэн үзүүлэлтүүд болох ажлын үнслэг, чийглэг, дэгдэмхий бодис зэргийн талаар авч үзэж, илчлэгийг тодорхойлоход ашиглаж буй уламжлалт стандарт арга болон орчин үеийн математик загварчлалын аргуудын харьцуулсан судалгааг хийж, нэгтгэн дүгнэв.**

Түлхүүр үг: нүүрсний илчлэг, техникийн үзүүлэлт, үндсэн элемент, бортогот калориметри, математик загварчлал

I. ОРШИЛ

Эрчим хүчний анхдагч эх үүсвэрийн хувьд нүүрс нь өнөөдөр ч дэлхийн болон Монгол улсын түлш-эрчим хүчний балансад тэргүүлэх байр суурийг эзэлсээр байна. Нүүрсний илчлэг буюу дулаан гаргах чадвар гэж нэрлэгддэг шаталтын үед ялгарах дулааны хэмжээ нь тухайн нүүрсний ашиглалтын зориулалт, үнэ цэнийг шууд тодорхойлдог үзүүлэлт юм. Илчлэгийг үнэн зөв тодорхойлсноор зуухны шаталтын технологи, түүний оновчтой горимыг сонгохоос гадна энэ нь нүүрс баяжуулах болон худалдан борлуулах үйл ажиллагаанд хүртэл чухал нөлөөг үзүүлдэг.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТЫН ТУХАЙ

Нүүрсний илчлэг нь түүний органик болон эрдсийн найрлагаас шууд хамаардаг бөгөөд үндсэн элементүүд ба технкийн үзүүлэлтүүдийг дараах байдлаар ангилж болно:

1. Үндсэн элементүүд

Нүүрстөрөгч (C) ба устөрөгч (H) нь илчлэгийг тодорхойлогч үндсэн элементүүд бөгөөд харин хүчилтөрөгч (O) болон азот (N)-ын агууламж нэмэгдэх нь нүүрсний дотоод энергийг бууруулдаг[1].

- *Нүүрстөрөгч* нь шаталтын үед хамгийн их энерги ялгаруулдаг үндсэн элемент ба нүүрсний доторх нүүрстөрөгчийн агууламж өндөр байх тусам (ялангуяа антрацит, чулуун нүүрсэнд) илчлэг өндөр байна[2].
- *Устөрөгч* нь нүүрстөрөгчөөс хамаагүй илүү их илчлэгтэй (шатах үед) боловч нүүрсэнд эзлэх хувь нь бага байдаг. Хэдий тийм ч устөрөгчийн агууламж өндөр байх нь илчлэгийг мэдэгдэхүйц нэмэгдүүлдэг[2].
- *Хүчилтөрөгч болон азот* нь шатахад энерги ялгаруулдаггүй ч, эсрэгээрээ нүүрсний бүтцэд байгаа шатах элементүүдтэй (C ба H) химийн холбоо үүсгэн илчлэгийг бууруулдаг. Федорова болон бусад судлаачдын судалгаагаар [1] хүчилтөрөгчийн хэмжээ нэмэгдэх нь нүүрсний илчлэг буюу дулаан гаргах чадварыг шууд бууруулдаг болохыг баталжээ.

2. Техникийн үзүүлэлтүүд

- *Чийглэг:* Нүүрсэнд агуулагдах чийг нь шаталтын үед ууршихад дулааны ихээхэн хэсгийг зарцуулдаг тул илчлэгийг шууд бууруулдаг тул хүчтэй урвуу хамааралтай хүчин зүйл болно[3].
- *Үнслэг:* Үнс нь нүүрсний шатдаггүй гол хольц бөгөөд үнслэг нь ихсэх тусам нүүрстөрөгчийн эзлэх хувь багасаж, илчлэг огцом буурдаг[3].
- *Дэгдэмхий бодис:* Дэгдэмхий бодис ихтэй нүүрс нь амархан асдаг бөгөөд шаталтын эхэнд их хэмжээний дөл үүсдэг. Агууламж нь хэт өндөр эсвэл хэт бага байх нь нүүрсний төрлийг тодорхойлох үндсэн үзүүлэлт болдог. Кубист регрессийн загвараар [4] дэгдэмхий бодисын хэмжээг үнслэг болон чийглэгтэй хамт ашигласнаар илчлэгийг өндөр нарийвчлалтайгаар тодорхойлох боломжтой.

Нүүрсний чийглэг, үнслэг, дэгдэмхий бодис зэрэг техникийн үзүүлэлтүүд нь илчлэгтэй урвуу хамааралтай боловч энэхүү хамаарал нь нүүрсний химийн найрлагаас шалтгаалан шугаман бус шинж чанарыг агуулдаг. Ялангуяа хүчилтөрөгчийн оролцоо нь нүүрсний бүтцийн дотоод исэлдэлтэд хэрхэн нөлөөлж, илчлэгийг бууруулж байгааг математик загварчлалын тусламжтайгаар нарийвчлан судлах боломжтой[5].

III. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН АРГА ЗҮЙ

Нүүрсний илчлэгийг тодорхойлох аргуудыг үндсэндээ шууд хэмжлийн (лабораторийн аргаар) болон шууд бус тооцооллын (математик загварчлал) гэж хоёр ангилдаг.

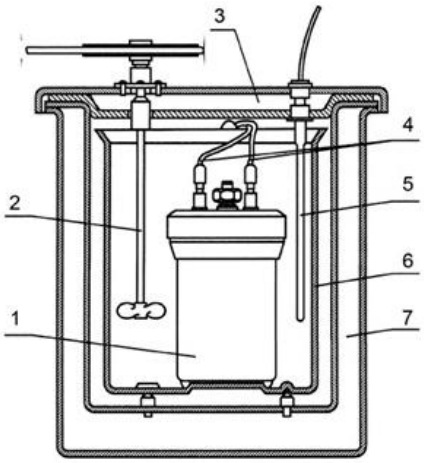
3. Шууд хэмжлийн арга (Standard Laboratory Methods)

Олон улсын (ISO) болон Монгол улсын стандартын (MNS GB/T 213:2024) [6] дагуу *Бортогот калориметрийн арга* нь илчлэгийг тодорхойлох хамгийн өндөр нарийвчлалтай аргад тооцогддог. Энэ нь нүүрсний дээжийг

хүчилтөрөгчийн даралтат орчинд бүрэн шатааж, ялгарсан дулааныг усны температурын өсөлтөөр хэмжих зарчим дээр үндэслэгдсэн байдаг.



1-р зураг. Бортогот калориметри, үндсэн бүтэц



2-р зураг. Хатуу түлшний шаталтын дулааныг тодорхойлох зориулалттай бортогот болон термостаттай сонгодог калориметрийн зарчмын схем(1-бортогот калориметр; 2-хутгуур; 3-термостатын таг; 4-гал асаах хэлхээний контакт утас; 5-термометр; 6-калориметрийн сав; 7-термостат)

А. Бортогот калориметрийн үндсэн бүтэц[6]:

1) *Бортого:* дээжийг хүчилтөрөгчийн орчинд шатаах битүү сав. Зэвэрдэггүй никель-хром эсвэл никель-хром-молибдений өндөр даралт, температурт тэсвэртэй хайлшаар хийгддэг.
2) *Доторх сав:* Бортогыг далд ортол бүрэх 2000-3000 мл усыг агуулах боломжтой сав бөгөөд доторх сав болон гаднах савны хоорондын цацрагийн нөлөөг багасгахын тулд доторх савны гадуур өнгөлгөө сайтай байх шаардлагатай.
3) *Гаднах сав:* Гаднах сав нь доторх савыг бүрэн багтаасан байх бөгөөд дотор болон гаднах савны хоорондын зай 10~12 мм, гаднах савны ёроолд доторх савыг тавихад хялбар байх үүднээс хөндий тулгууртай байна.
4) *Хутгуур/хутгагч:* Усан дахь температурыг жигд байлгахын тулд усыг тасралтгүй хутгах механизм. Дулаан багтаамжийн тохируулга хийх үед дулаан өгөхөөс дуусах хүртэлх хугацаанд хутгалт нь 10 минутаас хэтрэхгүй байх, мөн хутгалтын дулаан ихээр ялгарахаас сэргийлэх хэрэгтэй:
5) *Ус:* Калориметрийн дулаан хэмжилтийн орчин
6) *Калориметрийн термометр:* Доторх савны температурыг хэмжих термометр нь багадаа 0.001К-ний нарийвчлалтай байх шаардлагатай бөгөөд 2 К-ээс 3 К-ийн хооронд температурыг 0.002 К-ийн нарийвчлалтайгаар хэмжинэ. Үнэмлэхүй температурыг 0.1 К хүртэл нарийвчлалтай илэрхийлнэ. Калориметрийн термометр нь хэмжилт бүр дэх температурын өөрчлөлтийн хүрээнд шугаман болон шугаман биш байдаг.
7) *Тигель:* Цагаан алтаар хийх нь хамгийн тохиромжтой бөгөөд ихэнхдээ никель-хром гангаар хийсэн тигелийг хэрэглэдэг.
8) *Даралт хэмжигч ба хүчилтөрөгч дамжуулах хийн хоолой:* Даралт хэмжигч нь хүчилтөрөгчийн баллон дахь нийт даралт болон бортогонд хүчилтөрөгч шахах үеийн даралтыг хэмжих гэсэн 2 хэсгээс бүрдэнэ.
9) *Гал өгөх төхөөрөмж:* Дээжийг шатаахад ашиглана.
10) *Даралт шахагч:* Даралтат шахагч нь мушгиа хэлбэртэй, хөшүүргэн хэлбэрийн болон мөн бусад хэлбэртэй байдаг. Нүүрс болон бензойны хүчлийг 10 мм диаметртэйгээр таблет болгон шахна.
11) *Секундометр* эсвэл 10 секунд илэрхийлэх өөр хугацаа хэмжигч
12) *Жин:* Аналитик жин: 0.0001г-ийн нарийвчлалтай. Техник жин: 4 ~ 5 кг-ын даацтай, 0.5г-ын нарийвчлалтай.

Хэмжих зарчим: Нүүрсний дээжийг хаалттай, хүчилтөрөгчөөр дүүргэсэн "бортого" (bomb calorimeter) дотор бүрэн шатаана. Шаталтын явцад ялгарсан дулаан нь эргэн тойрон дахь усыг халаах бөгөөд усны температурын өсөлтийг нарийн хэмжүүрээр хэмжинэ[6].

Энэ аргын хувьд үр дүн нь хамгийн өндөр нарийвчлалтай бөгөөд хууль эрх зүйн болон худалдааны гэрээ хэлцлийн үндэс болдог давуу талтай ч дээж бэлтгэл, туршилт хийхэд их цаг хугацаа шаардагдах ба үнэтэй тоног төхөөрөмж хэрэглэдэг сул талтай.

4. Математик загварчлал ба таамаглах аргууд

Лабораторийн туршилт нь цаг хугацаа болон хөрөнгө мөнгө их шаарддаг тул үйлдвэрлэлийн шуурхай нөхцөлд математик загварчлалыг өргөн ашиглаж байна:

- *Эмпирик томьёонууд (Элемент анализад тулгуурласан)* Нүүрсний химийн найрлага (C, H, O, S, N) мэдэгдэж байгаа тохиолдолд Менделеев, Дюлонг, Нивел, Вондрачек нарын томьёог ашиглан илчлэгийг тооцоолдог[1][2].

Жишээ нь: Менделеевийн томьёо нь нүүрстөрөгч болон устөрөгчийн агууламж өндөр байх нь илчлэгийг хэрхэн нэмэгдүүлж байгааг илэрхийлдэг бол хүчилтөрөгчийн оролцоог сөрөг хүчин зүйл гэж тооцдог[1][2].

- *Статистик регрессийн загварууд (Техникийн үзүүлэлтэд тулгуурласан)* Энэ нь уурхайн геологич болон чанар шалгагчдад хамгийн хэрэгтэй арга юм. Нүүрсний *чийглэг (W), үнслэг (A), дэгдэмхий бодис (V)* зэрэг хялбар тодорхойлогддог үзүүлэлтүүдийг ашиглан илчлэгийг урьдчилан таамаглах загвар боловсруулдаг [3].

Давуу тал: Лаборатори дахь хөдөлмөр, цаг хугацаа их шаардсан шинжилгээний хэмжээг бууруулна. Туршилтын зардал бага, үр дүнг маш хурдан гаргана.

- *Орчин үеийн хиймэл оюун ухааны аргууд (Cubist ба Artificial Neural Network(ANN))* Сүүлийн жилүүдэд уул уурхай, тэр дундаа нүүрсний чанарыг урьдчилан таамаглах судалгаанд уламжлалт статистик регрессийн аргуудыг орлох, илүү өндөр нарийвчлалтай машин сургалтын (Machine Learning) аргуудыг өргөн ашиглах болсон. Үүнд ялангуяа Cubist [4] болон ANN (Artificial Neural Network) [2][4] загварууд онцгой байр суурийг эзэлж байна.

a) *Кубист регрессийн загвар*[4]*:* Cubist загвар нь 1992 онд Quinlan-ы боловсруулсан, M5 загварын модны сайжруулсан хувилбар бөгөөд “дүрэмд суурилсан” (rule-based) регрессийн модны параметрийн бус алгоритм юм. Энэ нь нарийн төвөгтэй, шугаман бус хамааралтай өгөгдлүүд дээр өндөр наривчлалтай таамаглал гаргах чадвартай. Энэхүү загварын ажиллах зарчим нь нүүрсний өгөгдлийг (чийг, үнс, дэгдэмхий бодис гэх мэт) олон жижиг "дүрэмд" (Rules) хувааж, хэсэг бүрт тохирох шугаман регрессийг ажиллуулдаг. Ингэснээр илчлэгийн (GCV) утгыг маш нарийн бүсчлэн тодорхойлдог. Судалгаагаар[4] Cubist загвар нь нүүрсний техникийн үзүүлэлтүүд (W,A,V) дээр суурилан R^2>0.99 бүхий өндөр нарийвчлалыг үзүүлсэн байна. Бусад "хар хайрцаг" (Black-box) загваруудаас ялгаатай нь Cubist нь илчлэгт нөлөөлж буй хүчин зүйлсийг логик "дүрэм"-ээр тайлбарлаж чаддаг тул уурхайн геологичдод үр дүнг хянахад хялбар байдаг.

Давуу тал нь олон хувьсагчит (чийг, үнс, C, H, S, V) нарийн төвөгтэй хамаарлыг маш өндөр нарийвчлалтайгаар таамагладаг.

b) *Particle Swarm Optimization – Artificial Neural Network (PSO-ANN) (Бөөмийн сүрэг оновчлолтой мэдрэлийн сүлжээ) [4][7]* Хиймэл мэдрэлийн сүлжээг бөөмийн сүрэг оновчлолын алгоритмаар сажруулсан “Гибрид” загвар юм. PSO (Particle Swarm Optimization) буюу бөөмийн сүрэг оновчлолын алгоритмыг ашиглан ANN-ийн дотоод параметрүүдийг (weights & biases) сүргийн ухааны зарчмаар ("шувуудын сүрэг хоол хайх" загварчлал) оновчилдог. PSO-г машин сургалтын загварт нэгтгэснээр бодит хэмжилт ба таамаглалын хоорондох зөрүү (deviation) эрс багасч, техникийн хувьд "хүлээн зөвшөөрөгдөх алдааны түвшин"-д (Acceptable error range) хүрдэг болох нь батлагдсан [7][8].

c) *Тайлбарлагч хиймэл оюун ухаан (XAI) ба SHAP аргачлал:* "Хар хайрцаг" (Black-box) гэгддэг машин сургалтын алгоритмуудын шийдвэр гаргах логикийг нээлттэй болгох, үр дүнг инженерийн үүднээс баталгаажуулахын тулд SHAP (SHapley Additive exPlanations) аргачлалыг нэвтрүүлсэн. Энэ нь нүүрсний техникийн шинжилгээний үзүүлэлт бүр (W, A, V) илчлэгийн хэмжээнд яг ямар жинтэйгээр, ямар чиглэлд (эерэг эсвэл сөрөг) нөлөөлж буйг тоон утгаар баримтжуулах нарийвчилсан дүн шинжилгээний суурь болж байна [5].

d) *Өндөр хэмжээст орон зайн оновчлол (SVM):* Дээжийн тоо харьцангуй бага нөхцөлд загварын найдвартай байдлыг хангахын тулд Туслах векторын машин (SVM) алгоритмыг ашигласан. SVM-ийн цөмийн функцийг (Kernel trick) ашиглан оролтын өгөгдлийг өндөр хэмжээст орон зайд шилжүүлэн буулгаснаар, нүүрсний шинж чанаруудын хоорондын нарийн төвөгтэй, шугаман бус хамаарлыг маш өндөр нарийвчлалтайгаар таамаглах нөхцөлийг бүрдүүлсэн [10][11].

IV. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ҮР ДҮН

Судалгааны хүрээнд туршсан машин сургалтын загваруудын гүйцэтгэлийг уламжлалт статистик аргуудтай харьцуулахад математик загварчлал нь нүүрсний илчлэгийг (GCV) таамаглахад илүү өндөр нарийвчлал, тогтвортой байдлыг үзүүлж байна.

Судлаач нарын тойм судалгаанд дурдсанаар[2], PSO-ANN гибрид загвар нь энгийн мэдрэлийн сүлжээнээс илүү тогтвортой, локал минимумд гацахгүй (global minimum-д хүрэх) чадвартай болохыг тогтоожээ. Энэ нь нүүрсний чанарын шинжилгээний явцад гардаг алдааг (RMSE) эрс бууруулдаг.

Судалсан гибрид загварууд болох PSO-ANN болон Cubist нь уламжлалт регрессийн аргуудтай харьцуулахад илчлэг таамаглах нарийвчлалаар (R^2 > 0.97) илт давуу байна. Загварчлалын үед гаргасан RMSE алдаа нь салбарын стандартад нийцэхүйц хүлээн зөвшөөрөгдөх хэмжээнд байгаа нь энэхүү аргыг инженерийн тооцоонд ашиглах найдвартай суурь болж байна.

ЗАГВАРУУДЫН ГҮЙЦЭТГЭЛИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ.

Загварын нэр	R2 (Нарийвчлал)	RMSE (Алдаа)	Эх сурвалж
Уламжлалт регресс	0.85 - 0.90	0.80 - 1.20	Ерөнхий статистик хандлага
Энгийн ANN	0.92 - 0.95	0.45 - 0.60	[10][12]
Cubist	0.98 - 0.99	0.18 - 0.30	[4]
PSO-SVR	0.95 - 0.99	0.20 - 0.40	[7]
PSO-ANN (Гибрид)	0.97 - 0.99	0.15 - 0.25	[7][8]

Ялангуяа Explainable AI (XAI) буюу SHAP аргачлалыг ашиглан загварын шийдвэр гаргалтад дүн шинжилгээ хийхэд нүүрсний техникийн шинжилгээний үзүүлэлт бүрийн (W, A, V) илчлэгт үзүүлэх нөлөөллийг тоон утгаар баримтжуулах боломжтой болсон [5]. Жишээлбэл, PSO-ANN загварын оновчлолын үр дүнд нүүрсний үнслэг ба чийглэгийн өөрчлөлт илчлэгт шугаман бус байдлаар хэрхэн нөлөөлж буйг илрүүлсэн нь

уламжлалт регрессийн (MLR) загвараас 3-4 дахин бага алдаа заах үндсэн шалтгаан болж байна [4][7].

Ийнхүү математик загварчлал нь зөвхөн тооцооллын хэрэгсэл бус, нүүрсний чанарын "далд" зүй тогтлыг илрүүлэх, инженерийн нарийвчилсан тооцоог баталгаажуулах нарийн судалгааны бие даасан арга зүй болох нь харагдаж байна.

Судалгаанд авч үзсэн гибрид загварууд нь уламжлалт аргаас 3-4 дахин бага алдаа зааж байгаа нь математик загварчлал нь нүүрсийг шинжлэхэд шаардлагатай арга зүй болохыг харуулж байна. Нүүрсний техник шинжилгээний үзүүлэлтүүд болох үнслэг, чийглэгийг тодорхойлох нь калориметрийн аргаас зардал багатай мөн хугацаа хэмнэнэ. Мөн судалгааны үр дүнд үнслэг болон чийглэгийн өөрчлөлт нь илчлэгт шугаман бус байдлаар нөлөөлдөг болохыг тогтоосон. Иймд бид эдгээр өгөгдлүүдийг ашиглан нүүрсний илчлэгийг тодорхойлох математик загварыг өөрийн орны хүрэн нүүрсний төлөөлөл болох Багануур, Шивээ-Овоогийн нүүрс, чулуун нүүрсний төлөөлөл Тавантолгойн нүүрсний хувьд судлан үйлдвэрлэлийн шатанд нүүрсний чанарыг бодит хугацаанд хянах хамгийн үр ашигтай, оновчтой арга зүй болгохоор ажиллаж байна.

ДҮГНЭЛТ

Манай орны хувьд дээрх аргуудаас лабораторийн стандарт аргуудад түшиглэсэн шинжилгээг ихэвчлэн хийж тодорхойлдог ба математик загварчлалын аргуудыг төдийлэн ашиглахгүй байна. Гэхдээ техникийн нөхцөл боломж нь илүү төвлөрсөн хот суурин газруудад буй дулааны цахилгаан станц, дулааны станцуудад энэ нь боломжтой байгаа боловч алслагдсан суурин газруудад илчлэг тодорхойлох нь хүндрэлтэй байдаг.

Иймд харьцангуй үнэ хямд чийглэг, үнслэг тодорхойлох багаж, төхөөрөмжтэй үед тэдгээрийн үр дүнд үндэслэн математик загварчлалыг ашиглан нүүрсний илчлэгийг таамаглах аргаар урьдчилан тодорхойлох нь техникийн багагүй ач холбогдолтой гэж үзэж байгаа тул бид нүүрсний ажлын чийглэг, үнслэгээс хамаарсан илчлэгийн математик загварын аргыг өөрийн орны хүрэн нүүрсний үзүүлэлтүүд дээр тулгуурлан боловсруулах судалгааг хийж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Федорова Н. И., Михайлова Е. С., Исмагилов З. Р. “Зависимость теплоты сгорания углей от их химического состава.” *Химия в интересах устойчивого развития*, 23, 135-138. 2015 он

[2] Vilakazi, L., & Madyira, D. (2024). “Estimation of gross calorific value of coal: A literature review.” *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. March 2024.

[3] Суханов Р. А., Сидорова Г. П. “Оценка низшей теплоты сгорания углей по известным значениям рабочей зольности и рабочей влажности.” 2006 он

[4] Chen, J., He, Y., Liang, Y., Wang, W., & Duan, X. (2024). “Estimation of gross calorific value of coal based on the cubist regression model.” *Scientific Reports*, 14, 23176, 2024 он

[5] Chelgani, S. C. (2021). "Estimation of gross calorific value based on coal analysis using an explainable artificial intelligence." *Machine Learning with Applications*, 6, 100116.

[6] MNS GB/T 213:2024. “Нүүрсний илчлэгийг тодорхойлох арга (Determination of calorific value of coal)”. Стандарт, хэмжил зүйн газар. 2024 оны 12-р сар

[7] Bui, H. B., Nguyen, H., Choi, Y., Bui, X. N., Nguyen-Thoi, T., & Zandi, Y. “A novel artificial intelligence technique to estimate the gross calorific value of coal based on meta-heuristic and support vector regression algorithms.” *Applied Sciences*, 9(24), 4868. November 2019

[8] Bui, X. N., Nguyen, H., & Nguyen, T. A. “Artificial neural network optimized by modified particle swarm optimization for predicting peak particle velocity induced by blasting operations in open pit mines.” *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2(1), pp.90-98. November 2021

[9] Park, S., Oh, K. C., Kim, S. J., Ryu, S., & Kim, D. H. “Development of Calorific Value Prediction Model Using Torrefied Biomass Elemental, Proximate and Chemical Composition.” *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences*, 37(3), pp. 235-248. August 2025.

[10] Q. Feng, J. Zhang, X. Zhang, and S. Wen. “Proximate analysis based prediction of gross calorific value of coals: A comparison of support vector machine, alternating conditional expectation and artificial neural network,” *Fuel Processing Technology*, vol. 129, pp. 120–129, September 2015.

[11] C. Cortes and V. Vapnik. “Support-vector networks,” *Machine Learning*, vol. 20, pp. 273–297, 1995

[12] Kavsek, D., Bednarova, A., Biro, M., Kranvogl, R., Voncina, D. B., & Beinrohr, E. “Characterization of Slovenian coal and estimation of coal heating value based on proximate analysis using regression and artificial neural networks.” *Central European Journal of Chemistry*, 11(9), pp. 1481–1491. 2013.

[13] Chelgani, S. C. (2019). "Exploring relationships of gross calorific value for North Korean coals."

НОВОТЕЛ ЗОЧИД БУУДЛЫН БАРИЛГЫН ДУЛААН АЛДАЛТЫГ БУУРУУЛАХ ЗАМААР ДУЛААНЫ ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ХЭМНЭЛТ ХИЙХ БОЛОМЖИЙН СУДАЛГАА

Наранбаатарын ЭНХМАНЛАЙ[1]„ Пашкагийн БЯМБАЦОГТ[1]„ Батсамбуугийн ӨЛЗИЙБАДРАХ[1]„
Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Дулааны инженерийн салбар
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: Mg_cl99@yahoo.com

Хураангуй: **Барилгын хийцлэл, хэв хашмал, цонхны дулаалга муу хийгдсэнээс үүдэн барилга хүйтний урилалд их хэмжээний дулаан алдаж түүнийг даган тухайн барилга байгууламжийг халааж буй халаах хэрэгслүүд, тоног төхөөрөмжүүдийн ачаалал нэмэгдэн дулаан цахилгааны эрчим хүчний хэргэлээ өсдөг. Үүнээс үүдэн хэд хэдэн хүндрэлүүд гардаг бөгөөд түүний нэг нь тухайн барилгын ЭХ-ний хэргэлээ нэмэгдэх, ААН-ийн хувьд санхүүгийн томоохон хүндрэл үүсдэг. Эрчим хүч хэмнэх олон боломжийн хамгийн үр өгөөж өндөртэй хувилбар нь барилгын дулааны алдагдлыг багасгах явдал юм.**

Түлхүүр үгд: ***Дулааны ачаалал, Дулааны алдагдал тодорхойлох Хаших хийц, Дулаан алдагдлын тооцоо ,Эрчим хүчний хэмнэлт , дулаалга***

I. УДИРТГАЛ

Эрчим хүчний хэрэглээ дэлхий дахинд тасралтгүй өсөж байгаа бөгөөд барилгын салбар нь нийт эрчим хүчний хэрэглээний томоохон хувийг эзэлдэг. Хүйтэн уур амьсгалтай орнуудад барилгын дулаан алдагдлыг бууруулах нь эрчим хүч хэмнэх хамгийн үр дүнтэй арга хэмжээнүүдийн нэг юм. Монгол улсын нийслэл Улаанбаатар хот нь өвлийн улиралд -39°C хүртэл хүйтэрдэг эрс тэс уур амьсгалтай тул барилгын дулаан хамгаалалтын асуудал онцгой ач холбогдолтой байдаг.Барилгын хаших хийцээр дамжин алдагдах дулаан нь халаалтын системийн ачааллыг нэмэгдүүлж, эрчим хүчний хэрэглээ болон ашиглалтын зардлыг өсгөдөг. Сүүлийн жилүүдэд архитектурын шийдэлд шилэн фасад, шилэн пассат бүхий барилгууд өргөн хэрэглэгдэх болсон боловч эдгээр хийцүүд нь дулаан хамгаалалтын хувьд харьцангуй сул талтай байдаг.Иймээс энэхүү судалгааны ажлаар шилэн пассат бүхий үйлчилгээний барилгын дулаан алдагдлыг тодорхойлж, дулаан хамгаалалтыг сайжруулах боломжийг судалж, эрчим хүч хэмнэх боломжийг үнэлэх зорилго тавьсан.[1].Эрчим хүчийг хэмнэснээр санхүү эдийн засгийн хувьд хэмнэлттэй, эрчим хүчний ачааллыг тодорхой хэмжээнд буулгах, Нөгөө талаар эрчим хүч үйлдвэрлэлээс үүсэх байгаль орчинд сөргөөр нөлөөлөх, хүлэмжийн хийн ялгарлыг багасгах хувь хүн ААН-ийн тодорхой хэмжээний үүрэг оролцоо юм.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТ

Судалгааны объектын хувьд хаших хийцийг бүрэн дулаалсан 16 давхар нийт 4 ресторан, - 2 хурлын танхим 192 буудлын өрөө зэрэг зочид буудлын цогцолбор барилга бөгөөд халаалт, агаар сэлгэлт, хэрэгцээний халуун хүйтэн усыг түгээх хүчин чадалтай хэрэгцээний бойлер, өргөлтийн насос, давтамж, хувьсгуур, бусад тоноглолоос бүрдсэн объект юм.



Зураг 1. Новотел үйлчилгээний барилгын гадна зураг

Зочид буудлын барилга нь шилэн болон чулуун фасатаас бүрдсэн барилга бөгөөд тухайн барилгын нийт 70% нь чулуун фасаднаас бүрдсэн юм.

III. ЧУЛУУН ФАСАД БҮХИЙ БАРИЛГЫН ТУХАЙ

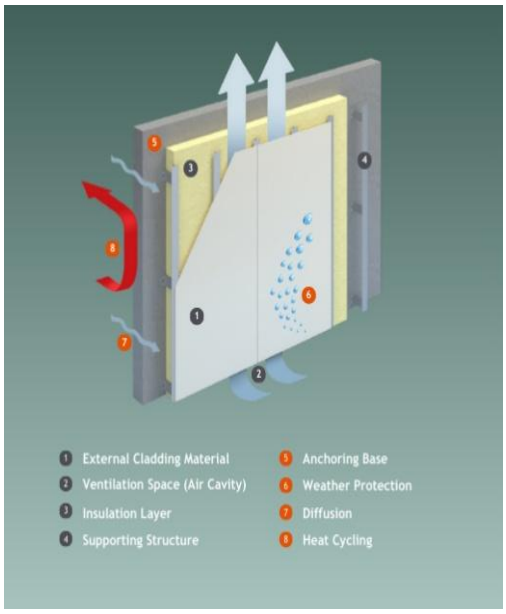
Фасадын гоёл, үзэмж

- Байгалийн чулуу (боржин, травертин, шохойн чулуу) ашигласнаар өндөр зэрэглэлийн, бат бөх, эстетик фасад үүсдэг.
- Өнгө, текстур нь уламжлалт болон орчин үеийн архитектурт тохиромжтой

Давхарга бүрийн бүтэц

- Дотор өнгөлгөө (шавардлага, гипсэн хавтан, будаг)
- Даацын хана (бетон, блок, тоосго)

- Салхи усны хамгаалалт (waterproof membrane)
- Дулаалгын үе (чулуун хөвөн, rock wool)
- Агаарын завсар (ventilated cavity)
- Металл бэхэлгээ / анкер
- Чулуун хавтан / өнгөлгөө



Зураг 2. Чулуун фасадын зарчмын зураг

Давуу тал

- Эстетик, урт настай – байгалийн чулуу удаан эдэлдэг.
- Дулаан ба дуу тусгаарлалт сайтай – дулаалга, агаарын завсартай хослуулснаар.
- Чийг, борооны хамгаалалт – ventilated системтэй хослуулан.
- Дахин засварлах, шинэчлэхэд боломжтой – чулууг сольж болдог
- Галд тэсвэртэй – байгалийн чулуу ба чулуун хөвөн ашиглавал.

Сул тал / анхаарах зүйлс

- Өндөр өртөг – байгалийн чулуу, металл бэхэлгээ, дулаалга зэрэг зардал өндөр.
- Системийн нарийн хийц шаарддаг – агаарын завсар, анкер, дулаалгын зөв байрлал чухал.
- Засварлахад нарийн – буруу хийвэл чийг хуримтлах, чулуу хагарах эрсдэлтэй.
- Жин ихтэй – даацын ханад нэмэлт ачаалал үүсгэдэг.

IV. ӨНДӨР ЧУЛУУН ФАСАД БҮХИЙ БАРИЛГЫГ ДАХИН ДУЛААЛАХАД ГАРДАГ ХҮНДРЭЛҮҮД

Салхины ачаалал ба Бэхэлгээний аюулгүй байдал

66 метрийн өндөрт салхины хурд газрын түвшнээс 2-3 дахин их байдаг. Энэ нь чулуун хавтанг сугалж шидэх "сорох хүч" (wind suction) үүсгэдэг [7].

Механик ачаалал ба Бэхэлгээний асуудал

Чулуун фасад нь маш хүнд (1 м.кв нь 40-100 кг ба түүнээс дээш). Хуучин чулууг хуулах явцад барилгын үндсэн хананд доргилт өгөх, эсвэл шинээр суурилуулах фасадны ачааллыг даах эсэхийг нарийн тооцох шаардлагатай.

Анкерын бэхэлгээ: Өндөр барилгад салхины ачаалал их байдаг. Хуучин хананы материалын чанар (тоосго, блок эсвэл бетон) муудсан бол шинэ фасадын анкерууд найдвартай тогтохгүй байх эрсдэлтэй [8].

Галын аюулгүй байдал

БНбД 21-01-02 "Барилга, байгууламжийн галын аюулгүй байдал: **Заалт:** 66 метр өндөр барилгын гадна фасадад зөвхөн **(Галд үл шатах)** ангиллын материал ашиглахыг шаарддаг. Энэ нь хөөсөнцөр (EPS) ашиглахыг бүрэн хориглож, зөвхөн **чулуун хөвөн** ашиглана. Иймд чулуун пассат бүхий барилгын дулаан алдалт хамгийн их байгаа 1-4 р давхрыг дулаалав.

V. БАРИЛГЫН ДУЛААН АЛДАГДЛЫГ ТОДОРХОЙЛОХ

Дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагаа, хүмүүсийн тав тухыг хангахын тулд барилгын дулааны алдагдлыг норм дүрмийн дагуу нарийн тооцох шаардлагатай. Барилгын дулаан хамгаалалтын гадна гадаргуу (нийт гадна хашлага бүтээц) нь дараах шаардлагыг хангасан байх ёстой. Үүнд:

- хашлага бүтээцийн дулаан дамжуулалтын эсэргүүцэл нь эрчим хүч хэмнэлтийн нормчилсон утгаас багагүй байх (хэмнэлтийн шаардлага);
- барилгын дулаан дамжуулалтын хувийн үзүүлэлт нь нормчилсон утгаас ихгүй байх (ерөнхий шаардлага);
- хашлага бүтээцийн дотор гадаргуугийн температур нь зөвшөөрөгдөх хамгийн бага утгаас багагүй байх (эрүүл ахуйн шаардлага). Дээр дурдсан а, б, в шаардлага бүрийг биелүүлснээр барилгын дулаан хамгаалалтын шаардлагыг хангана [3].

Дулаан дамжуулах процесс нь дулаан нэвтрүүлэлт, конвекцын ба цацруулалтын гэсэн гурван үндсэн үзүүлэлтээр явагддаг. Үүнд:

1. Дулаан нэвтрүүлэлт: биеийг бүрэлдүүлж байгаа жижиг хэсгүүд хооронд дулаан зөөгдөх процесс юм.
2. Конвекци нь хий ба шингэний харилан адилгүй температуртай хэсгүүд хоорондоо шилжин холилдох урсгалаар дулаан зөөгдөх процесс юм.
3. Цацруулалтын дулаан солилцоо их температуртай биеэс цахилгаан соронзондолгионы хэлбэрээр цацарсан дулааны энерги бага температуртай биеийн гадаргуугаар шингээгдэн биеийн хооронд дулаан солилцох үзэгдэл юм.

Монгол улсын стандарт БНбД 23-02-09 Барилгын дулаан хамгаалалт. Уг стандартын хамрах хүрээ нь: Барилгын дотор агаарын тодорхой дулаан, чийглэгийг барьж байх шаардлагатай орон сууц, олон нийт, үйлдвэр, хөдөө аж ахуй, агуулахын барилгын дулааны хамгаалалтад мөрдөнө.

Энэ стандартад хашлага хийцийн дулааны эсэргүүцлийг тодорхойлсон байдаг.

Монгол улсын стандарт БНбД 23-02-09 –д заасан Орон сууц болон түгээмэл олон нийтийн барилгын хана, барилгын хийцүүдийн дулааны эсэргүүцлийн үзүүлэлтүүд:

Дулааны эсэргүүцэл:
Хана -0.26 м2.С/Вт
Цонх – 1.49 m2·C/ Вт27
Дээвэр – 0.175 м2 С/ Вт
Шал - 5.5 м2.С/ Вт

Герман болон Европын холбооны улсуудын энэ чиглэлийн тодорхой норм, стандарт нь маш тодорхой хэрэглэгчид нийцсэн байна. Нэгж халааж буй талбайд шаардлагатай эрчим хүчний хэмжээг төлбөр төлдөг нэгж (Вт ц / м2 жил)-ээр нь илэрхийлэн заасан байх ба хязгаарлалт нь анхдагч эрчим хүчинд хамааруулж зааснаар сэргээгдэх эрчим хүчийг дэмжсэн бодлоготой нь нийцсэн байна.

VI. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТЫН ХАШИХ ХИЙЦИЙН ДУЛААН АЛДАГДЛЫН ХЭМЖЭЭ

Энэхүү шинжилгээг бид FLIR брэндийн MSX технологийн багажаар гадаргуун байдлыг шинжилж, агаарын температур хэмжигч термометрээр агаарын урсгалыг тодорхойлон шинжлэв.

ДАВХАР БҮРИЙН ӨРӨӨНҮҮДИЙН ДУНДАЖ ТЕМПЕРАТУР БОЛОН ХАРЬЦАНГУЙ ЧИЙГШЛИЙН ХҮСНЭГТ

1-Р ХҮСНЭГТ

Давхар	Харьцангуй чийгшил	Агаарын температур
1	21.90%	*+20.9°C*
3	28.40%	*+23.3°C*
4	19.80%	*+19.2°C*
6	19.20%	*+15.3°C*
7	*19.90%*	*+18.6°C*
8	*20.80%*	*+20.0°C*
9	*18.30%*	*+20.5°C*
10	*19.70%*	*+20.1°C*
11	*19.80%*	*+21.3°C*
12	*20.50%*	*+21.9°C*
13	*20.40%*	*+22.3°C*
14	*22.20%*	*+23.9°C*
15	*22.20%*	*+24.7°C*
16	*23.30%*	*+20.0°C*
Дундаж	*20.50%*	*+20.5°C*

Давхар бүрээс түүвэрлэсэн өрөөнүүдийн дундаж температур болон чийгшлээс харахад 4-7 давхрын өрөөний температур хамгийн бага буюу +15,3 градусаас +19,2 градусын хооронд байна. Хамгийн дулаан давхар нь 3, 14, 15 давхар байгаа бөгөөд ерөнхий зүй тогтол нь 5-аас дээш давхрууд дээшлэх тусам улам дулаахан болж байна. 3-р давхарт ресторан хоолны хэсэгт нэмэлт халаалт ажиллаж байгаа нь хамгийн дулаан давхрын нэг болж харагдаж байна. Харин дээшлэх тусам дулаан болж байгаа ч 16-р давхарт температур огцом буурч дунджаас бага буюу +20С болж байгаа нь дээврийн дулаан алдагдал нөлөөлж байгааг харуулж байна.

Давхар бүрээс түүвэрлэсэн өрөөнүүдийн дундаж температур болон чийгшлээс харахад 4-7 давхрын өрөөний температур хамгийн бага буюу +15,3 градусаас +19,2 градусын хооронд байна. Хамгийн дулаан давхар нь 3, 14, 15 давхар байгаа бөгөөд ерөнхий зүй тогтол нь 5-аас дээш давхрууд дээшлэх тусам улам дулаахан болж байна. 3-р давхарт ресторан хоолны хэсэгт нэмэлт халаалт ажиллаж байгаа нь хамгийн дулаан давхрын нэг болж харагдаж байна. Харин дээшлэх тусам дулаан болж байгаа ч 16-р давхарт температур огцом буурч дунджаас бага буюу +20С 20С болж байгаа нь дээврийн дулаан алдагдал нөлөөлж байгааг харуулж байна.

VII. ТЕХНОЛОГИЙН ШИЙДЭЛ

Шүршдэг хөөсөн дулаалга (Полиуретан) дулаалгыг сонгон авч ашиглав.

Давуу тал

- Полиуретан хөөс нь бусад дулаалгын материалаас (чулуун хөвөн, хөөсөнцөр) бага зузаантайгаар хамгийн өндөр дулаан эсэргүүцлийг үзүүлдэг SPF нь дулаан дамжуулалтын маш бага коэффициенттой бага (0.022-0.025 W/m·K) тул барилгын ашигтай талбайг хэмнэх хамгийн үр ашигтай шийдэл юм." [4].
- "Шүршдэг хөөс нь заадасгүй (monolithic) бүрхүүл үүсгэдэг тул уламжлалт хавтан

дулаалгад гардаг дулааны гүүр болон агаарын шүүрэлтийн асуудлыг бүрэн шийддэг.″ [5]

Сул тал

- ″ Өндөр барилгад SPF-ийг ашиглахдаа гал тэсвэрлэх чадварыг нэмэгдүүлэх катализаторуудыг найрлагад оруулах ба гадна талыг нь үл шатах материалаар заавал бүрэх шаардлагатай." [6]

VIII.Дулаалгын гүйцэтгэлийн ажил

Шүршдэг хөөсөн (Полиуретан) дулаалгыг хамгийн хурдан хугацаанд үр дүнтэй зардал багатай хийх шийдэл нь чулуу хоорондын силиконыг хуулан завсар зайгаар нь хөөсөн дулаалга шахах бөгөөд ингэж хийхдээ дулаан алдагдал хамгийн их хэсгүүдийг сонгон авч хийнэ. Энэ шийдэлд анхаарах зүйл нь фасадын агаарын урсгалыг хааж болохгүй бөгөөд барилгын онцлогоос фасадын хийцээс хамаарч дулаалга хийх газруудаа тодорхойлон хийв.

1. Хийж гүйцэтгэх хугацаа хэмнэлттэй
2. Байгууллагын үйл ажиллагаа зогсохгүй тул үйл ажиллагааны алдагдал үүсэхгүй
3. Сайжруулалт дулаалгын ажлын хөрөнгө оруулалтын зардал бага үр дүнтэй



3-р зураг. Шүршдэг хөөсөн дулаалга Полиуретан дулаалгаар обьект дулаалж буй хэсэг

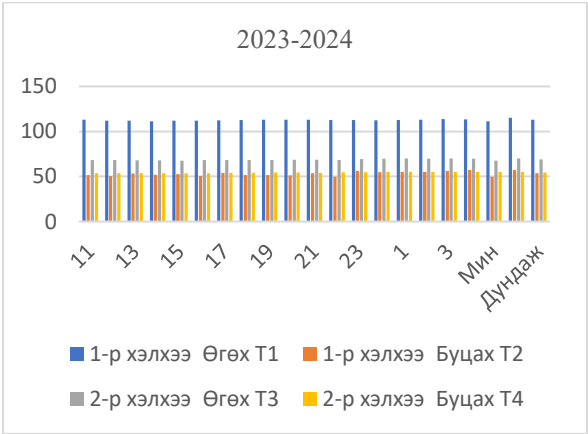
IX. ДУЛААНЫ БОДИТ ХЭРЭГЛЭЭНИЙ ХАРЬЦУУЛАЛТ

Хаших хийцүүдийн дулаалга хийсний дараах жилийн тохируулгын дундаж горимыг өмнөх оныхтой харьцуулан хүснэгт 2,3-д тусгав

НОВОТЕЛ ҮЙЛЧИЛГЭЭНИЙ БАРИЛГЫН 2023-2024 ОНЫ 11,12,01 САРД УДДТ-ИЙН ГОРИМЫН ДУНДАЖ МЭДЭЭЛЛИЙГ ҮЗҮҮЛЭВ.

2-Р ХҮСНЭГТ

Цаг	1-р хэлхээ		2-р хэлхээ	
	Өгөх Т1	Буцах Т2	Өгөх Т3	Буцах Т4
8	112.8	55.3	69.3	54.7
9	113.3	53.8	69.1	54.5
10	113.1	541.5	68.5	54.2
11	113	51.5	68.3	53.8
12	112	50.5	68.1	53.7
13	112	53.4	67.8	53.6
14	111.2	51.9	67.8	53.6
15	111.9	52.8	67.6	53.6
16	112.1	50.5	68.1	53.8
17	112.4	53.9	68.3	54.2
18	112.7	51.6	68.3	54
19	112.9	51.6	68.3	54.3
20	112.9	51.3	68.7	54.3
21	113.1	53.6	68.6	54.1
22	112.7	49.9	68.4	54.6
23	112.7	56.1	69.3	54.7
24	112.4	54.7	69.6	55.1
1	112.7	55	70.1	55.2
2	112.9	55.2	69.8	55.1
3	113.6	56.2	70.1	55.1
4	113.3	57.3	69.8	55.1
5	113.7	57.4	70	55
6	114.3	57	69.6	54.9
7	115	56.7	69.7	53.6
Мин	111.2	49.9	67.6	55.2
Макс	115	57.4	70.1	55.2
Дундаж	112.9	53.8	68.9	54.4
Нэгж	°C	°C	°C	°C



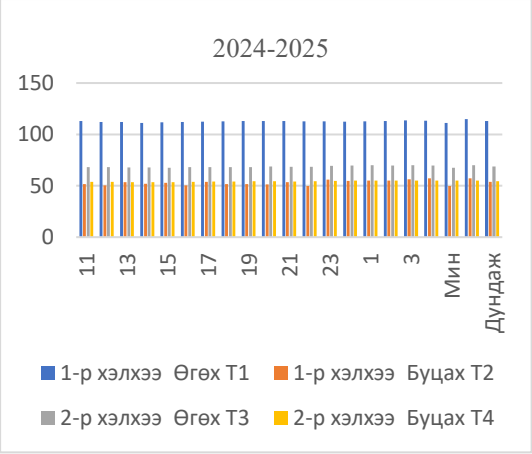
2-Р ХҮСНЭГТ Графикаар харуулав

НОВОТЕЛ ҮЙЛЧИЛГЭЭНИЙ БАРИЛГЫН 2024-2025 ОНЫ 11,12,01 САРД УДДТ-ИЙН ГОРИМЫН МЭДЭЭЛЛИЙГ ҮЗҮҮЛЭВ

3-Р ХҮСНЭГТ

Цаг	1-р хэлхээ		2-р хэлхээ	
	Өгөх Т1	Буцах Т2	Өгөх Т3	Буцах Т4
8	112.8	55.3	69.3	54.7
9	113.3	53.8	69.1	54.5
10	113.1	541.5	68.5	54.2
11	113	51.5	68.3	53.8
12	112	50.5	68.1	53.7
13	112	53.4	67.8	53.6
14	111.2	51.9	67.8	53.6
15	111.9	52.8	67.6	53.6
16	112.1	50.5	68.1	53.8
17	112.4	53.9	68.3	54.2

18	112.7	51.6	68.3	54
19	112.9	51.6	68.3	54.3
20	112.9	51.3	68.7	54.3
21	113.1	53.6	68.6	54.1
22	112.7	49.9	68.4	54.6
23	112.7	56.1	69.3	54.7
24	112.4	54.7	69.6	55.1
1	112.7	55	70.1	55.2
2	112.9	55.2	69.8	55.1
3	113.6	56.2	70.1	55.1
4	113.3	57.3	69.8	55.1
5	113.7	57.4	70	55
6	114.3	57	69.6	54.9
7	115	56.7	69.7	53.6
Мин	111.2	49.9	67.6	55.2
Макс	115	57.4	70.1	55.2
Дундаж	112.9	53.8	68.9	54.4
Нэгж	°C	°C	°C	°C



3-Р ХҮСНЭГТ Графикаар харуулав

Дээрх графикаас харахад 2024, 2025 оны дулаан түгээлтийн тохируулгын горимыг ижил хэмжээнд тохируулсан нь харагдаж байна.

НОВОТЕЛ ҮЙЛЧИЛГЭЭНИЙ БАРИЛГЫН 2024-2025 ОНЫ ЖИЛИЙН ХЭРЭГЛЭЭНИЙ БОДИТ ҮР ДҮНГ ХАРУУЛАВ.

4-Р ХҮСНЭГТ

Сар	2023-2024 оны ачаалалын хэрэглээ		2024-2025 оны ачаалалын хэрэглээ	
10	843	9,290,715.00	307	2,864,986.00
11	1375	14,070,444.00	948	8,831,069.00
12	1943	24,183,792.00	1330	12,390,880.00
1	1872	23,366,209.00	1837	17,114,475.00
2	1768.2	20,531,222.00	1679	15,642,490.00
3	1373	15,907,380.00	1157	10,782,166.00
4	681	9,338,207.00	693	6,455,533.00
5	296	2,757,875.00	308	2,865,452.00
6	191	1,779,905.00	232	2,160,848.00
7	299	2,787,215.00	275	2,561,350.00
8	319	2,977,220.00	305	2,840,770.00
9	948	8,831,069.00	323	3,008,422.00
Нийт	1,052,199.00	97,997,716.00	1E+06	90,834,319.00
Хэмнэлт				



4-Р ХҮСНЭГТ Графикаар харуулав

Тайлбар

Тухайн графикаас харахад барилгын дулаалга хийсэн болон хийхээс өмнөх үеийн дулаан зарцуулалт өөр байгаа бөгөөд үе шаттайгаар сайжруулалтын ажил хийхэд илүү хэмнэлт хийх боломжтой харагдаж байна

X. ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

1. Сайжруулалтын зардал

*• Материалын зардал: 1000 м² * 5000 төгрөг = 5,000,000 төгрөг*

*• Суурилуулалтын зардал: 1000 м² * 10,000 төгрөг = 10,000,000 төгрөг*

• Нийт зардал = 5,000,000 төгрөг + 10,000,000 төгрөг = 15,000,000 төгрөг

2. Эрчим хүчний хэмнэлт

Дулаалга хийхэс өмнө2024 Онд 10521,99Гкал

Дулаалга хийсний дараа 2025 онд

9552,45Гкал

• 1 Гкал = 1,162 кВт·цаг

• Жилийн хэмнэлт (кВт·цаг): 969,54Гкал * 1,162 кВт·цаг = 1,126,605кВт·цаг

3. Эрчим хүч хэмнэх мөнгөн дүн

• 1 кВт·цаг хэмнэхэд 9314 төгрөгийн зардал гарна

• 1,126,605кВт·цаг * 9314 төгрөг/кВт·цаг = 10,493,203 төгрөг (жилийн хэмнэлт)

4. Хөрөнгө оруулалтын эргэн төлөгдөх хугацаа.

• Сайжруулалтын нийт зардал: 15,000,000 төгрөг

• Жилийн хэмнэлт: 10,493,203 төгрөг

• Хөрөнгө оруулалтын эргэн төлөгдөх хугацаа: 15,000,000 төгрөг ÷10,493,203 төгрөг ≈ 1.4 жил

XI. БАЙГАЛЬ ОРЧИНЫ НӨЛӨӨЛӨЛИЙН ТООЦОО

Эрчим хүч хэмнэхээс үүдэлтэй хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулах:

- Жилд хэмнэх эрчим хүч: 1,126,605кВт·цаг
- 1 кВт·цаг хэмнэх нь 0.0007 тонн CO2
- 1,126,605кВт·цаг * 0.0007 тонн CO2/кВт·цаг = 788.62 тонн CO2 ялгаруулалтыг бууруулах

Дулаан алдагдлыг бууруулснаар:

- Хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулж, байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөллийг багасгана.
- Цаг уурын өөрчлөлтөд нөлөөлөхгүй, орчны агаарын бохирдлыг бууруулна.
- Байгаль орчинд сэргээгдэх эрчим хүч ашиглах дэмжлэг үзүүлнэ.

ДҮГНЭЛТ

Шилэн болон чулуун пассат бүхий үйлчилгээний барилгын дулаан алдагдал PS=97,7КЖ буюу 1-р бүсийн дулаан техникийн тооцооны дагуу нормоос давсан хэмжээтэй байна. Энэ нь барилгын эрчим хүчний үр ашгийн ангиллаар 149% буюу D ангиллын хэмнэлттүй барилгын хэмжээнд байна.

Нийт талбайн дулаан алдагдлаараа 1-т төмөр рамтай цонх 36.5%-ыг эзэлж байна. Төмөр рамтай буюу чулуун фасадтай хана, цонхны дулаан алдагдал хүлцэх хэмжээнээс 2 дахин өндөр байгаа нь урд өрөөнүүд хүйтэн байгаагийн шалтгаан болж байна. Шийдвэрлэх: Чулуун фасадын арын дулаалга сайжруулах, давхар цонх хийх аргаар дулаан дамжуулалтыг бууруулах

Нийт талбайн дулаан алдагдлаар 2-т шилэн фасадны хана 30.6%-ыг эзэлж байна. Урд нүүрний хананы дулаан алдагдал хамгийн өндөр байгаа нь битүүмж муутай дулаалсан байгааг харуулж байна. Хана, цонх зэргээр хүйтэн сийгэж мэдэгдэж байна.

БНбД-25-01-20 стандартын шаардлагад нийцүүлэн дулаалсан тохиолдолд хаших хийцээр алдах дулаан алдагдлын хэмжээ тооцоогоор 60 хувь буурч байна.

Шилэн болон чулуун фасад бүхий үйлчилгээний барилгын дулаан алдагдал их хэсгийг сонгон авч шүршдэг хөөсөн дулаалга (Полиуретан) дулаалахад дулаан алдагдаг өмнөх оны мөн үеийнхтэй харьцуулахад тоолуураар хэрэглэсэн бодит дулаан 969,54Гкал бага байна.

Мөн жилд 10,493,203 сая төгрөгийн дулааны эрчим хүчийг хэмнэснээр сайжруулалт шаардсан хөрөнгө оруулалтыг 1.4 жилд нөхөн олох боломжтой юм

Полиуретан дулаалга нь эрчим хүчний хэрэглээг тогтвортой бууруулахад нөлөөлж, хэрэглэгчдэд илүү үр ашигтай шийдэл болж өгч байна. Судалгааны явцад 1000м2 газар дулаалахад дулаан алдагдлыг 25% бууруулж халаалтын системийн ачааллыг бууруулах боломжтой гэдгийг харуулж байна

Эрчим хүч хэмнэхээс үүдэн байгаль орчинд үзүүлэх эерэг нөлөөлөл нь хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулж, дэлхийн дулаарлын эсрэг ихээхэн хувь нэмэр оруулдаг. Жилд 1,126,605кВт·цаг эрчим хүч хэмнэх нь 788.62 тонн CO2 ялгаруулалтыг бууруулахад хүргэдэг. Энэхүү хэмнэлт нь зөвхөн санхүүгийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх төдийгүй, байгаль орчныг хамгаалахад чухал ач холбогдолтой.

Эрчим хүч хэмнэх хөрөнгө оруулалт нь хөрөнгө оруулалтын хурдан нөхөн төлбөрийг хангаж, барилгын ачаалал болон эрчим хүчний хэрэглээг бууруулна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Барилгын дулаан алдагдлыг тодорхойлоход программ хангамж ашиглах боломжийн судалгаа, Нэрбаатар Батбаяр 2023 он

[2] 2024он Оюутаны эрдэм шинжилгээний бага хурал

[3] Барилгын норм ба дүрэм, “Барилгын дулаан хамгаалал”, х. 5-6, [БНбД 25 − 01 − 20], Улаанбаатар, 2020.

[4] Kabała, J., & Baran, L. (2020). "Analysis of the thermal insulation properties of spray polyurethane foam." Materials)

[5]]. Saber, H. H. (2013). "Performance of spray polyurethane foam in exterior insulation finish systems.")

[6] Singh, H., & Jain, A. K. (2009). "Ignition and fire retardancy of polyurethane foams")

[7] Cho, M. S., et al. (2015). "Safety Analysis of Stone Curtain Walls in High-Rise Buildings."

[8]].Ibragimov (2021). "Reconstruction of Stone Facades of High-Rise Buildings

[9]].Ibragimov (2021). "Reconstruction of Stone Facades of High-Rise Buildings

[10] Ibragimov (2021). "Reconstruction of Stone Facades of High-Rise Buildings

[11] “ЭРДМИЙН ЧУУЛГАН 2023” бакалавр, магистр, доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал №23(06)312 Улаанбаатар хот 2023.03.10

[12] http://www.pes.edu.mn/ page/52

УУРЫН ЗУУХНЫ ХАЯГДАЛ ДУЛААНЫГ АШИГЛАХ БОЛОМЖИЙН СУДАЛГАА

Алтангэрэлийн АЛТАНПҮРЭВ[1] Мягмарсүрэнгийн ОЮУН-ЭРДЭНЭ[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулааны хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: aag.altka10@gmail.com[1]

Хураангуй: **Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь үйлдвэрийн уурын зуухны барилгын агаартай хамт алдагдаж буй бага температурын хаягдал дулааны нөөцийг тодорхойлох, түүнийг дулааны насосын технологийн тусламжтайгаар сэргээн ашиглаж захиргааны байрны халаалт болон хэрэглээний халуун усны дулааны хэрэглээг хангах боломжийг үнэлэхэд оршино. Судалгааны хүрээнд уурын зуухны барилгын дотор орчны температурын босоо тархалтыг тодорхойлох хэмжилтийг хэд хэдэн түвшинд 2025 оны 01 дүгээр сарын 20-наас 03 дугаар сарын 05-ны хугацаанд хийж, хэмжилтийн үр дүнд үндэслэн барилгын дотор хуримтлагдсан хаягдал дулааны хэмжээг агаарын солилцооны аргаар тооцоолсон. Мөн сэргээгдэх боломжтой дулааны нөөцийг тодорхойлон дулааны насос ашиглах нөхцөлд захиргааны байрны халаалт болон хэрэглээний халуун усны дулааны хэрэглээтэй харьцуулан үнэлгээ хийсэн. Судалгааны үр дүнд уурын зуухны барилгын агаарт хуримтлагдсан хаягдал дулааныг дулааны насосын технологийн тусламжтайгаар ашигласнаар захиргааны байрны дулааны хэрэглээний ойролцоогоор 65 хувийг хангах боломжтой нь тогтоогдсон. Энэхүү судалгаа нь үйлдвэрийн барилгын дотор орчны агаарт агуулагдах бага температурын хаягдал дулааныг бодит хэмжилтийн өгөгдөлд тулгуурлан тодорхойлж, түүнийг дулааны насосын эх үүсвэр болгон ашиглах боломжийг үнэлснээрээ практик ач холбогдолтой бөгөөд үйлдвэрийн нөхцөлд хэрэгжүүлэх боломжтой дулаан хангамжийн хосолсон системийн шийдлийг тодорхойлохыг зорьсон болно.**

Түлхүүр үг: Хаягдал дулаан, дулааны насос, дулаан солилцоо, уурын зуух.

I. УДИРТГАЛ

Орчин үед эрчим хүчний хэрэглээ өсөн нэмэгдэж, байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийг бууруулах шаардлага өндөрсөж байна. Үйлдвэрийн процессын явцад их хэмжээний хаягдал дулаан үүсдэг бөгөөд энэ нь ихэнх тохиолдолд ашиглагдалгүй орхигдож, эрчим хүчний үр ашгийг бууруулж байна [1]. Тиймээс энэхүү хаягдал дулааныг үр ашигтайгаар дахин ашиглах, дулааны насосны тусламжтайгаар халаалтын болон хэрэглээний халуун усны системд нэвтрүүлэх нь эрчим хүчний хэмнэлт, байгаль орчны тогтвортой хөгжилд чухал ач холбогдолтой юм.

Дулааны насос нь бага температуртай дулааны эх үүсвэрийг ашиглан өндөр температурт шилжүүлэх замаар эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэхэд чиглэгдсэн [2]. Дулааны насос нь өндөр үр ашигтай бөгөөд олон шатлалт үйл ажиллагаагаар дамжуулан хаягдал дулааныг эрчим хүчний хэрэглээнд бүрэн ашиглах боломжийг олгодог [3].

Энэхүү судалгааны ажлаар үйлдвэрийн хаягдал дулааныг дулааны насосны тусламжтайгаар хэрхэн үр ашигтайгаар ашиглаж болохыг тодорхойлох, математик загварчлал ашиглаж эдийн засгийн үр ашгийг тооцоолох зорилго тавигдсан.

Энэхүү судалгаа нь хаягдал дулааныг үр дүнтэй ашиглах технологийн шийдлүүдийг тодорхойлох, дулааны насосны боломжит хэрэглээг үнэлэх, мөн үйлдвэрлэлийн хаягдал дулааныг тогтвортой дулааны эрчим хүчинд шилжүүлэх боломжийг судлахад чиглэгдэж байна.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТ

2.1. Хаягдал дулаан ялгаруулах уурын зуух

Энэхүү судалгааны ажлын объект нь “Ачит-Ихт” ХХК-ийн уурын зуухнаас ялгарч буй хаягдал дулааныг дулааны насосны тусламжтайгаар захиргаа, аж ахуйн байрны халаалтын дулааны хэрэглээнд ашиглах боломжийг судалсан.

Судалгаанд авч үзэж буй уурын зуухнууд нь 2012 онд ашиглалтад орсон **SZL8-1.25-AII** маркийн 4 ширхэг зуухаас бүрдэх бөгөөд **А** блок, **В** блок барилгуудад тус тус байрладаг. Эдгээр зуухнаас ялгарч буй хаягдал дулаан нь яндангийн хий, гадаргын халалт, шугам хоолойн гадаргуугаар алдагдаж байгаа дулааны потенциал бүхий эх үүсвэр юм.

Зуухны блок А нь нийт 8834.4 м³ эзлэхүүнтэй, харин блок В нь 5610.6 м³ эзлэхүүнтэй бөгөөд эдгээрээс ялгарах дулааны хэмжээ нь үйлдвэрийн агаар мандалд алдагдаж буй дулааны нэг гол эх үүсвэр болж байна.



1-р зураг. Уурын зуухны А болон В блок

2.2. Дулааныг сэргээн ашиглах захиргааны байр

Хаягдал дулааныг сэргээн ашиглах замаар “Ачит-Ихт” ХХК-ийн захиргааны байр (4275 м³ эзлэхүүнтэй)-ны жилийн халаалтын болон хэрэглээний халуун усны системийн дулааны хэрэглээг хангах боломжийг судалсан.

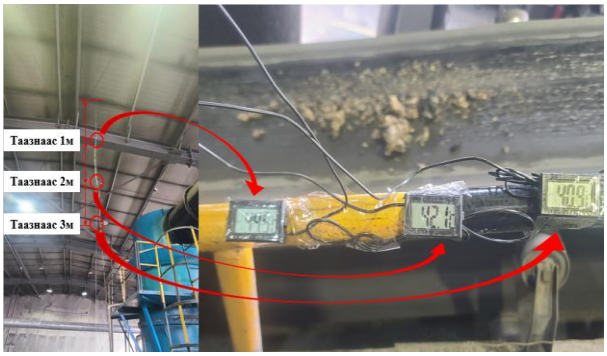


2-р зураг. Захиргааны байр

III. АРГА ЗҮЙ

Энэхүү судалгаанд зуухны хаягдал дулааныг сэргээн ашиглах боломжийг тодорхойлох зорилгоор хэмжилт, математик загварчлал, дулааны тооцооны аргуудыг ашиглав.

Судалгааны эхний шатанд уурын зуухны танхим дахь дулааны тархалтыг тодорхойлох зорилгоор температурын хэмжилтийг босоо чиглэлд гурван түвшинд (таазнаас 1 м, 2 м, 3 м зайд) нийт 6ш мэдрэгчүүдийг байрлуулсан. Хэмжилтийн өгөгдөлд үндэслэн температурын өндрийн дагуух тархалтыг шугаман функц хэлбэрээр илэрхийлж, **T(z)=az+b** хамаарлыг регрессийн аргаар тодорхойлсон. Үүний дараа танхимын дундаж температурыг эзлэхүүнээр интегралчлах аргаар тооцоолж, системийн дулааны төлөвийг тодорхойлсон.



3-р зураг. Таазнаас мэдрэгчүүд байрлуулсан байдал, хэмжилтийн хугацааны температурын график

Дараагийн шатанд танхимын дундаж температурыг суурь температур (18°C)-тай харьцуулан илүүдэл температурыг тодорхойлсон. Үүний үндсэн дээр агаарын солилцооны аргыг ашиглан сэргээгдэх боломжтой дулааныг тодорхойлсон бөгөөд агаарын урсгалын хэмжээг барилгын эзлэхүүн болон агаарын солилцооны коэффициент (АСК)-оор тодорхойлж, дулааны урсгалыг агаарын нягт болон дулаан багтаамжийн үзүүлэлтүүдэд тулгуурлан тооцоолсон.

Мөн уурын зуухны барилгын дулаан алдагдлыг тодорхойлох зорилгоор дулаан дамжуулалтын үндсэн тэгшитгэлийг ашиглан гадна орчинтой харьцах хана, дээвэр болон бусад хийцүүдээр алдагдах дулааныг тооцоолсон. Үүнээс гадна барилгын агаарын шүүрэлтээс үүсэх дулаан алдагдлыг агаарын солилцооны бага коэффициент (АСК=0.5) ашиглан үнэлсэн.

Дээрх тооцооллын үр дүнг нэгтгэн уурын зуухны танхимаас сэргээгдэх боломжтой дулааныг барилгын нийт дулаан алдагдал болон хэрэглээтэй харьцуулж, хаягдал дулааны бодит нөөцийг тодорхойлсон. Үүний үндсэн дээр дулааны насос ашиглах боломжийг үнэлж, системийн үр ашгийг гүйцэтгэлийн коэффициент (COP)-оор илэрхийлэн дүгнэсэн.

IV. ТООЦООНЫ АРГАЧЛАЛ

4.1. Температурын хэмжилтээс илүүдэл температурыг тодорхойлох

Уурын зуухны танхим дахь агаарын температурын босоо чиглэл дэх тархалтыг тодорхойлох зорилгоор гурван түвшинд (таазнаас 1 м, 2 м, 3 м) хэмжилт хийсэн. Хэмжилтийн үр дүнд үндэслэн температурын өндрийн дагуух тархалтыг шугаман хамаарлаар илэрхийлэв:

$$T(z) = az + b \qquad (1)$$

Энд: $T(z)$-z өндөрт дах температур ˚C, a-налуугийн дагуу температурын өсөлт, b-тархалтын шугаман хамаарлын огтлолцлын утга, z-өндрийн координат м

Уурын зуухны танхимын нийт эзэлхүүнд тархсан температурын дундаж утгыг тодорхойлж, хаягдал дулааны тооцооны суурь үзүүлэлт болгож интегралчлах аргыг илэрхийлэв:

$$T_{\text{дун}} = \frac{1}{H}\int_0^H (az + b)\, dz = \frac{aH}{2} + b \qquad (2)$$

Налуугийн дагуу өндрийн өөрчлөлтөөс хамаарч температурын өсөлтийг илэрхийлэв:

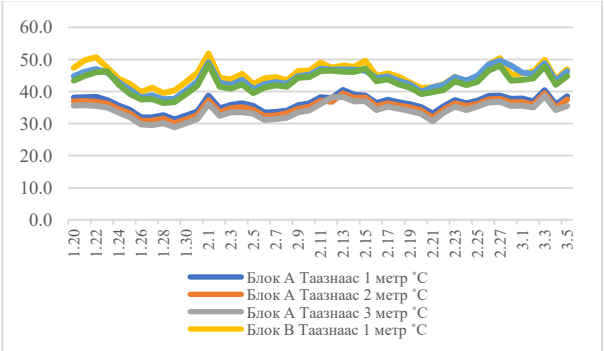
$$T(z) = \frac{\Delta T}{\Delta z} \qquad (3)$$

Харин тархалтын шугаман хамаарлын огтлолцлын утга $b = T - az$ буюу $z = 0$ үед $b = T$ байна.

Зааланд үүсэж буй илүүдэл температурын хэмжээг илэрхийлэв:

$$\Delta T_{\text{илүүдэл}} = T_{\text{дун}} - T_{\text{орчин}} \qquad (4)$$

Энд: $T_{\text{орчин}}$- орчны агаарын суурь температур ˚C



4-р зураг. Таазнаас мэдрэгчүүд байрлуулсан байдал, хэмжилтийн хугацааны температурын график

4.2. Хаягдал дулааны тоо хэмжээг тодорхойлох

Агаарын солилцооны үндсэн томъёо:

$$\dot{Q} = \rho c_p \dot{V} \Delta T \quad (5)$$

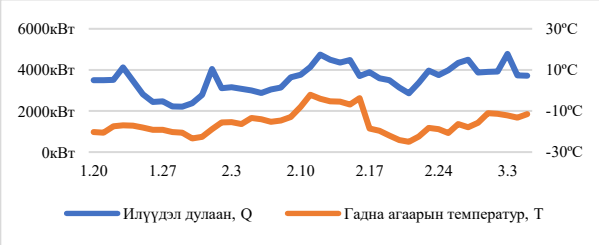
Томъёоны тайлбар

ρ— агаарын нягт (1.2 кг/м³)

c_p— агаарын дулаан багтаамж (1.005 кЖ/кг·К)

$\dot{V}$— агаарын урсгал (м³/с), заалны агаар солилцооны коэффициент (АСК)-оос хамаарч [2] илэрхийлэв:

$$\dot{V} = \frac{АСК * V}{3600} \quad (6)$$

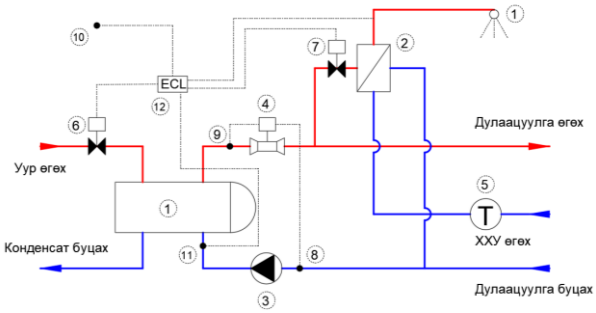


5-р зураг. А болон В блок барилгад үүсэх хоногийн хаягдал дулааныг гадна агаарын температуртай харьцуулсан байдал

Хаягдал дулааны тоо хэмжээний хувьд хэмжилтийн хугацааны температурын утгуудаас хамаарч хоногийн дундаж дулааны тоо хэмжээ **А** блок, **В** блок барилгуудын нийт хэмжээ 3528 кВт*ц гарсан ба хамгийн их хаягдал дулааны тоо хэмжээ нь 2025 оны 02-р сарын 12, 13-ны өдрүүдэд 4600 кВт*ц байсан бол хамгийн бага хаягдал дулааны тоо хэмжээ нь 2025 оны 01-р сарын 26, 27-ны өдрүүдэд 2200 кВт*ц байлаа. Хаягдал дулааны тоо хэмжээ нь гадна агаарын температурын тархалтаас ихээхэн хамааралтай байгааг ***4-р зураг***-аас ажиллагдаж байна.

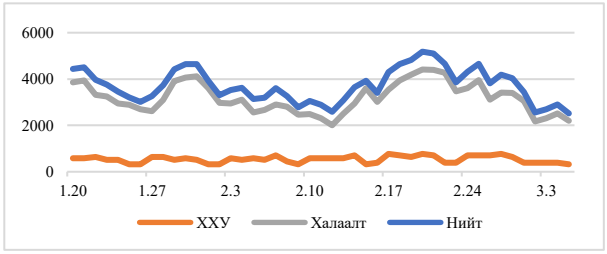
4.3. Ачит-Ихт ХХК-ийн захиргааны байрны дулааны хэрэглээ

Захиргааны байрны дулаацуулга болон хэрэглээний халуун усны жилийн хэрэглээ жил дунджаар 1064 МВт*ц хэрэглээтэй ба үүний 71% халаалтын хэрэглээнд, 29% хэрэглээний халуун ус бэлтгэлд ашиглагдаж байна. ***5-р зураг***т халаалт болон хэрэглээний халуун ус бэлтгэлийн схемийг харуулав.



6-р зураг. Ачит-Ихт ХХК-ийн захиргааны байрны дулаацуулга ХХУ-н схем /1 гуурсан бойлер, 2 ялтсан дулаан солилцуур, 3 эргэлтийн насос, 4 дулааны тоолуур / ТСРВ-033/, 5 ХХУ-н өгөх усны тоолуур, 6,7 автомат хаалт, 8,9,10,11 температур мэдрэгчүүд, 12 ECL автомат тохируулга /RVD145/

Халаалтын хэрэглээнд суурилуулсан 4 дугааараар тэмдэглэсэн дулааны тоолуур /ВЗЛЁТ ТСРВ-033 (ТСРВ-033) дулааны тоолуур/-аар халаалтын хэрэглээний хоногийн хэрэглээг гаргасан ба үүнээс хэрэглээний халуун ус бэлтгэлт нэмэгдэж буй 5 дугаарын тоолуурын тусламжтай хоногийн хэрэглээг тооцож 6-р зурагт үзүүлэв.

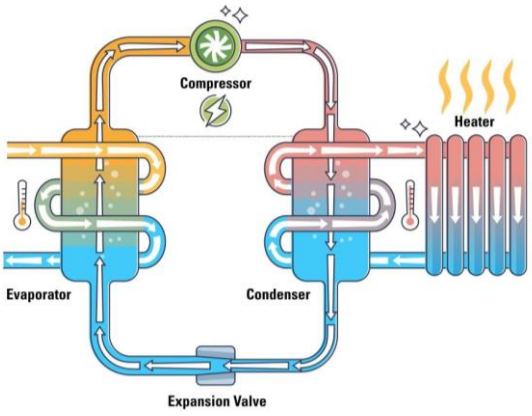


7-р зураг. Захиргааны байрны халаалт болон хэрэглээний халуун усны дулааны хэрэглээ хоногоор

Дээрх графикт уурын зуухны хаягдал дулааныг хэмжих хугацаанд захиргааны байрны халаалтын болон хэрэглээний халууны усны дулааны хэрэглээг ВЗЛЁТ ТСРВ-033 (ТСРВ-033) дулааны тоолууруар тооцож гаргав. Дулааны хэрэглээ нь гадна агаарын температураас хамаарч 3190 кВт*ц хоногт хэрэглэсэн бол хэрэглээний халуун ус бэлтгэлд 536 кВт*ц хоногт дулаан хэрэглэсэн байна. Хэрэглээний халуун усны дулааны хэрэглээний хэлбэлзэл нь ажлын өдөр болон амралтын өдрөөс хамаарч амралтын өдөр 35%-иар буурч байна.

4.4. Дулааны насосын тооцоо

Дулааны насос нь бага температуртай дулааны эх үүсвэрийг олон шатлалтайгаар өндөр температурт шилжүүлэх зориулалттай систем бөгөөд ихэвчлэн бага болон өндөр температурын хоёр мөчлөгөөс бүрддэг [4]. Ийм төрлийн систем нь өндөр температур шаардлагатай халаалтын системүүдэд илүү тохиромжтой бөгөөд үр ашиг өндөртэй байдаг.



8-р зураг. Дулааны насосны энгийн схем.

Уурын зуухны танхимын агаараас авах боломжтой дулааныг тодорхойлохын тулд агаарын эзлэхүүн, температурын зөрүү болон термодинамикийн үндсэн хамаарлыг ашиглан дараах байдлаар тооцоолов [5].

Уршуулагч руу орох агаарын эзлэхүүн:

$$V = 7911 м^3$$

Агаарын дундаж температур:

$$T = 45℃$$

Уршуулагч дээр алдах температур:

$$T_{алд} = 5℃$$

Температурын зөрүү:

$$\Delta T = 40℃$$

Агаарын нягт:

$$\rho = 1.1кг/м^3$$

Агаарын дулаан багтаамж:

$$C_p = 1.005кДж/(кг \cdot К)$$

4.4.1. Агаарын масс

$$m = \rho \cdot V \quad (7)$$

$$m = 8702кг$$

4.4.2. Агаараас авах дулаан

$$Q_0 = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (8)$$

$$Q_0 = 97.2кВт \cdot ц$$

4.4.3. Бодит авах боломжтой дулаан

Дулааны насосны ууршуулагч нь агаараас бүх дулааныг бүрэн авч чаддаггүй тул ашигт үйлийн коэффициентыг η=0.75 гэж авч үзвэл:

$$Q_{бодит} = Q_0 \cdot \eta \quad (9)$$

$$Q_{бодит} = 73кВт \cdot ц$$

4.4.4. Дулааны насосны энергийн баланс

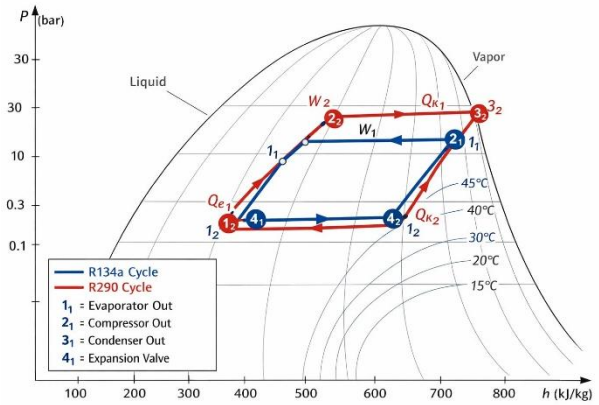
$$Q_к = Q_0 + W \quad (10)$$

Энд:

- $Q_к$-конденсатораас ялгарах дулаан
- Q_0-ууршуулагчийн авсан дулаан
- W-компрессорын цахилгаан чадал

4.4.5. Дулааны насосын ажлын биеийн сонголт, харьцуулалт

Дулааны насосны гүйцэтгэлийн коэффициент (COP) нь системийн үр ашгийг илэрхийлэх үндсэн үзүүлэлт бөгөөд нэгж цахилгаан энерги зарцуулж хэдэн нэгж дулаан гаргаж байгааг тодорхойлдог. Энэ үзүүлэлт нь эх үүсвэр болон хэрэглэгчийн температурын түвшин, тэдгээрийн зөрүүнээс шууд хамаарч өөрчлөгддөг [6]

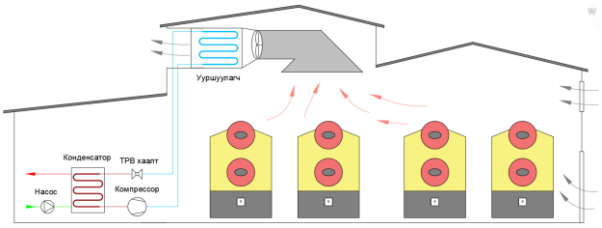


9-р зураг. Хөргөх бодисын P–h диаграмм

1-Р ХҮСНЭГТ. ХӨРГӨЛТИЙН БОДИСЫН ҮНДСЭН ҮЗҮҮЛЭЛТ

Харьцуулсан үзүүлэлт	R134a	R290
COP (бодит)	3.5	4
Дулаан дамжуулалт	R290 ажлын бие R134a-с 10% их	
Байгал орчны нөлөөлөл	GWP=1430 ODP=0	GWP=3 ODP=0
Аюулгүй байдал	Аюулгүй	Шатамхай

Дээрх үзүүлэлтүүдээс хамаарч тооцоололд COP-3.5 тооцов.



10-р зураг. Хаягдал дулааныг сэргээн ашиглах ерөнхий схем

4.4.6. Конденсатораас гарах дулааны хэмжээ

$$Q_к = Q_0 \cdot \frac{COP}{COP-1} \quad (11)$$

$$Q_к = 102.2кВт \cdot ц$$

4.4.7. Компрессорын цахилгаан чадал

$$W = Q_к - Q_0 \quad (12)$$

$$W = 29.2кВт \cdot ц$$

V. ДҮГНЭЛТ

1. Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд уурын зуухны барилгын агаартай хаягдах бага потенциалтай дулааныг тодорхойлон, түүнийг дулааны насосны тусламжтайгаар сэргээн ашиглах боломжийг судаллаа. Хэмжилтийн үр дүнд зуухны танхимын дотор температурын тархалт нь өндрийн дагуу өөрчлөгдөж, тааз орчимд өндөр температур үүсэж байгааг тогтоосон нь дулаан дээш хуримтлагдах физик зүй тогтолтой нийцэж байна.

2. Тооцооллын үр дүнд уурын зуухны А болон В блок барилгуудад 2025 оны 01 дүгээр сарын 20-наас 03 дугаар сарын 05-ны хугацаанд хоногт дунджаар 3528 кВт·ц хаягдал дулаан үүсэж байгааг тогтоосон. Энэ нь цагт 147 кВт гэсэн үг юм. Гэвч энэхүү дулааныг дулааны насосоор бүрэн ашиглах боломжгүй бөгөөд ууршуулагчийн дулаан авах үр ашиг, дулаан солилцооны алдагдлыг харгалзан үзэх шаардлагатай. Иймээс дулааны насосны бодит хангах дулааныг конденсатораас гарах дулаан $Q_к$ нь цагт 102.2кВт байхаар тодорхойлогдсон.

3. Дулааны насосны энергийн баланс болон гүйцэтгэлийн коэффициент (COP≈3.5)-д үндэслэн конденсатораас гарах дулааны хэмжээ нь захиргааны байрны дулааны хэрэглээтэй харьцуулахад үндсэн хэрэглээний 65% хангах боломжтой байна. Энэ нь хаягдал дулааныг шууд хэмжээгээр бус, дулааны

насосоор боловсруулсны дараах ашигтай дулаанаар үнэлэх нь илүү бодитой болохыг харуулж байна.

4. Иймээс уурын зуухны хаягдал дулааныг дулааны насосны тусламжтайгаар сэргээн ашиглах нь барилгын дулааны хэрэглээг хангах үндсэн эх үүсвэр болж, үлдэгдэл дулааныг уурын зуухны уур үйлдвэрлэлээс нөхөх хосолсон системийн шийдэл нь илүү оновчтой болох нь харагдаж байна.

5. Цаашид энэхүү судалгааг илүү нарийвчлалтай судалж зуухны ачааллаас буюу зуухны ажиллах тооноос хамаарч хаягдал дулаан хэрхэн өөрчлөгдөж байгаа мөн барилгын агаар сэлгэлтээс хамаарч хаягдал дулаан өөрчлөгдөж байгааг тооцож судалгааг үргэлжлүүлэх боломжтой байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Woolley, Elliot, Y. Luo ба A. Simeone, “Industrial waste heat recovery: A systematic approach.,” Industrial waste heat recovery: A systematic approach, pp. 50-59, 2018.

[2] Б. Намхайням ба Н. Цолмон, Байгаль орчин эрчим хүч технологи, Улаанбаатар хот, 2014.

[3] Lê, Khoa, “Cascade air-to-water heat pump with and without thermal energy storage: a study for UK domestic retrofit.,” Ulster University, 2020.

[4] Dong, Yixiu ба R. Wang, “When and how to use cascade high temperature heat pump—Its multi-criteria evaluation.,” Energy Conversion and Management 309, p. 118435, 2024.

[5] Б. Ганчимэг, Нам температурын агаар-агаарын дулааны насосын туршилтын судалгаа магистрын ажил, Улаанбаатар хот, 2019.

[6] Opadokun, Olamide, T. X. Yong ба J. Lamb, “A review of waste heat sources for district heating.,” Energy Reports 14, pp. 1051-1070, 2025.

[7] International Energy Agency (IEA), “International Energy Agency (IEA),” (IEA), Paris, 2025.

ШИНЬ ШИНЬ УУРХАЙН ДУЛААНЫ СТАНЦЫН SHX7-1.1/115/70-H МАРКИЙН ЗУУХНЫ ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

Должинсүрэнгийн Балдандорж[1], Жамбалрагчаагийн Мөнхдалай[2],
[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, ДЦС-ын тэнхим
[2] Монгол улс, Улаанбаатар, Дархан ШУТИС, магистрант
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: dbaldandorj@must.edu.mn[1], J.Munkhdalai@yahoo.com[2]

Хураангуй: **“Шинь Шинь уурхайн дулааны станц” SHX7-1.1/115/70-H маркийн нам температурын буцламтгай үет шаталтын (НТБҮШ) технологийн зуухнууд нь Адуун чулууны уурхайн хүрэн нүүрс хэрэглэж байна. Тус дулааны станц нь Шинь Шинь уурхайн хэрэглэгчид дулааны эрчим хүчээр хангах зориулалтаар ашиглалтад орж одоо хүртэл хэрэглэгчдийг найдвартай дулааны эрчим хүчээр хангаж байна. Шинь Шинь уурхайн 3 зуухтай хоёр зуух нь 7МВт хүчин чадалтай хэрэглэгчид дулааны эрчим хүчээр хангаж байгаа усан халаалтын 7 МВт зуух горимын карт тогтоох, шаталтын процесс, агаар түлшний харьцааг зуухны ачааллын харгалзах утгад тохирох гормын карт боловсруулахад туршилтын үндсэн зорилго оршино.**

Түлхүүр үг: Адуун чулуун нүүрс, SHX7-1.1/115/70-H зуухны дулааны тооцоо, зуухны горимын карт, НТБҮШ-ын технологи, илүүдэл агаар, дулааны алдагдал

I. УДИРТГАЛ

Дорнод аймагт 100 МВт-ын ДЦС барих төслийг боловсруулсан. Шинээр баригдах ДЦС нь жилд 909.1 мянган тонн хүрэн нүүрс хэрэглэж, 521.2 сая кВт/цаг эрчим хүч үйлдвэрлэж, 479.5 сая кВт/ц-ийг нь түгээх хүчин чадалтай байх аж. Энэ станцад шаардлагатай нүүрсний хэрэгцээг Адуунчулууны уурхайгаас хангах нь хамгийн тохиромжтой. Дулааны станцын SHX7-1.1/115/70-H маягийн усан халаалтын НТБҮШ технологи бүхий 1 болон 2 дугаар зуухны горимын туршилт тохируулгын ажлыг хийв.

II. ТУРШИЛТЫН ХЭСЭГ

Туршилтын нөхцөл. Адуунчулууны уурхайн нүүрсний техникийн болон элементийн шинжилгээ

ШУА-ийн Хими, хими технологийн хүрээлэн, Нүүрсний хими технологийн лабораторит тус уурхайн нүүрсний элементийн найрлагыг тодорхойлсон байдаг. Үүнд:

ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

Тэмдэглэл	Wr	Ad	Vdaf	Sd	Q_n^r	Cdaf	Hdaf	Ndaf	Odaf
Стандарт	47.7	8	45	0.8	2340	30.5	1.9	0.4	9.7

ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ДҮН

2-Р ХҮСНЭГТ

Тодорхойлолт	Чийг	Үнслэг	Дэгдэмхий	Илчлэг
Тэмдэглэл	W^{ar} %	A^r %	V^{daf} %	Q^{ar}_{net}
Үр дүн	30.81	17.67	41.76	2680

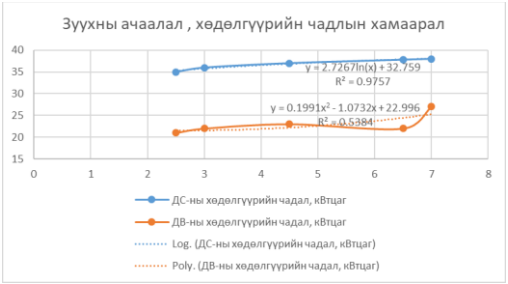
Шинжилгээний үр дүнгээс харахад гадна талбайд удаан хадгалагдсан чийглэг нь ууршиж, үнслэг нь нэмэгдсэн нь хөрс, шорооны хольц нэмэгдсэн.

III. ТУРШИЛТЫН ХЭМЖИЛТИЙН АРГА

НТБҮШ буюу нам температурын эргэлдэх буцламтгай шаталтат

Дээрх технологийн SHX7-1.1/115/70-H маркийн зуух юм. Уг зуух нь хүрэн нүүрсэнд хүчин чадлаа бүрэн авч чадах бөгөөд ямар нэгэн доголдолгүй тогтвортой ажиллах, маневерлах чадвар маш өндөр, 99%-ийн шаталттай.

1 ба 2-р зуухны зуухны хүчин чадал ашиглалтын коэффициент 50% -д хүрэхгүй шахуу байгаа нь ЦЭХ хувийн зарцуулалт харилцан адилгүй байгаа харин суурилагдсан тоноглолын хүчин чадал ижил тул зуухны хүчин чадал ашиглалтын коэффициентыг дээшлүүлснээр 1Гкал дулааны эрчим боловсруулахад зарцуулах ЦЭХ-ний хэмжээ бууруулах станцын үргүй зардлыг бууруулах боломжтой юм.



1-р зураг. Зуухны ачааллын тооцооны график

IV. SHX-7-1.6/130/70-H МАРКИЙН НТБҮШ ЗУУХНЫ ТЕХНИКИЙН ГОРИМЫН КАРТ БОЛОВСРУУЛАЛТ

Тооцооны аргачлал

Тооцооны үр дүнгээр Зуухны АҮК, дулааны алдагдал, гарах утааны хийн температур илүүдэл агаарын коэффициентээс хэрхэн хамаарч байгааг дараах график үзүүлэв. Илүүдэл агаарын коэффициент гэдэг нүүрсийг шатааж байгаа бодит

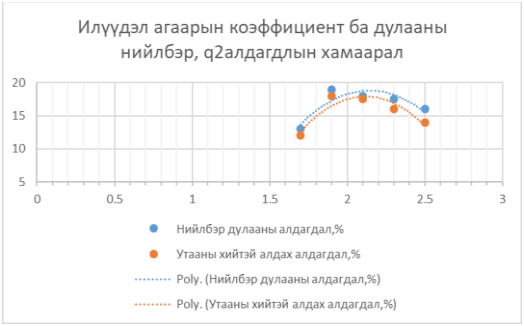
агаарын хэмжээ өөрөөр хэлбэл үлээх салхилуурын ачаалал юм.

ДУЛААНЫ БАЛАНС БУЮУ ДУЛААНЫ АЛДАГДЛЫН ТООЦОО

3-Р ХҮСНЭГТ

8	Үзүүлэлт	Тэмдэглэгээ	Нэгж	1	2	3	4	5	6	Дундаж
1	Утааны хийтэй алдах алдагдал онол	$q_2$on	%	13	14	13	15	14	11	13.1
2	Утааны хийтэйр алдах алдагдал бодит	q_2пр	%	15	16	14	17	15	13	14.9
3	Химийн дутуу шаталтын алдагдал	q_3	%	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
4	Механик дутуу шаталттай алдах дулаан	q_4	%	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
5	Орчиндоо алдах дулааны алдагдал	q_5	%	0.5	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.5
6	Нийлбэр дулааны алдагдал	Σq	%	15.8	17.4	15.5	18.1	16.8	13.9	16.3
7	Зуухны АҮК бохироор	Zk бр	%	84.2	82.6	84.5	81.9	83.2	86.1	83.7
8	Нийт боловс. дулаан	Q_1	Гкал/ц	2.1	2.4	2.3	1.5	1.7	1.666	1.9
9	Түлшний зарц.	Bk	кг/ц	924.2	1064.1	1025	702.9	747.4	722.3	864.3
10	Түлшний тооцоот зарц.	Bp	т/ц	916.8	1055.6	1016.8	697.2	741.4	716.6	857.4
11	Түлшний хувийн зарц.(бодит)	bxэ	кг/гкал	439.7	448	438.1	452	444.9	430	442.1
12	Түлшний хувийн зарцуулалт (жишмэл)		кг/гкал	168.3	171.5	167.7	173	170.3	164.6	169.3

Гарах утааны хийн температур төслийн хэмжээнээс өндөр байгаа нь бодит агаарын хэмжээ их, галын хотлын сийрэгжилт ихэссэнээс болж нэмэгдэж байна. Өөрөөр хэлбэл утаа сорогчийн сорох хэмжээ нь түлж байгаа нүүрс, агаарын хэмжээнээс хэт их байгаагаас шууд хамааралтай байдаг.

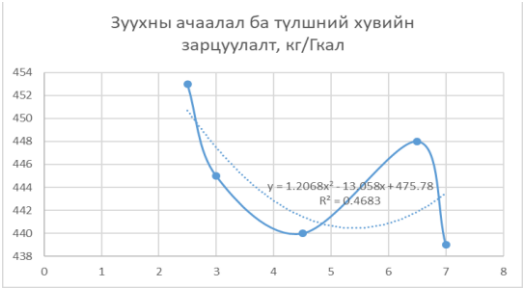


4-р зураг. Дулааны алдагдал



3-р зураг. Зуухны АҮК%, илүүдэл агаарын коэффициент, гарах утааны t°C хамаарлын график

Түлшний хувийн зарцуулалт зуухны ачааллаас хэрхэн хамаарч байгаа дараах графикаас харж болно. Зуухны хүчин чадал ашиглалтын коэффициентийг зуухны төслийн хүчин чадлаар ажиллуулж байж дээшлүүлэх тул хүчин чадлын ашиглалтын коэффициент бага байх тутамд түлшний хувийн зарцуулалт ихсэх болно.

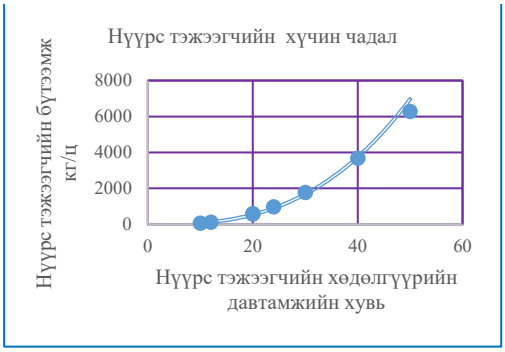


5-р зураг. Түлшний хувийн зарцуулалт

Жишээлбэл: Зуухны ачаалал 4 Гкал/ц байх үеийн нүүрсний илчлэг нь 2000 ккал/кг гэж үзвэл цагт 2400 кг нүүрс түлнэ. Зуухны ачаалал нь 2.5 Гкал/ц нүүрс тэжээгчийн ачаалал 1300кг байжээ гэвэл тухайн үеийн нүүрсний илчлэг нь 2300 ккал/кг байна гэж ойлгоно.

Нүүрс тэжээгчийн бүтээмжийг тодорхойлох нь дараах графикаас нүүрс тэжээгчийн бүтээмжийг тодорхойлох боломжтой. Шинь Шинь уурхайн усан халаалтын зуух нь давтамж хувиргууртай займчин нүүрс тэжээгчтэй. Давтамж хувиргуур нь хувиар илэрхийлэгдэх тул нүүрс тэжээгчийн хүчин чадлыг дараах графикаар тодорхойлж болно. Зуух нь нэг нүүрс тэжээгчтэй ба хэмжилтийн аргаар тооцож үзэхэд хүчин чадал нь 6-7тн/ц байна гэж тооцоолов. Давтамж хувиргагчийн хувийг нэмэгдүүлэхэд хөдөлгүүр хэт ачаалагдах улмаар өөрөө ачааллаа

тохируулан давтамжаа бууруулахаар тохируулагдсан болно.



6-р зураг. Нүүрс тэжээгчийн бүтээмжийг тодорхойлох график

Нүүрсний бункерт байгаа нүүрсний түвшнээр нүүрсний зарцуулалтыг тодорхойлохоос гадна тухайн хэмжээгээр зуухны ачааллыг тодорхойлох боломжтой тооцооны болон хэмжилтийн аргаар тодорхойлсон график бөгөөд бункерийн доошилсон хэмжээгээр зууханд түлсэн нүүрсийг тодорхойлохоос гадна түлсэн нүүрсээр нийт үйлдвэрлэсэн дулааныг тодорхойлж болно.

Утаа сорогч үлээх салхилуурын бүтээмжийг чиглүүлэх аппарат буюу шиберийн онгойлолтоор тодорхойлсон нь тус уурхайн зуухны үлээх салхилуур, утаа сорогчийн бүтээмжийг хүйтэн байдалд хэмжиж тооцов. Тооцооны үр дүнг дараах хүснэгтээр харуулав.

Доорх тооцооноос харахад утаа сорогч, үлээх салхилуурын хүчин чадал Адуун чулууны уурхайн нүүрсний шатааж шаталтын бүтээгдэхүүний сорж хаяхад хүрэлцээтэй байна.

ҮЛЭЭХ САЛХИЛУУРЫН АГААРЫН БҮТЭЭМЖИЙН ТООЦОО

4-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Хэмжих нэгж	Үлээх салхилуур				
Шибер %	%	20	30	40	50	60
Агаарын даралт	кПа	2.6	4.2	6.2	6.7	9.8
Гүйдлийн хүч	А	35	36	40	46	55
Агаарын хурд	м/с	9	10.1	16	16.2	16.5
Хөндлөн огтлолын талбай	м²	0.2486	0.248625	0.24863	0.24863	0.249
Агаарын зарц.	м³/ц	8055.5	9040.005	14320.8	14499.8	14768
Бодит агаарын зарц.	нм³/ц	7635.9	8569.171	13574.9	13744.6	13999

УТАА СОРОГЧИЙН БҮТЭЭМЖИЙН ТООЦОО

5-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Нэгж	Утаа сорогч				
Шиберийн %	%	20	30	40	50	60
Сийрэгжилт	кПа	1.45	1.54	0.89	2.4	2.73
Гүйдлийн хүч	А	45	60	65	68	70
Хийн хурд	м/с	20.1	24	25.2	30.1	31.3
Хөндлөн огтлолын талбай	м²	0.4096	0.4096	0.4096	0.4096	0.4096
Хийн зарц.	м³/ц	29368.66	35389.44	37158.91	44384.26	46153.73
Бодит агаарын зарц.	нм³/ц	26704.14	31885.54	33479.81	39989.78	41584.05

Тооцоог Адуунчулууны уурхайн нүүрсний төслийн болон туршилтын үеийн нүүрстэй харьцуулан тооцов.

АДУУН ЧУЛУУН УУРХАЙН НҮҮРСИЙГ ТҮЛЭХ ТООЦОО *6-Р ХҮСНЭГТ*

№	Үзүүлэлт үүд	Тэмдэглэгээ	Нэгж	Туршилтын үе	Адуун чулуун тослийн	Зөрөө хувь
1	Дулаан гаргах доод чадвар	Qp	ккал/кг	2680	2340	-14.53
2	Хүчилтөрөгч	Op	%	9.7	9.7	0
3	Нүүрстөрөгч	Cp	%	30.5	30.5	0
4	Устөрөгч	Hp	%	1.9	1.9	0
5	Азот	Np	%	0.4	0.4	0
6	Хүхэр	Sp	%	0.8	0.8	0
7	Үнслэг	Ap	%	17	9	-88.889
8	Чийглэг	Wp	%	38.5	47.7	19.287
9	Нийт			98.8	100	
	Онолын агаарын эзлэхүүн	Vo	нм3/кг	2.919	2.919	0
10	Азотын онолын эзлэхүүн	V°N2	нм3/кг	2.309	2.309	0
11	Олон атомт хийн эзлэхүүн	VRO2	нм3/кг	0.575	0.575	0

12	Усны онолын эзлэхүүн	V°H2O	нм3/кг	0.735	0.849	13.431
	Утааны хийн эзлэхүүн	Vr	нм3/кг	3.619	3.733	
13	Утааны хийн эзлэхүүн	Vr	нм3/кг	4.203	4.317	2.643
	Нүүрсний дэгдэмхий хэсэг	Vr	%	45	42	-7.143

Ашиглалтын зөвлөмж.

Нүүрсний агууламж нь төслийн нүүрсний үзүүлэлтээс өөрчлөгдөх үед зуухны ТЭЗҮ-ийн дараах байдлаар өөрчлөгдөж байна. Үүнд: Үнслэг гэдэг нь нүүрсийг шатаахад шатахгүй үлдсэн хатуу хэсгийг хэлдэг. Нүүрсэнд агуулагдаж байгаа үнслэгийг ажлын массаар илэрхийлж өөрчлөгдөх үед зуухны ашигт үйлийн коэффициент, түлшний зарцуулалт хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг зуухны төслийн параметрийг хэвийн хангаж байгаа нөхцлөөр тооцов. Нүүрсэнд агуулагдаж байгаа үнслэгийн агууламж 5-25 хувиар өөрчлөгдөх үед зуухны АҮК 0.21-1.05%-иар, цагт хэрэглэгдэх нүүрсний зарцуулалт 35-177 кг/ц-аар өөрчлөгдөж байгааг доорх хүснэгт болон графикаас харж болно.

Жишээлбэл үнслэгийн хэмжээ 14,2% иар нэмэгдсэнээр цагт 1 Гкал дулаан үйлдвэрлэхээр хэрэглэх түлшний зарцуулалт 99,4 кг/ц-аар нэмэгдэх ба хоногт үйлдвэрлэх дулааны хэмжээнээс хамааарч тийм хэмжээний нүүрсийг илүү зарцуулна.

Нүүрсний дулаан гаргах чадвар гэдэг нь устөрөгч, нүүрстөрөгч, хүхэр нь хүчилтөрөгчтэй урвалд орж их хэмжээний дулаан ялгаруулах хэмжээ юм. Энэ нь зуухны төслийн параметрийг гаргахад маш чухал нөлөө үзүүлдэг болохыг тооцож доорх хүснэгт болон графикаар үзүүлэв. Үүнд: Нүүрсний дулаан гаргах чадвар 100-500 ккал\кг өөрчлөгдөхөд зуухны АҮК 0.035-0.175%-иар, харин түлшний хувийн зарцуулалт 5.63-26.4 кг\ц.тн.уур-аар өөрчлөгдөж тооцооны үр дүнг доорх график болон хүснэгтээр харуулав.

НҮҮРСНИЙ ДУЛААН ГАРГАХ ЧАДВАР

7-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	нэгж	Утга				
Илчлэг 100ккал\кг-аар буурах	ккал\кг	500	400	300	200	100
АҮК %-иар буурах	%	0.175	0.14	0.105	0.07	0.035
Түлшний хувийн зарцуулалт нэмэгдэх	кг\цаг	26.4	20.79	16	10.96	5.63

Жишээлбэл нүүрсний илчлэг 368 ккал/кг-иар буурснаас цагт ашиггүйгээр 1 Гкал дулаан үйлдвэрлэхээр шатаах түлшний зарцуулалт 20,7кг/ц-аар нэмэгдэх ба тонн нүүрс тутмаас дулаан үйлдвэрлэхэд илүү зарцуулах тооцоо гарч байна.

Нүүрсний ажлын чийглэг энэ нь нүүрсэнд агуулагдаж байгаа чийглэг буюу усны хэмжээг илэрхийлнэ. Нүүрсэнд агуулагдаж байгаа ус ууршуулахад тодорхой хэмжээний дулаан шаардлагатай болдог. Зуухны горим параметрт нөлөөхөөс гадна зуухны эд анги үндсэн ба туслах тоноглолыг сонгоход онцгой нөлөө үзүүлж байдаг.Нүүрсний ажлын массын чийглэг зуухны ТЭЗҮ-д хэрхэн нөлөөлж байгааг тооцоолж хүснэгт болон графикаар үзүүлэв. Үүнд: нүүрсэнд агуулагдаж байгаа чийглэг нь 5-25% өөрчлөгдөх зуухны АҮК 0.14-1.51%-иар, түлшний хувийн зарцуулалт 0.31-1.51 кг\тн.уур–аар өөрчлөгдөж байгааг доорх хүснэгт болон графикаар үзүүлэв.

НҮҮРСНИЙ ЧИЙГЛЭГИЙН АГУУЛАМЖ

8-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	нэгж	Утга					
Нүүрсний чийглэг 5% хувиар ихсэх	%	5	10	15	20	25	
АҮК %-иар буурах	%	0.14	0.28	0.42	0.56	0.7	
Түлшний хувийн зарцуулалт нэмэгдэх	кг\тн.уур	0.31	0.61	0.91	1.21	1.51	

Жишээлбэл нүүрсний чийглэгийн агууламж 20,25 хувиар нэмэгдсэнээр 1Гкал дулаан үйлдвэрлэхэд зарцуулах шахаах түлшний зарцуулалт 1,22кг/ц-аар нэмэгдэх ба ийм хэмжээний чийг буюу усны уурыг сорж зайлуулах утаа сорогчийн хүчин чадал нэмэгдэх бөгөөд үүнд зарцуулах цахилгаан эрчим хүчний хувийн зарцуулалт нэмэгдэж байна.

ДҮГНЭЛТ

Зуухны үйлдвэрлэгчийн ашиглалтын зааварт зааснаар нүүрсний фракцын хэмжээ нь 00-10 мм байх ёстой. Бодит байдалд бункерт татаж байгаа нүүрсний ширхэгжилт нь хэт том хэмжээтэй 20 мм-ээс дээш гарах үед 60 мм байгаа нь галын хотлын нүүрсийг үеийн материалтай хамт буцалгах анхдагч агаарын горимд ихээхэн өөрчлөлт гарч улмаар галын хотол дахь шаталтын бүтээгдэхүүний даралт, температурын горим өөрчлөгдөн зуухны параметрт сөргөөр нөлөөлнө.

Анхдагч агаарын хэмжээ 1кг нүүрсийг буцалгах агаар болон шатаахад зарцуулах онолын болон тооцоот зарцуулалтаас их байгаагаас шалтгаалан шаталтын бүтээгдэхүүн буюу утааны хийн зарцуулалтын хэмжээ их болж галын хотол, сүүлийн хэсгийн халах гадаргуугаар дамжин өнгөрөх хийн утааны хурд ихсэж дулаан шингээлтээр ус халаахад зарцуулах хугацаа богиносож гарах утааны хийн температур нэмэгдэж байна.

Галын хотлын сийрэгжилтийг /-50/ Па-аас ихгүй байх нь утаа сорогчийн ачааллыг хөнгөлөхөөс гадна сүүлийн хэсгийн халах гадаргуугаар дайран өнгөрөх утааны хийн хурдыг багасгаж, хугацааг уртасгаж байгаа нь сүүлийн хэсгийн халах гадаргууд утааны хийгээс дамжих дулаан солилцоог нэмэгдүүлнэ.

Нүүрсний техникийн үзүүлэлтээс харахад нүүрс тээвэрлэлтийн үед чийглэг алдагдаж үнслэг нэлээд хэмжээгээр нэмэгдсэн нь нүүрсэнд механик хольц их байгаа нь үеийн зузаан огцом нэмэгдэж галын хотлын шаталтын горимыг тогтворгүй болгож байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Д.Балдандорж. (2019). *Зуухны дулааны тооцооны нормчлолын арга.* Улаанбаатар .

[2] Д.Балдандорж. (2021). *Уурын генераторын ашиглалт.* Улаанбаатар.

[3] Д.Балдандорж. (2024). Улаанбаатар.

[4] Д.Балдандорж. (2024). *Шинь Шинь уурхайн зуухны туршилтын тайлан* .

[5] С.Батмөнх. (2010). *Конвекцийн дулаан солилцоо.* Улаанбаатар.

[6] Д.Мандал. (2012). *Уурын генератор.* Улаанбаатар.

[7] *Түлшний* шаталтын *онолын үндэс ба галын хотлын төхөөрөмж* . (2024).

[8] Блок управления печью Техническое описание и (2019)

[9] Наладка режима горения технологических печей. (2000).

[10] Промышленные печи и тепловые агрегаты. Проведение и контроль выполнения пуско-наладочных работ. (1995).

ЦАГДААГИЙН БАЙГУУЛЛАГЫН БАРИЛГЫН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ХЭРЭГЛЭЭНИЙ ХЭВ МАЯГ БА ХЭМНЭЛТИЙН СТРАТЕГИ

Хүрлээгийн ӨСӨХБАЯР[1], Эрдэнэбатын МӨНХТУЯА[2]

[1,2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Шинэ сэргээгдэх эрчим хүчний тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: e.munkhtuya@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Төрийн байгууллагын барилга байгууламжийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ тасралтгүй өсч байгаа нь эрчим хүчний үр ашиг, зардлын хяналтыг сайжруулах шаардлагыг бий болгож байна. Энэхүү судалгааны зорилго нь Цагдаагийн ерөнхий газрын барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний бүтцийн онцлог, хэрэглээний хэв маяг, эрчим хүч хэмнэх боломжийг тодорхойлох явдал юм. Судалгаанд барилгын бодит цахилгаан хэрэглээ, тоног төхөөрөмжийн ашиглалт, ажилтнуудын хэрэглээний дадлыг судалгаагаар цуглуулж, статистик болон харьцуулалтын аргаар дүн шинжилгээ хийсэн. Үр дүнгээр барилгын цахилгаан хэрэглээ тасралтгүй, тогтвортой өндөр түвшинд байгаа нь тодорхой болов. Үүнд гэрэлтүүлгийн систем, мэдээллийн технологи, холбоо мэдээллийн төхөөрөмж, агааржуулалтын систем голлон нөлөөлж байв. Ажилтнуудын судалгаагаар олонх нь эрчим хүчний хэрэглээний талаар ойлголттой, эрчим хүч хэмнэх арга хэмжээг дэмждэг боловч хэрэглээний хяналт, автомат удирдлагын систем нэвтрүүлээгүй байгааг илэрхийлсэн. Судалгааны үндсэн дүнгийн дагуу LED гэрэлтүүлэг, хөдөлгөөн мэдрэгч, автомат удирдлагын систем, компьютер болон бусад цахилгаан төхөөрөмжийн оновчтой ашиглалт, барилгын эрчим хүчний удирдлагын систем (BEMS), нарны цахилгаан системийг ашигласнаар барилгын цахилгаан хэрэглээг 15–30% хүртэл бууруулах боломжтой болохыг тогтоосон. Энэхүү судалгааны үр дүн нь цагдаагийн байгууллагын барилгын цахилгаан хэрэглээг оновчтой удирдах, эрчим хүчний менежмент хөгжүүлэх, бодлого төлөвлөлт хийхэд практик ач холбогдолтой бөгөөд эрчим хүч хэмнэх стратеги боловсруулах суурь судалгаа болно.**

Түлхүүр үг: Төрийн байгууллагын барилга, Эрчим хүчний менежмент, Эрчим хүчний үр ашиг, Цахилгаан ачааллын шинжилгээ, ногоон технологи

I. ОРШИЛ

Дэлхий нийтээр эрчим хүчний хэрэглээ тасралтгүй өсөж байгаа бөгөөд барилга байгууламжийн салбар нийт эрчим хүчний хэрэглээний ойролцоогоор 40%-ийг эзэлж байна [1]. Төрийн байгууллагын барилга нь байнгын үйл ажиллагаатай, олон төрлийн тоног төхөөрөмж ашигладаг онцлогтой тул цахилгаан хэрэглээ өндөр байдаг.

Барилгын цахилгаан хэрэглээ нь гэрэлтүүлэг, халаалт, агааржуулалт, мэдээллийн технологийн төхөөрөмжийн ажиллагаанаас шууд хамаардаг. Судалгаагаар гэрэлтүүлгийн систем нь нийт хэрэглээний гол хэсгийг эзэлдэг бөгөөд LED гэрэлтүүлэг, автомат мэдрэгч, ухаалаг удирдлагын системийг ашигласнаар хэрэглээг 26–80% хүртэл бууруулах боломжтой болохыг олон улсын судалгаанууд харуулж байна [2].

Мөн ухаалаг удирдлагын систем, IoT технологи, автомат мэдрэгч бүхий гэрэлтүүлгийн системийг ашигласнаар хэрэглэгчийн ачааллаас хамааран цахилгаан хэрэглээг илүү оновчтой удирдаж, эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжтой [4]. Барилгын эрчим хүчний удирдлагын систем (BEMS) нь хэрэглээний мэдээллийг бодит цаг хугацаанд хянаж, эрчим хүчний үр ашгийг дээшлүүлэх, шийдвэр гаргалтыг оновчтой болгох чухал хэрэгсэл болж байна [3].

Цагдаагийн байгууллагын барилга нь 24 цагийн тасралтгүй ажиллагаатай бөгөөд сервер, мэдээллийн технологи, холбооны систем, хяналтын төхөөрөмжүүдийг байнга ашигладаг тул бусад төрийн барилгуудтай харьцуулахад цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ өндөр байдаг. Иймээс эдгээр барилгын цахилгаан эрчим хүчний бүтэц, хэрэглээний хэв маягийг судлах нь эрчим хүчний үр ашиг, хэмнэлтийн арга хэмжээг тодорхойлоход чухал ач холбогдолтой юм.

Цахилгаан хэрэглээний үр ашгийг дээшлүүлэх нь зөвхөн төсвийн хэмнэлт төдийгүй байгаль орчинд үзүүлэх эерэг нөлөөллийг нэмэгдүүлэх ач холбогдолтой. Сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийг ашигласнаар CO_2 ялгарлыг бууруулах, эрчим хүчний аюулгүй байдлыг хангах боломжтой бөгөөд энэ нь олон улсын “ногоон барилгын” стандарт, ESG (Environment, Social, Governance) үзүүлэлтүүдэд нийцдэг [4].

Энэхүү судалгааны зорилго нь Цагдаагийн ерөнхий газрын барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний бүтэц, хэрэглээний хэв маягийг тодорхойлж, эрчим хүч хэмнэх боломжийг үнэлэхэд оршино.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТЫН ТУХАЙ

Энэхүү судалгаанд цагдаагийн байгууллагын барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний өнөөгийн байдал, хэрэглээнд нөлөөлж буй хүчин зүйлсийг тодорхойлох, эрчим хүч хэмнэх боломжийг үнэлэх зорилгоор статистик болон харьцуулалтын аргыг ашигласан. Судалгаанд ашигласан өгөгдөлд 2025 оны 01 дүгээр сарын 01-ээс 10 дугаар сарын 30-ны хоорондох цахилгаан хэрэглээ, төлбөрийн баримт, барилгад ашиглагдаж буй тоног төхөөрөмжийн мэдээллийг цуглуулж өгөгдлийг боловсруулсан.

Түүнчлэн ажилтнуудын эрчим хүчний хэрэглээний хандлага дадлыг тодорхойлох зорилгоор Лайкертын 5 түвшинт шкал бүхий асуулгын судалгаа явуулсан. Судалгаанд нийт 71 ажилтан цахим

хэлбэрээр оролцсон бөгөөд тэдний өдөр тутмын цахилгаан хэрэглээний дадал, компьютер болон бусад төхөөрөмжийг унтраах эсэх, өрөөн дэх гэрлийг хэрхэн зохистой ашиглаж байгааг, мөн эрчим хүч хэмнэх арга хэмжээг дэмжих хандлагыг үнэлсэн.

Судалгааны гол чиглэлүүд нь:

- Барилгын цахилгаан хэрэглээний бүтцийн онцлог, улирлын хэлбэлзлийг тодорхойлох;
- Цахилгаан хэрэглээнд нөлөөлж буй гол хүчин зүйлсийг судлах;
- Ажилтнуудын эрчим хүч хэмнэх зан төлөв, дадлыг үнэлж, зохих менежментийн арга хэмжээг санал болгох байв.

Бид цуглуулсан өгөгдлийг статистик боловсруулалт, хүснэгт, график харьцуулалтаар шинжилж, цахилгаан хэрэглээний бүтэц, улирлын хэлбэлзэл болон гол нөлөөлөх хүчин зүйлсийг тодорхойлсон. Мөн ажилтнуудын эрчим хүч хэмнэх дадал, хандлагыг үнэлж, байгууллагын менежментийн стратегийг боловсронгуй болгох боломжийг судалсан.

Энэхүү арга зүй нь барилгын цахилгаан хэрэглээг үнэлж, хэмнэлтийн боломжийг тодорхойлох, эрчим хүчний үр ашиг, оновчтой менежментийн арга хэмжээг боловсруулахад практик ач холбогдолтой.

III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

1. Барилгын эрчим хүчний хэрэглээ

Сүүлийн жилүүдэд барилга байгууламжийн эрчим хүчний хэрэглээ дэлхийн хэмжээнд эрчим хүчний нийт хэрэглээний томоохон хэсгийг эзэлж байгаа бөгөөд эрчим хүчний үр ашигтай хэрэглээг нэмэгдүүлэх асуудал тулгарч байна. Ялангуяа нийтийн болон төрийн байгууллагын барилга байгууламж нь цахилгаан хэрэглээ өндөртэй байдаг тул түүний үр ашгийг нэмэгдүүлэх шаардлагатай [5].

Нийтийн болон захиргааны зориулалттай барилгын цахилгаан хэрэглээ нь барилгын талбайн хэмжээ, ажиллагсдын тоо, ажлын цагийн горим, орчны температур, тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын горим зэрэг хүчин зүйлээс шууд хамаардаг байна [6]. Судалгаагаар төрийн байгууллагын оффисын барилгуудад агааржуулалтын систем, гэрэлтүүлэг, мэдээллийн технологийн тоног төхөөрөмжийн ашиглалт нь цахилгаан хэрэглээний хамгийн том хэсгийг эзэлдэг болохыг тогтоосон [7].

2. Барилгын эрчим хүчний менежмент

Барилгын эрчим хүчний менежмент нь эрчим хүчний хэрэглээг үр ашигтай удирдах, хэрэглээг бууруулах, байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийг багасгах цогц арга хэмжээний систем юм. Энэхүү системд барилгын цахилгаан хэрэглээний бүтэц, тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын горим, автомат удирдлагын систем зэрэг олон хүчин зүйлсийг судалдаг.

Сүүлийн үеийн судалгаанд барилгын эрчим хүчний хэрэглээг бууруулахад барилгын дулаан техникийн сайжруулалт, ухаалаг удирдлагын систем, автоматжуулалтын технологи чухал үүрэгтэй болохыг онцолж байна [8]. Орчин үеийн IoT технологи, ухаалаг барилгын системүүд нь барилгын хэрэглээг бодит цаг хугацаанд хянах, хэрэглээний хэв маягийг тодорхойлох боломжийг олгож, оновчтой менежмент хийх суурь болдог.

Манай судалгаанд шинэ санаа нь ажилтнуудын эрчим хүч хэмнэх хандлага, санаачилгад төвлөрч байгаа явдал юм. Судалгаанд нийт 71 ажилтан цахим хэлбэрээр хамрагдсан бөгөөд тэдний өдөр тутмын цахилгаан хэрэглээний дадал, тоног төхөөрөмжийг унтраах, гэрэлтүүлгийг зохистой ашиглах болон эрчим хүч хэмнэх санаачилгыг үнэлсэн. Үүний үр дүнд ажилтнуудын мэдлэг, дадал нь барилгын эрчим хүчний менежментийг оновчтой болгоход чухал нөлөөтэй болохыг тодорхойлсон.

Энэхүү арга зүй нь барилгын цахилгаан хэрэглээний бүтэц, улирлын хэлбэлзэл, гол нөлөөлөх хүчин зүйлсийг тодорхойлж, ажилтнуудын эрчим хүч хэмнэх дадал, хандлагыг үнэлж, удирдлагын стратегийг боловсронгуй болгоход практик ач холбогдолтой юм. Мөн LED гэрэлтүүлэг, автомат мэдрэгч, BEMS систем, нарны цахилгаан систем суурилуулах зэрэг арга хэмжээг хэрэгжүүлэх боломжийг судлах юм.

IV. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ҮР ДҮН

Энэхүү судалгаанд Цагдаагийн байгууллагын барилгын 2025 оны 01 дүгээр сарын 01-нээс 10 дугаар сарын 30-ны хоорондох хугацааны цахилгаан хэрэглээний өгөгдөл ашигласан бөгөөд барилгын бодит цахилгаан хэрэглээ, төлбөрийн мэдээлэл, тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын байдал болон ажилтнуудын эрчим хүч хэмнэх талаарх ойлголт, хандлагын судалгааг хамруулсан.

Ажилтнуудын эрчим хүчний хэрэглээний зан төлөвийг тодорхойлох зорилгоор Лайкертын 5 түвшинт шкал ашигласан асуулгын судалгааг явуулж, нийт 71 ажилтан цахим хэлбэрээр оролцсон.

A. Барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ

Судалгаанд Цагдаагийн ерөнхий газрын Стратеги, бодлого, инновац, хөгжлийн нэгжийн барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний бодит мэдээллийг ашиглан шинжилгээ хийсэн. Байгууллагын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний тайлан, төлбөрийн мэдээлэл болон цахилгаан хэрэглээний статистик үзүүлэлтүүдэд үндэслэн боловсруулалт хийж, хэрэглээний ерөнхий бүтэц, хэлбэлзлийг тодорхойлсон.

Судалгааны хугацаанд барилгын нийт цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ 238,408 кВт.ц, нийт цахилгааны төлбөр 82,846,150 төгрөг байсан байна. Сарын дундаж хэрэглээ ойролцоогоор 23,800 кВт.ц байсан бөгөөд сарын хамгийн өндөр хэрэглээ 26,550 кВт.ц, хамгийн бага хэрэглээ 20,062 кВт.ц байсан. Сарын хэрэглээ харилцан адилгүй байгаа нь тус байгууллага цагдаагийн байгууллагын хэмжээнд дахин инженерчлэлийг хийх боломжийг судлахаар төрийн болон төрийн бус байгууллагуудтай хамтарсан ажлын хэсгийг өөрийн байранд байрлуулж

ажиллуулсантай холбоотой цахилгаан хэрэглээнд өөрчлөлтүүд ороход нөлөөлсөн гэж үзсэн.

БАРИЛГЫН САРЫН ЦАХИЛГААН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ХЭРЭГЛЭЭ

1-Р ХҮСНЭГТ.

Сар	Хэрэглээ (кВт.ц)	Төлбөр (сая төгрөг)
1	25,223	8.4
2	22,585	7.6
3	21,805	7.4
4	26,550	8.9
5	22,768	7.7
6	23,473	8.0
7	20,062	6.9
8	26,110	8.7
9	23,379	7.9
10	26,449	8.8

Хэрэглээний хэлбэлзэл нь улирлын нөхцөл, барилгын үйл ажиллагааны ачаалал болон ашиглагдаж буй тоног төхөөрөмжийн онцлогоос хамаарч байгааг харуулж байна. Тус байгууллагын үйл ажиллагаа 24 цагийн тасралтгүй горимоор явагддаг бөгөөд серверийн төхөөрөмж, мэдээллийн технологийн систем болон холбоо мэдээллийн тоног төхөөрөмжүүд байнгын ажиллагаатай байдаг нь барилгын цахилгаан эрчим хүчний суурь хэрэглээг бүрдүүлж байна. Иймээс барилгын эрчим хүчний үр ашгийг дээшлүүлснээр хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулах бодлогын чухал чиглэл болно [9]. Барилгын эрчим хүчний хэрэглээг бууруулахад эрчим хүчний хэмнэлттэй технологи, удирдлагын ухаалаг систем, мөн хэрэглэгчийн зан төлөвийг харгалзан үзсэн нэгдсэн арга хэмжээ шаардлагатай гэж үздэг [10].

Үүнээс гадна байгууллагын эрчим хүчний хэрэглээг бууруулахад зөвхөн техник тоног төхөөрөмжийн шинэчлэл бус, хэрэглээний удирдлага, ажилтнуудын эрчим хүч хэрэглэх зан төлөвийг харгалзан үзэх нь зүйтэй юм.

B. Ажилтнуудын эрчим хүчний хэрэглээ, дадал, хандлага

Сүүлийн үеийн судалгаанууд барилгын эрчим хүчний хэрэглээ нь зөвхөн барилгын хийц, инженерийн системээс хамаарахгүй бөгөөд барилгыг ашиглаж буй хүмүүсийн зан төлөв, өдөр тутмын хэрэглээний дадлаас ихээхэн шалтгаалдаг болохыг харуулж байна. Тухайлбал, ажилтнуудын үйл ажиллагааны хуваарь, ажлын горим, гэрэлтүүлгийн ашиглалт, цахилгаан тоног төхөөрөмжийн хэрэглээ зэрэг нь барилгын нийт эрчим хүчний хэрэглээнд мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлдэг болохыг судлаачид тогтоосон байдаг [11]. Иймээс барилгын эрчим хүчний хэрэглээг оновчтой болгоход зөвхөн техникийн шийдлээс гадна хэрэглэгчийн зан төлөвт суурилсан менежментийн арга хэмжээг хэрэгжүүлэх шаардлагатай. Нөгөө талаас барилгын эрчим хүчний хэрэглээг бууруулахад ухаалаг удирдлагын систем болон эрчим хүчний хэрэглээг бодит цаг хугацаанд хянах технологи чухал үүрэг гүйцэтгэдэг. Судалгаануудын үр дүнгээс харахад барилгын ухаалаг удирдлагын систем, эрчим хүчний ачааллын оновчлолын алгоритм, бодит цагийн тарифын мэдээлэлд суурилсан удирдлагын арга нь цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ болон оргил ачааллыг бууруулахад үр дүнтэй болохыг харуулж байна [12].

Иймээс барилгын эрчим хүчний хэрэглээг бууруулах, эрчим хүчний үр ашгийг дээшлүүлэхийн тулд эрчим хүчний хэмнэлттэй технологи, ухаалаг удирдлагын систем, хэрэглэгчийн зан төлөвийн менежмент гэсэн гурван үндсэн чиглэлийг хослуулан хэрэгжүүлэх шаардлагатай гэж олон улсын судалгаанууд дүгнэж байна [13].

Цагдаагийн байгууллагын барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ болон эрчим хүч хэмнэлтийн талаарх ажиллагсдын ойлголт, хандлагыг тодорхойлох зорилгоор Лайкертын 5 түвшинт шкал ашигласан асуулгын судалгаа явуулсан.

Судалгаанд нийт 71 ажилтан оролцсон бөгөөд эрчим хүчний хэрэглээний талаарх мэдлэг, гэрэлтүүлгийн хэрэглээний дадал, цахилгаан төхөөрөмжийн ашиглалт болон эрчим хүч хэмнэх хандлагыг үнэлсэн.

Эрчим хүчний хэрэглээний мэдлэг: Судалгаанд оролцогчдын 65% нь байгууллагын эрчим хүчний хэрэглээний талаар тодорхой ойлголттой гэж хариулсан бол 20% нь дунд зэрэг мэдлэгтэй, 15% нь хангалтгүй мэдлэгтэй гэж үнэлсэн байна. Энэ нь байгууллагын ажилтнуудын дийлэнх нь эрчим хүчний хэрэглээний ач холбогдлыг ойлгож байгаа боловч мэдлэгийг нэмэгдүүлэх сургалт, мэдээллийн хэрэгцээ байгааг харуулж байна.

Гэрэлтүүлгийн хэрэглээ: Ажиллагсдын 58% нь өрөөнөөс гарахдаа гэрлийг унтраадаг гэж хариулсан боловч 27% нь заримдаа мартдаг гэж хариулсан нь эрчим хүчний хэмнэлтийн дадал бүрэн тогтоогүй байгааг илэрхийлж байна.

Цахилгаан төхөөрөмжийн хэрэглээ: Судалгаанд оролцогчдын 72% нь компьютер болон оффисын тоног төхөөрөмжийг ажлын дараа унтраадаг гэж хариулсан бол 18% нь standby горимд үлдээдэг гэж хариулсан байна. Энэ нь цахилгаан эрчим хүчний үр ашиггүй хэрэглээ үүсэх нэг шалтгаан болж байна.

Эрчим хүч хэмнэх хандлага: Судалгаанд оролцогчдын 80% нь байгууллагын хэмжээнд эрчим хүч хэмнэх арга хэмжээг дэмжиж байгаагаа илэрхийлсэн нь байгууллагын дотоод бодлогоор эрчим хүчний менежментийн систем нэвтрүүлэх боломж өндөр байгааг харуулж байна.

Судалгааны үр дүнгээс харахад ажилтнуудын эрчим хүч хэмнэх талаарх ойлголт харьцангуй сайн байгаа боловч хэрэглээний бодит дадалд бүрэн хэвшээгүй байгаа нь ажиглагдсан. Иймд байгууллагын хэмжээнд эрчим хүчний хэрэглээг хянах, удирдах системийг нэвтрүүлэх нь зүйтэй юм.

C. Эрчим хүч хэмнэх боломжийн судалгаа

Судалгааны үр дүн, барилгын ашиглалтын онцлог болон ажилтнуудын хэрэглээний дадалд үндэслэн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг бууруулах үндсэн боломжуудыг тодорхойлсон.

Гэрэлтүүлгийн системийн шинэчлэл: Судалгааны үр дүнгээс харахад байгууллагын барилгын гэрэлтүүлгийн систем нь цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний тодорхой хувийг эзэлж байна. Ялангуяа тасалгааны гэрэлтүүлэг, коридор болон нийтийн талбайн гэрэлтүүлэг нь олон цагийн турш тасралтгүй ажилладаг онцлогтой.

Уламжлалт люминесцент гэрлийг LED-т шилжүүлэхэд 30–50% хэмнэлт боломжтой. Хөдөлгөөн мэдрэгч, автомат удирдлагатай системийг нэвтрүүлснээр шаардлагагүй үед гэрлийг унтраах боломжтой.

Цахилгаан төхөөрөмжийн хэрэглээний оновчлол: Судалгааны үр дүнгээс харахад компьютер болон оффисын тоног төхөөрөмжийн хэрэглээ байгууллагын цахилгаан хэрэглээний чухал хэсгийг бүрдүүлж байна.

Компьютер, хэвлэгч болон бусад төхөөрөмжийг ажлын дараа бүрэн унтраах, автомат унтрах тохиргоо хийх, эрчим хүчний хэмнэлттэй төхөөрөмж ашиглах зэрэг арга хэмжээг хэрэгжүүлснээр 10–15% хүртэл цахилгаан эрчим хүчний хэмнэлт гаргах боломжтой.

Эрчим хүчний удирдлагын систем (BEMS): Барилгын эрчим хүчний хэрэглээг бодит цаг хугацаанд хянах, хэрэглээний хэв маягийг тодорхойлох зорилгоор барилгын эрчим хүчний удирдлагын систем (Building Energy Management System – BEMS) нэвтрүүлэх боломжтой. Судалгаагаар ийм төрлийн системийг нэвтрүүлснээр барилгын нийт цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг 10–20% хүртэл бууруулах боломжтой гэж үздэг..

Нарны цахилгаан систем ашиглах боломж: Барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг бууруулах нэг үр дүнтэй арга нь сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэр ашиглах явдал юм.

Судалгаанд байгууллагын барилгын цахилгаан хэрэглээний статистик мэдээлэлд үндэслэн нарны цахилгаан систем суурилуулах боломжийг тооцоолсон.

Судалгааны объектын дээврийн талбайн хэмжээ нь 761 м.кв бөгөөд уг талбайд байрлуулах болох нарны PV хавтангийн тоо 210 ширхэг байх тул доорх тооцоог гаргасан.

НАРНЫ ЦАХИЛГААН СИСТЕМИЙН ҮНДСЭН ТООЦОО

2-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Утга
Сарын дундаж цахилгаан хэрэглээ	23,800 кВт.ц
Өдрийн дундаж хэрэглээ	793 кВт.ц
Өдрийн цагийн хэрэглээ (60%)	476 кВт.ц
Шаардлагатай PV системийн чадал	127 кВт
Нэг хавтангийн чадал	605 Вт
Нийт PV системийн хэмжээ	210 ширхэг

Нарны PV системийг ашигласнаар барилгын өдрийн цахилгаан хэрэглээний ойролцоогоор 60%-ийг сэргээгдэх эрчим хүчээр хангах боломжтой. Энэ нь цахилгааны зардлыг бууруулах, байгаль орчны нөлөөллийг багасгах, эрчим хүчний тогтвортой хэрэглээг дэмжих давуу талтай.

ЭРЧИМ ХҮЧ ХЭМНЭХ БОЛОМЖИЙН ҮНЭЛГЭЭ

3-Р ХҮСНЭГТ.

Арга хэмжээ	Хэмнэлтийн боломж
LED гэрэлтүүлэг	30–50%
Тоног төхөөрөмжийн хэрэглээний оновчлол	10–15%
BEMS систем	10–20%
Нарны цахилгаан систем суурилуулах	Өдрийн хэрэглээний 60%

Эдгээр арга хэмжээг үе шаттайгаар хэрэгжүүлснээр байгууллагын барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг мэдэгдэхүйц бууруулах, эрчим хүчний менежментийг сайжруулах, улмаар байгууллагын үйл ажиллагааны зардлыг бууруулах боломжтой юм.

ДҮГНЭЛТ БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Энэхүү судалгаагаар Цагдаагийн байгууллагын барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний өнөөгийн байдал, хэрэглээний бүтэц болон эрчим хүч хэмнэх боломжийг тодорхойлон судаллаа. Судалгаанд барилгын цахилгаан хэрэглээний статистик мэдээлэл, тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын нөхцөл, мөн ажилтнуудын эрчим хүчний хэрэглээний хандлага, дадлыг тодорхойлох асуулгын судалгааны үр дүнг ашигласан болно.

Судалгааны үр дүнгээс дараах үндсэн дүгнэлтүүдийг гаргав.

Нэгдүгээрт, байгууллагын барилгын нийт цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ судалгааны хугацаанд 238,408 кВт·ц байсан бөгөөд сарын дундаж хэрэглээ 23,800 кВт·ц байна. Байгууллагын үйл ажиллагаа 24 цагийн тасралтгүй горимоор явагддаг тул сервер, мэдээллийн технологийн тоног төхөөрөмж, холбоо мэдээллийн системүүдийн байнгын ажиллагаа нь барилгын суурь цахилгаан хэрэглээг бүрдүүлж байна. Энэ нь төрийн байгууллагын барилгын цахилгаан хэрэглээ харьцангуй өндөр болохыг харуулж байна.

Хоёрдугаарт, ажилтнуудын эрчим хүчний хэрэглээний талаарх мэдлэг, хандлага харьцангуй сайн байгаа боловч бодит хэрэглээний дадал бүрэн тогтоогүй байгааг судалгааны үр дүн харуулсан. Судалгаанд оролцсон ажилтнуудын тодорхой хэсэг нь өрөөнөөс гарахдаа гэрэлтүүлгийг унтраах, ажлын дараа цахилгаан төхөөрөмжийг бүрэн унтраах зэрэг эрчим хүч хэмнэх энгийн дадлыг тогтмол мөрдөхгүй байгаа нь барилгын эрчим хүчний хэрэглээнд тодорхой хэмжээгээр нөлөөлж байна. Иймээс ажилтнуудын хэрэглээний зан төлөв, дадлыг сайжруулах нь барилгын эрчим хүчний хэрэглээг бууруулахад чухал хүчин зүйл болох нь харагдаж байна.

Гуравдугаарт, барилгын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг бууруулахад гэрэлтүүлгийн системийг орчин үеийн дэвшилтэт технологид бүрэн шилжүүлэх, цахилгаан тоног төхөөрөмжийн ашиглалтыг оновчтой болгох, барилгын эрчим хүчний удирдлагын систем (BEMS) нэвтрүүлэх зэрэг техникийн болон менежментийн арга хэмжээнүүд авах нь зүйтэй. Эдгээр арга хэмжээг хэрэгжүүлснээр барилгын нийт цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг 15–30 хувиар бууруулах боломжтой.

Дөрөвдүгээрт, барилгын цахилгаан хэрэглээний статистик мэдээлэлд үндэслэн 127 кВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан систем суурилуулснаар барилгын өдрийн цахилгаан хэрэглээний 60 хүртэл хувийг сэргээгдэх эрчим хүчээр хангах боломжтой гэж тооцоолсон. Энэ нь барилгын цахилгаан хэрэглээний тодорхой хэсгийг сэргээгдэх эрчим хүчээр хангах, улмаар цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний зардлыг бууруулах, нүүрстөрөгчийн ялгарлыг багасгах боломжтойг харуулж байна.

Тавдугаарт, энэхүү судалгааны шинэлэг тал нь байгууллагын барилгын эрчим хүчний хэрэглээг зөвхөн техникийн талаас бус, ажилтнуудын хэрэглээний зан төлөв, эрчим хүч хэмнэх хандлага, санаачилгатай уялдуулан судалсанд оршино. Судалгаанд нийт 71 ажилтан цахим хэлбэрээр оролцсон бөгөөд тэдний өдөр тутмын цахилгаан хэрэглээний дадал, тоног төхөөрөмжийг унтраах хэвшил, гэрэлтүүлгийг зохистой ашиглах байдал болон эрчим хүч хэмнэх санаачилгыг үнэлсэн. Үүний үр дүнд ажилтнуудын мэдлэг, хэрэглээний дадал, байгууллагын соёл нь барилгын эрчим хүчний менежментийг оновчтой болгоход чухал нөлөөтэй болохыг тодорхойлсон.

Иймээс байгууллагын барилгын эрчим хүчний хэрэглээг бууруулахад эрчим хүчний хэмнэлттэй технологи, ухаалаг удирдлагын систем болон ажилтнуудын хэрэглээний дадлыг сайжруулах менежментийн арга хэмжээг цогцоор нь хэрэгжүүлэх шаардлагатай байна. Мөн байгууллагын хэмжээнд эрчим хүчний хэрэглээг тогтмол хянах, ажилтнуудын эрчим хүч хэмнэх мэдлэг, оролцоог нэмэгдүүлэх сургалт, урамшууллын тогтолцоог хэрэгжүүлэх нь үр дүнтэй арга хэмжээ болно.

Цаашид барилгын эрчим хүчний хэрэглээг илүү нарийвчлан судлах, бодит цагийн мониторингийн систем, ухаалаг хэмжилтийн технологи нэвтрүүлэх, мөн сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийг ашиглах боломжийг өргөжүүлэх нь эрчим хүчний хэрэглээг бууруулах, байгууллагын үйл ажиллагааны зардлыг хэмнэх, байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөллийг багасгахад чухал ач холбогдолтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] A. Ortiz-Peña, A. Honrubia-Escribano, and E. Gómez-Lázaro, “Electricity consumption and efficiency measures in public buildings: A comprehensive review,” *Energies*, vol. 18, no. 3, 2025.

[2] B. L. Ahn, C. Y. Jang, S. B. Leigh et al., “Effect of LED lighting on the cooling and heating loads in office buildings,” *Energy and Buildings*, Elsevier.

[3] Zhang, J. Building energy consumption analysis and measures: a case study from an administration building in Chengdu, China. *Energy Inform* **7**, 78 (2024). https://doi.org/10.1186/s42162-024-00384-6

[4] M. Fang, M. S. Misnan, and N. H. F. A. Halim, “A systematic literature review on energy efficiency analysis of building energy management,” *Buildings*, vol. 14, 2024.

[5] J. Zhang, “Building energy consumption analysis and measures: a case study from an administration building in Chengdu,” *Energy Informatics*, 2024.

[6] Thongtalung, P., Wongsapai, W., Damrongsak, D., Wattakawigran, G., & Lekgamheng, N. (2022). Policy investigation and evaluation of electricity utilization comparison between public and private office buildings in Thailand. *Energy Reports*, *8*, 827–833. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.100

[7] Ma, H., Du, N., Yu, S., Lu, W., Zhang, Z., Deng, N., & Li, C. (2016). Analysis of typical public building energy consumption in northern China. *Energy and Buildings*, *136*, 139–150. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.037

[8] Liu, X., Sun, H., Han, S., Han, S., Niu, S., Qin, W., Sun, P., & Song, D. (2022). A data mining research on office building energy pattern based on time-series energy consumption data. *Energy and Buildings*, *259*, 111888. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111888

[9] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008

[10] A. Allouhi, Y. El Fouih, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli, and Y. Mourad, “Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 109, pp. 118–130, 2015.

[11] D. Yan, W. O’Brien, T. Hong, X. Feng, H. B. Gunay, F. Tahmasebi, and A. Mahdavi, “Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges,” *Energy and Buildings*, vol. 107, pp. 264–278, 2015.

[12] F. Oldewurtel, A. Ulbig, A. Parisio, G. Andersson, and M. Morari, “Reducing peak electricity demand in building climate control using real-time pricing and model predictive control,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 2085–2097, 2013.

[13] A. Allouhi, Y. El Fouih, T. Kousksou, A. Jamil, Y. Zeraouli, and Y. Mourad, “Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 109, pp. 118–130, 2015.

ТҮЛШНИЙ ШАТАЛТ ДЭМЖИН УТААНЫ ХИЙН БОХИРДОЛЫГ БУУРУУЛАХ “ГОРМИКС” БҮТЭЭГДЭХҮҮНИЙГ БАГА ЧАДЛЫН УС ХАЛААХ ЗУУХАНД ТУРШСАН ДҮН

Самбуугийн ДУГАРСҮРЭН[1], Авирмэдийн ТҮМЭНБАЯР[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Дулааны цахилгаан станцын тэнхим, Зуухны туршилт, судалгааны төв

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: dugaraasambuu@gmail.com[1]

Хураангуй: **Хатуу түлшний шаталт сайжруулах зориулалттай “Гормикс” бүтээгдэхүүнийг түлшинд хольж агаарт ялгарах хорт бодисуудыг багасган утааны хэмжээг бууруулах зорилгоор 1 тн нүүрсэнд 500г байхаар хольж дотоодод үйлдвэрлэгдсэн бүрэн гар ажиллагаатай бага чадлын ус халаах зууханд туршилтыг хийж гүйцэтгэлээ. Туршилтыг Баянтээгийн нүүрсэн дээр хийсэн ба түүний техникийн шинжилгээ болон шаталтаас үүссэн шаарга, нарийн үнсэнд агуулагдах дутуу шаталтын хэмжээг “Амгалан дулааны станц” ТӨХК-ийн түлшний лабораторид шинжлүүллээ. Нүүрсний шинжилгээний дүнгээр Баянтээгийн нүүрсний чийглэг 5.28-5.71% буюу харьцангуй бага байсан бол дулаан гаргах доод чадвар нь 5953-5940 ккал/кг буюу өндөр үзүүлэлттэй гарсан. Гормикс бүтээгдэхүүнийг удаан хугацаагаар ашиглах тохиолдолд тухайн нүүрсний дутуу шаталтын хэмжээ шаарга, провал, уносны хувьд эрс багассан. Баянтээгийн нүүрсний шаталтаас үүсэн дутуу шаталтын дээжний шинжилгээгээр гормикс хэрэглэсэн зуухан дахь түлшний шаталтаас үүсэх механик дутуу шаталтын дулааны алдагдал нь 36.94%-иар буурсан байна. Мөн уг бүтээгдэхүүнийг хэрэглэснээр утааны хийд агуулагдах бохирдуулагч бодис болох нүүрстөрөгчийн дан исэл 1.59-2.25 дахин, азотын исэл 1.15-1.29 дахин, хүхрийн исэл 1.1-1.33 дахин буурсан үзүүлэлттэй байгааг тогтоолоо.**

Түлхүүр үг: Гормикс, Баянтээгиин нүүрс, утааны хийн бохирдуулагч бодис, дутуу шаталт

I. УДИРТГАЛ

ОХУ-д үйлдвэрлэгдсэн “Гормикс” бүтээгдэхүүн нь хатуу түлшний шаталт сайжруулах замаар агаарт ялгаруулах хорт бодисыг бууруулж түлшний эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэх зориулалттай байгаль орчинд сөрөг нөлөөгүй хуурай нунтаг, байгалийн эрдэс бодисуудын холимог юм. Энэхүү бүтээгдэхүүнийг түлшинд хольж түлснээр “масс солилцооны процесс” явагдаж түлшний шаталтыг дээд хэмжээнд хүргэж нэмэлт эрчим хүч бий болгож агаарт ялгарах хорт бодисууд багассанаар утааны хэмжээ эрс буурдаг болохыг ОХУ болон Монголын эрдэмтэд 20 орчим жилийн туршилт судалгаагаар харуулжээ. Гормиксын бас нэг давуу тал нь ДЦС, ДС, уурын зуух, халаалтын зуух, хог шатаах зуух, бүх төрлийн ахуйн зуух зэрэг бүх төрлийн зууханд ашиглах бүрэн боломжтой юм [1].

Баянтээгийн нүүрсний ордыг 1962 оноос ашиглаж эхэлсэн бөгөөд 2019 оны байдлаар 5520 мян/тн нүүрс олборлон хэрэглэгчдэд нийлүүлжээ. Хөрс хуулалтын дундаж коэффициент 1.27 м^3/тн байна. Үйлдвэрлэлийн нөөцийн тооцоонд бохирдлыг 1.6 хувь, хаягдлыг 3.2 хувь байхаар тооцоолоход үйлдвэрлэлийн нөөц нь A+B+C 20,796.6 мян.тн нүүрс байхаар байна. Хөрс хуулалтын коэффициент дунджаар 3.5 м^3/тн байна. Уулын ажлыг олон жилийн турш нүүрсний гарш хэсгийн дагуу нийтдээ 5.4 км урттайгаар явуулжээ. Ил уурхай нь жилд хамгийн ихдээ 300-400 мян.тн нүүрс олборлох хүчин чадалтай байхаар тооцож үзэхэд 50 гаруй жил ашиглах боломжтой байна [2].

БАЯНТЭЭГИЙН НҮҮРСНИЙ ЕРӨНХИЙ МЭДЭЭЛЭЛ

1-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Төслийн нүүрс	Нүүрсний үзүүлэлтийн хүрээ
Нийт чийглэг (хуурайгаар шатаахад)	10%	Их 15% (урьдчилсан)
Чийг (агаарт хатаасан байхад)	7.2%	Их 11.0%* Их 8.94%
Дэгдэмхий (агаарт хатаасан байхад)	35.7%	Бага 35.01%
Үнс (агаарт хатаасан байхад)	15.2%	Их 46.0%* Их 18.86%
Нүүрстөрөгчийн агууламж (агаарт хатаасан байхад)	41.9%	Их 46.0%* Их 44.85%
Түлшний зэрэг (FC/VM)	1.18	1.12-1.26
Бутлагдах чадвар	60.4%	Бага 55.3%
Нийт хүхэр (агаарт хатаасан байхад)	1.06%	Их 0.8%* Их 1.34%
Шатаахад (Дулаан гаргах дээд чадвар)	5,809 ккал/кг	Бага 4,993 ккал/кг * Бага 5,440 ккал/кг
Агаарт хатаасан (Дулаан гаргах дээд чадвар)	5,976 ккал/кг	Бага 5,790 ккал/кг
Хатаасан (Дулаан гаргах дээд чадвар)	6,443 ккал/кг	Бага 6,160 ккал/кг

Баянтээгийн уурхайн нүүрсний төслийн үзүүлэлтүүдийг 2-р хүснэгтэд үзүүллээ.

БАЯНТЭЭГИЙН НҮҮРСНИЙ ҮНСНИЙ ЕРӨНХИЙ ШИНЖИЛГЭЭ

2-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Төслийн нүүрс	Нүүрсний үзүүлэлтийн хүрээ
Үнс		
Хэв гажилт үүсэх	1.473°C	Бага 1.320°C
Дугуй үүсгэх	1.480°C	Бага 1.340°C
Хагас дугуй үүсгэн хайлах	1.483°C	Бага 1.350°C
Хайлж урсах	1.493°C	Бага 1.380°C
Үнсний шинжилгээ		

Si02	44.43%	38.12 - 48.20%
Al203	32.92%	25.13 - 38.64%
Fe203	4.05%	1.90 - 6.87%
CaO	5.51%	1.72 - 11.09%
MgO	1.19%	0.28 - 2.16%
Na20	0.34%	0.16 - 0.70%
K20	0.51%	0.34 - 0.72%
S03	4. 61%	0.98 - 8.85%
Ti02	0. 72%	0.63 - 0.77%
P205	3.51%	1.95 - 4.39%
Бусад	2.21%	17.6%
Нунтаглагдах хэмжээ / мм/		
>50	4.7%	Их 18%
50-25	10.4%	6.5-14.6%
25-12.5	22.6%	8.6-40.7%
12.5-4.75	26.5%	20.8-33.9%
4.75-2	14.9%	9.8-22.7%
2-1	7.5%	2.4-13.0%
1-0.25	8.4%	1.9-17.6%
0.25-0.15	1.8%	0.5-4.3%
0.15-0.07	1.2%	0.5-2.2%
<0.07	2%	0.3-1.4%

Гормиксийг урьд нь гадна дотнын хэд хэдэн газар туршигдаж байснаас дотоодод Булганы ДС, Улаанбаатар хотын Хэсэгчилсэн Инженерийн Хангамжийн Удирдах Газрын харьяа Чингэлтэй дэд бүтцийн төвийн халаалтын зуух болон аймаг сумдын халаалтын зуух мөн нийслэлийн зарим дүүргүүдийн айл, өрхүүдийн зууханд тус тус туршигдаж байжээ.

Тиймээс энэхүү туршилтаар бид түлшний шаталт дэмжин утааны хийн бохирдлыг бууруулах “Гормикс” бүтээгдэхүүнийг дотоодод үйлдвэрлэгдсэн бүрэн гар ажиллагаатай зууханд нүүрстэй хольж түлснээр шаталтаас үүсэх утааны хийн бохирдуулах бодис доторх нүүрсхүчлийн дан исэл, азотын ислийн бууралтыг тодорхойлох, зуухаар халж гарах сүлжээний усны гарах температурын өсөлтийг хэмжихийг зорилоо.

II. СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

ОХУ-д патендлагдсан Гормикс бүтээгдэхүүнийг Баянхонгор аймгийн төвд байрлах “Рашаант хайрхан” ХХК-ийн эзэмшлийн дотоодод үйлдвэрлэгдсэн бүрэн гар ажиллагаатай, хуучирсан БЗИУ-100 маягийн зууханд турших ажлыг 2026 оны 01-р сарын 10, 11, 12-ны өдрүүдэд биечлэн, 01-р сарын 13-19-ны өдрүүдэд зайнаас цахимаар болон дүрс бичлэгээр туршилтын мэдээллийг авч нийт 10 хоногийн хугацаанд хийж гүйцэтгэлээ.

Энэхүү туршилтыг хийхдээ шаталтаас үүсэх утааны хийн бохирдлын хэмжилтийг гормиксгүй, гормикстэй гэсэн байдлаар хийсэн бөгөөд хэмжилтийг TESTO 350 зөөврийн хэмжүүрээр хэмжсэн.

Мөн Баянтээгийн нүүрсний зарцуулалт болон гормикс бүтээгдэхүүнийг 1 тн түлшинд 500 гр хольж түлсэн судалгааны тоо баримтыг уг бүтээгдэхүүнийг хэрэглэсэн “Рашаант хайрхан” ХХК-аас ирүүлсэн мэдээтэй харьцуулан гаргасан.

Туршилтад тухайн бүс нутгийн гол нүүрсний орд болох Баянтээгийн нүүрсэн дээр туршилтыг хийсэн ба түүний техникийн шинжилгээ болон шаталтаас үүссэн шаарга, нарийн үнсэнд агуулагдах дутуу шаталтын хэмжээг “Амгалан дулааны станц” ТӨХК-ийн түлшний лабораторид шинжлүүлсэн [3].

III. ҮР ДҮН

1. Нүүрсний шинжилгээний үр дүн

Баянтээгийн нүүрсний ажлын чийглэг 5.28-5.71% буюу харьцангуй бага байгаа ба харин ажлын үнслэг нь 13.46-13.77%, дэгдэмхий эд 40.67-41.03%, хүхэр 0.9%, дулаан гаргах доод чадвар нь 5953-5940 ккал/кг байгаа нь сайн нүүрс болох нь 3-р хүснэгтээс харагдаж байна.

БАЯНТЭЭГИЙН НҮҮРСНИЙ ТЕХНИКИЙН ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ДҮН

3-Р ХҮСНЭГТ

Дээж №	War (%)	Wa (%)	Aad (%)	Aar (%)	Vdaf (%)	Vad (%)	Sdb (%)	Sad (%)	Qadb (ккал/кг	Qnetar (ккал/кг
1	5.28	0.42	14.15	13.46	40.67	47.61	0.9	0.9	6579	5953
2	5.71	0.33	14.55	13.77	41.03	48.21	0.9	0.9	6601	5940

2. Нүүрсний дутуу шаталтын дүн

Тухайн нүүрсний дутуу шаталтын хэмжээ шаарга, провал, уносны хувьд Гормикс бүтээгдэхүүнийг 1, 2 хоног ашигласан үеийнхтэй харьцуулахад удаан хугацаагаар буюу 7 хүртэл хоног ашиглах тохиолдолд харьцангуйгаар эрс багасаж байгааг 4-р хүснэгтэд үзүүлэв.

БАЯНТЭЭГИЙН НҮҮРСНИЙ ШАТАЛТААС ҮҮСЭН ДУТУУ ШАТАЛТЫН ДЭЭЖНИЙ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ДҮН

4-Р ХҮСНЭГТ

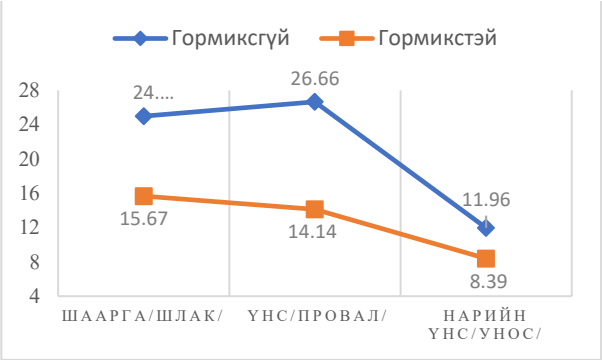
№	Дээж авсан сар, өдөр	Гормикс хэрэглэсэн, эс хэрэглэсэн дутуу шаталтын хэлбэр	Дээж авсан байршил	Дутуу шаталт (%)	Дундаж утга, %
1	1/10	Гормиксгүй шаарга/шлак/	Галын хотол	24.42	24.99
2	1/13			27.3	
3	1/16			24.37	
4	1/12	Гормикстэй шаарга/шлак/		13.62	15.67
5	1/11			15.57	
6	1/13			27.3	
7	1/16			24.37	
8	1/17			4.41	
9	1/18			9.02	
10	1/10	Гормиксгүй үнс/Провал/	Зуухны ар	26.66	26.66
11	1/12	Гормикстэй үнс/Провал/		11.09	14.14
12	1/10			18.55	
13	1/11			21.95	
14	1/16			7.45	
15	1/17			10.98	
16	1/14			16.87	
17	1/15			7.79	

18	1/18			11.73	
19	1/10	Гормиксгүй нарийн үнс/Унос/	Яндан гийн өмнө	8.04	11.96
20	1/15			15.88	
21	1/14	Гормикстэй нарийн үнс/Унос/		11.45	8.39
22	1/15			6.4	
23	1/11			11.11	
24	1/18			5.98	
25	1/16			9.19	
26	1/13			7.15	
27	1/17			9.41	

Түлшний шаталтаас үүссэн дутуу шаталтын шинжилгээний дүнг гормикстой, гормиксгүй гэсэн байдлаар тус бүрд нь тэдгээрийн дундаж утгаар харьцуулан дараах графикаар харууллаа.

ТҮЛШНИЙ ДУТУУ ШАТАЛТЫН ДЭЭЖНИЙ ХАРЬЦУУЛСАН ҮР ДҮН

1-Р ГРАФИК



Гормикс хэрэглэсэн ба хэрэглээгүй үеийн дутуу шаталтын шинжилгээний дундаж утгуудын харьцуулалтаас харахад гормикс хэрэглэсэн тохиолдолд шаарагд 37.3%-иар, провал буюу зуухны сүүлийн хэсгээс гарах үнсний хувьд 46.9%-иар, яндангийн өмнөх нарийн үнс 29.9%-иар гормиксгүй үеийнхээс буурсан байгаа нь энэ бүтээгдэхүүний нөлөө гарч байгааг харуулж байна. Эдгээрээс хамааран зуухан дахь түлшний шаталтаас үүсэх механик дутуу шаталтын дулааны алдагдал нь 3.14%-иас 1.98% болон багасаж байгаа буюу 36.94%-иар буурч байна. Үүнээс үзэхэд уг бүтээгдэхүүнийг нүүрстэй хольж түлэхэд механик дулаан алдагдлын зөрүү болох 1.16% хэмжээгээр зуухны ашигт үйлийн коэффициент өсөж, түлшний цагийн зарцуулалт, жишмэл түлшний дулааны хувийн зарцуулалт зэрэг нь буурах нөхцөлийг бий болгож байна.

Гормикс бүтээгдэхүүнийг хэрэглэсний дараагаар шаталтаас үүсэх дутуу шатсан үнсний өнгө хар бараан байдаг бол илүү цайрсан байдалтай болсныг 1-р зурагт харууллаа.





1-р зураг. Түлшний шаталтаас үүссэн дутуу шаталтын хэсэг болох провал, уносны харагдах байдал

3. Утааны хийн бүтцийн шинжилгээний дүн

Гормикс ашиглаагүй дан Баянтээгийн нүүрс түлж, турших туршилтыг 01-р сарын 10-ны өдөр хийж, 4 цаг гаруйн хугацаанд хэмжихэд утааны хийд агуулагдах хүчилтөрөгчийн хэмжээ 10.56-15.98%, нүүрстөрөгчийн давхар исэл 4.79-9.04% байхад бохирдуулагч хий болох нүүрстөрөгчийн дан исэл 151-550 ppm, азотын исэл 102.1-146 ppm, хүхрийн давхар исэл 80-274 ppm байж, харин яндангаар хаягдах утааны хийн температур 250-310°C, галын хотол дахь дөлний температур 1060-1100°C байжээ.

ГОРМИКС АШИГЛААГҮЙ БАЙХ ҮЕИЙН УТААНЫ ХИЙН БҮТЦИЙН ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ДҮН

5-Р ХҮСНЭГТ

Хийн бүтэц	Хэмжилтийн дугаар						
	1	2	3	4	5	6	7
O_2	10.56 %	11 %	12.6 %	11.7 %	11.56 %	13.32 %	12.15 %
CO	162 ppm	170 ppm	163 ppm	151 ppm	170 ppm	249 ppm	258 ppm
CO_2	9.04 %	8.12 %	7.49 %	8.74 %	8.74 %	6.68 %	8.16 %
NOx	125 ppm	106 ppm	112.1 ppm	114.2 ppm	127 ppm	136.1 ppm	146 ppm
NO_2	0.1 ppm	0 ppm	0.1 ppm	0.2 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0 ppm
SO_2	246 ppm	238 ppm	205 ppm	138 ppm	221 ppm	210 ppm	242 ppm

5-Р ХҮСНЭГТИЙН ҮРГЭЛЖЛЭЛ

Хийн бүтэц	Хэмжилтийн дугаар							Дундаж
	8	9	10	11	12	13	14	
O_2	15.89 %	15.98 %	15.96 %	15.75 %	14.73 %	14.15 %	13.86 %	13.52 %
CO	421 ppm	400 ppm	385 ppm	398 ppm	486 ppm	550 ppm	503 ppm	319 ppm
CO_2	4.91 %	5.12 %	4.79 %	5.02 %	6.08 %	6.54 %	6.35 %	6.841 %
NOx	109.1 ppm	110.1 ppm	109 ppm	110 ppm	102.1 ppm	137.1 ppm	141.1 ppm	120.4 ppm
NO_2	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0.093 ppm
SO_2	136 ppm	125 ppm	99 ppm	80 ppm	97 ppm	255 ppm	274 ppm	183.3 ppm

Гормикс бүтээгдэхүүнийг нүүрстэй хольж туршсан туршилтын утааны хийн хэмжилтийн үр дүнгүүдийг нэгтгэн 6-р хүснэгтэд харууллаа.

ГОРМИКС АШИГЛАСАН БАЙХ ҮЕИЙН УТААНЫ ХИЙН БҮТЦИЙН ШИНЖИЛГЭЭНИЙ ДҮН

6-Р ХҮСНЭГТ

Хийн бүтэц	Хэмжилтийн дугаар						
	1	2	3	4	5	6	7
O_2	9.48 %	9.22 %	10.32 %	12.2 %	11.91 %	12.9 %	12.23 %

CO	44 ppm	65 ppm	166 ppm	176 ppm	179p pm	62 ppm	162 ppm
CO_2	11.68 %	11.4 %	10.21 %	8.36 %	8.82 %	7.35 %	7.58 %
NOx	83.1 ppm	91.2 ppm	117 ppm	114.1 ppm	116.1 ppm	82.1 ppm	116.1 ppm
NO_2	0.1 ppm	0.2 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm
SO_2	34 ppm	56 ppm	202 ppm	242 ppm	248 ppm	116 ppm	193 ppm

6-Р ХҮСНЭГТИЙН ҮРГЭЛЖЛЭЛ

Хийн бүтэц	Хэмжилтийн дугаар							Дундаж
	8	9	10	11	12	13	14	
O_2	12.89%	13.58%	15.96%	16.5 %	16.62%	16.5 %	16.04%	13.33%
CO	203 ppm	241 ppm	140 ppm	316 ppm	380 ppm	276 ppm	254 ppm	190.29 ppm
CO_2	7.46 %	6.78 %	4.42 %	4.2 %	4.07 %	4.52 %	4.75 %	7.26 %
NOx	133.1 ppm	130.1 ppm	55 ppm	69 ppm	74 ppm	68 ppm	56 ppm	93.21 ppm
NO_2	0.1 ppm	0.1 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm	0 ppm	0.07 ppm
SO_2	252 ppm	257 ppm	46 ppm	72 ppm	86 ppm	77 ppm	40 ppm	137.21 ppm

Дээрх гормикс түлж туршсан 01-р сарын 10-12-ны өдрүүдийн туршилтын үр дүнгүүдээс харахад утааны хийд агуулагдах хүчилтөрөгчийн хэмжээ 9.22-16.62%, нүүрстөрөгчийн давхар исэл 4.07-11.68% байхад бохирдуулагч хий болох нүүрстөрөгчийн дан исэл 44-380 ppm, азотын исэл 55-133.1 ppm, хүхрийн давхар исэл 34-257 ppm байж, харин галын хотол дахь дөлний температур нь тухайн бүтээгдэхүүний нөлөөгөөр нэмэгдэж 1050-1270 ºС хүрч, үүний улмаас яндангаар хаягдах утааны хийн температур 250-420 ºС болсон байна.

Уг бүтээгдэхүүнийг хэрэглэсэн “Рашаант хайрхан” ХХК-аас ирүүлсэн мэдээгээр түлшний зарцуулалтын хувьд дараах үр дүнгүүд гарсныг 8-р хүснэгтээр үзүүлэв.

НҮҮРСНИЙ ЗАРЦУУЛАЛТЫН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

7-Р ХҮСНЭГТ

№	Харьцуулсан үзүүлэлт	Хоногт ажиллах зуухны амины тоо	Хоногт тээвэрлэх ковшийн тоо	Нэг ковшийн тээвэрлэх нүүрсний жин, тн	Хоногийн нийт нүүрсний зарцуулалт, тн
1	Гормикс хэрэглэхээс өмнө	3	10	1.4	14.0
2	Гормикс хэрэглэсний дараа	3	7.5	1.4	10.5
3	Нүүрсний хэмнэлт	-	2.5	-	3.5

ДҮГНЭЛТ

“Гормикс” хэмээх түлшний шаталтыг дэмжин утааны хий дэх бохирдуулах бодисыг бууруулах үйлчилгээтэй бүтээгдэхүүнийг хэрэглэснээр үнсэн дэх шаарга, нарийн үнсний дутуу шаталтын хэмжээг 36.94%-иар буурч, хаягдах үнсний өнгө цайрч байгаа зэрэг нь түүний эерэг нөлөөтэйг харуулж байна.

Мөн нүүрстөрөгчийн дан исэл 1.59-2.25 дахин, азотын исэл 1.15-1.29 дахин, хүхрийн исэл 1.1-1.33 дахин буурч үр нөлөөтэй нь харагдаж байна.

Цаашид энэхүү бүтээгдэхүүнийг орчин үеийн автомат ажиллагаатай, үлээх ба сорох төхөөрөмжүүд нь зуухны хий соролттой уялдуулан тохиргоо хийх бүрэн боломжтой техникийн хэвийн нөхцөлийг хангасан үед туршвал хүлээгдэх үр дүн өндөр гарах боломжтой гэж дүгнэлээ.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] “Гормикс” хатуу түлшний шаталт сайжруулагч. Мега бизнес солюшнс ХХК 2026 он.

[2] Өвөрхангай аймгийн нарийнтээл сумын нутагт баянтээг нүүрсний уурхайг түшиглэн шинээр барих цахилгаан станцын техник эдийн засгийн үндэслэл https://uvurkhangai.gov.mn/upload/files/3632d8f3bb212cadd84f830b99eb61f6.pdf

[3] А.Түмэнбаяр. “Түлшний шаталт дэмжин утааны хийн бохирдолыг бууруулах “Гормикс” бүтээгдэхүүнийг бага чадлын ус халаах зуухнуудад туршсан ажлын дүгнэлт”. 2026 он.

ЦАХИЛГААН ШУГАМ СҮЛЖЭЭНИЙ ГОРИМ АЖИЛЛАГААГ БАГА ЧАДЛЫН ЦАХИЛГААН СТАНЦААР САЙЖРУУЛАХ СУДАЛГАА

Батхишигийн НАР-АДЪЯА[1], Сосорсүрэнгийн ЭНХБОЛД[2], Гантөмөрийн МӨНХБОЛОР[3], Шагдарсүрэнгийн ГАН-ТӨМӨР[4]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Цахилгааны инженерийн салбар

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: bnaradiya@gmail.com[1], gantumur2020@must.edu.mn[4]

Хураангуй: **Энэхүү өгүүлэлд Говийн бүсийн 220 кВ болон 110 кВ түвшний цахилгаан дамжуулах сүлжээний горимын судалгааг хийсэн. Судалгаанд 220 кВ-ын Сонгино, Мандал, Тавантолгой, Оюутолгой, Цагаан суварга дэд станцууд, мөн 110 кВ-ын Даланзадгад, Ухаахудаг дэд станцуудыг хамруулсан. Түүнчлэн Өмнөговь аймгийн Цогтцэций суманд байрлах Ухаахудаг 18 МВт хүчин чадалтай цахилгаан станц болон Цэций 50 МВт хүчин чадалтай салхин цахилгаан станцын агаарын шугамуудыг авч үзэж, төвийн бүстэй зэрэгцээ ажиллах нөхцөлд загварчилсан. Судалгааны хүрээнд 220 кВ болон 110 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугамууд болон тэдгээртэй холбогдсон трансформаторуудын ачааллын түвшнээс хамаарах чадлын алдагдал, хүчдэлийн уналтыг ETAP болон DIgSILENT PowerFactory программ хангамжийг ашиглан тооцоолж, сүлжээний горимын шинжилгээг гүйцэтгэсэн. Тооцооны үр дүнгээс Даланзадгад дэд станцад үүссэн хүчдэлийн уналтыг 30 МВт нарны цахилгаан станц холбох замаар бууруулж, 110 кВ түвшинд хүчдэлийг 109.2 кВ-оос 115 кВ хүртэл нэмэгдүүлэн, хүчдэлийн хазайлтыг зөвшөөрөгдөх ±5%-ийн хязгаарт оруулсан.**

Түлхүүр үг: Цахилгаан дамжуулах сүлжээ, Нарны цахилгаан станц, Хүчдэлийн шинжилгээ, Чадлын алдагдал

I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд Монгол Улсад цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ тогтмол өсөх хандлагатай байна. Цаашид эдийн засгийн өсөлт, уул уурхайн үйлдвэрлэлийн тэлэлт, хотжилтын нэмэгдэл зэрэг хүчин зүйлсийн нөлөөгөөр цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээ улам нэмэгдэх төлөвтэй байна. Иймд эрчим хүчний салбарын хөгжлийн бодлого, төлөвлөгөөнд үндэслэн 2026 он хүртэл эрчим хүчний системийн найдвартай ажиллагааг хангах, сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн эзлэх хувийг нэмэгдүүлэх, цахилгаан дамжуулах болон түгээх сүлжээний хүчин чадлыг сайжруулах чиглэлээр тодорхой арга хэмжээнүүдийг хэрэгжүүлэхээр төлөвлөж байна [1].

Монгол Улсын говийн бүс нь нар, салхины эрчим хүчний өндөр нөөцтэй бөгөөд сүүлийн жилүүдэд цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ огцом өсөх хандлагатай байна. Үүнтэй уялдан цахилгаан дамжуулах сүлжээний хүчин чадлыг нэмэгдүүлэх зорилгоор 220 кВ-ын дэд станцуудыг шинэчилж, Төвийн эрчим хүчний нэгдсэн сүлжээтэй холбох ажлуудыг хэрэгжүүлсэн [2]. Говийн бүсийн цахилгаан хангамжид сэргээгдэх болон уламжлалт эх үүсвэрүүд хамтран ажиллаж байна. Сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн хувьд Цэций салхин цахилгаан станц нь үйлдвэрлэсэн цахилгаан эрчим хүчээ 32.5 км урттай 110 кВ-ын хоёр хэлхээт цахилгаан дамжуулах агаарын шугамаар 220/110/35/10 кВ-ын Тавантолгой дэд станцад нийлүүлэн Төвийн эрчим хүчний нэгдсэн сүлжээтэй зэрэгцэн ажиллаж байна. Мөн Өмнөговь аймгийн Цогтцэций суманд байрлах Ухаа худаг цахилгаан станц нь 18 МВт суурилагдсан хүчин чадалтай бөгөөд 14.8 км урттай 110 кВ-ын агаарын шугамаар Тавантолгой дэд станцтай холбогдон Төвийн эрчим хүчний нэгдсэн системтэй зэрэгцэн ажилладаг. Тус станц нь уурхайн бүсийн үйлдвэрлэл болон Цогтцэций сумын хэрэглэгчдийг 24 цагийн турш найдвартай цахилгаан эрчим хүчээр хангах үүргийг гүйцэтгэж байна. Харин Өмнөговь аймгийн төв Даланзадгад хотод байрлах Даланзадгад дулааны цахилгаан станц нь 6 МВт суурилагдсан хүчин чадалтай боловч тоног төхөөрөмжийн элэгдэл нэмэгдсэнээс шалтгаалан бүрэн хүчин чадлаар тогтвортой ажиллах боломж хязгаарлагдмал болсон байна [3].

Иймд энэхүү судалгааны зорилго нь Говийн бүсийн цахилгаан дамжуулах 220 кВ болон 110 кВ сүлжээний горимын шинжилгээг хийж, шинээр баригдах нарны цахилгаан станцыг системд холбох боломж болон цахилгаан хангамжийн найдвартай ажиллагаанд үзүүлэх нөлөөг үнэлэхэд оршино.

Судалгааны хүрээнд дараах зорилтуудыг дэвшүүлэв:

1. Говийн бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний горимын загварыг байгуулах
2. Сүлжээний чадлын алдагдал болон хүчдэлийн уналтыг тодорхойлох
3. Даланзадгад дэд станцын ачааллын өсөлтийн нөлөөг шинжлэх
4. Нарны цахилгаан станц холбох хувилбарыг боловсруулж чадлын урсгалын тооцоог гүйцэтгэх
5. Сүлжээний горимд үзүүлэх нөлөөг үнэлэх

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТЫН ТУХАЙ

Судалгаанд Говийн бүсийн дамжуулах сүлжээний 9 дэд станц болон Төвийн бүсийн нэгдсэн сүлжээтэй зэрэгцэн ажиллах эх үүсвэрүүдийг хамруулан, реакторын хүчин чадлыг тооцоонд оруулж горимын загварчлалыг хийсэн. Үр дүнд нь тооцооны утгууд бодит хэмжилттэй ойролцоо гарсан. Судалгаанд ашигласан трансформатор болон дамжуулах шугамын марк, эсэргүүцлийн параметрүүдийг Хүснэгт 1, 2-т үзүүлсэн.

СУДАЛГААНД АШИГЛАСАН 220 КВ БОЛОН 110 КВ ДАМЖУУЛАХ ШУГАМЫН ПАРАМЕТРҮҮД

1-Р ХҮСНЭГТ.

Д/д	Холболтын нэршил	Шугамын нэр	Марк	L (км)	n	R (Ω)	X (Ω)	B (См)
220 кВ								
1	Сонгино дэд станциас Мандал ДС	213, 214	ACSR-240/39	249.1	2	50.82	94.66	0.000996
2	Мандальговиос Тавантолгой дэд станц	215, 216	LGJ-300/40	249.8	2	48.96	94.92	0.000999
3	Тавантолгойгоос Оюутолгой	217, 218	LGJ-300/40	136.3	2	26.72	51.79	0.000545
4	Оюутолгойгоос Цагаан суврага	222	LGJ-400/51	159.4	1	11.64	57.38	0.000669
5	Оюутолгойгоос Цагаан суврага	221	LL-ACSR/AS-445/36	159.4	1	10.36	55.79	0.000717
110 кВ								
6	Тавантолгойгоос Цэций салхин станц	147, 148	ACSR-150/24	32.5	2	13.39	13	0.000114
7	Тавантолгойгоос Цанхи	А, Б	AC-240/32	14.8	2	3.7	5.92	0.000056
8	Тавантолгойгоос Даланзадгад	Даланзадгад А, Б	AC-120/19	86.9	2	43.98	33.02	0.000304
9	ТТ-Ухаа худаг	А, Б	LGJ-400/50	14.7	2	2.15	6.17	0.000059

СУДАЛГААНД АШИГЛАСАН ТРАНСФОРМАТОРЫН ТООЦООНЫ ПАРАМЕТРҮҮД

2-Р ХҮСНЭГТ.

Д/д	Дэд станц	Трансформатор марк	S (MBA)	U (кВ)	Z (Ом)	R (Ом)	X (Ом)
1	Мандал	OSFPSZ9 2x63	63	220	76.83	0.77	76.8
2	Тавантолгой	OSFPSZ9 2x125	125	220	38.72	0.39	38.7
3	Оюутолгой	OSFPSZ9 2x125	125	220	38.72	0.39	38.7
5	Цагаансуварга	SFZ9 2x75	75	220	64.53	0.65	64.5
6	Даланзадгад	ТДТН-25х2	25	110	48.4	0.48	48.4
7	Ухаахудаг	SFSZ9 25x2	25	110	48.4	0.48	48.4
9	Цогтцэций	SFZ-55x2	55	110	22	0.22	22
10	Тавантолгой	OSFPSZ9 2x125	40	110	30.25	0.3	30.25
12	Даланзадгад ДЦС	SZ-6.3x2	6.3	10	1.587	0.016	1.58

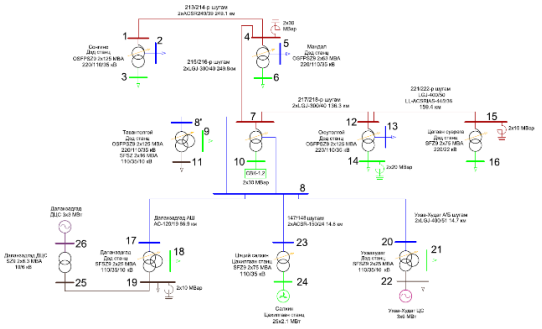
2.1 Дэд станцуудын тоноглолын горим ажиллагаа: 2024 оны өвлийн горимд гол зангилаа дэд станцууд дэх трансформатор болон реакторуудын горим ажиллагааны байдлыг үзүүлэв. (1-р хүснэгт)

ДЭД СТАНЦУУДЫН ТОНОГ ТӨХӨӨРӨМЖИЙН ГОРИМЫН АЖИЛЛАГАА

3-Р ХҮСНЭГТ.

Д/д	Дэд станцуудын тоноглолын горим ажиллагаа		
	Дэд станцууд	Ажилд	Бэлтгэлд
1	220/110/35 кВ “Сонгино”	АТ-1, БХ-1	АТ-2, БХ-2, Р-1, Р-2.
1	220/110/35 кВ “Мандал”	АТ-2, Р-1, Р-2.	АТ-1
2	220/110/35 кВ “Тавантолгой”	АТ-2, Т-2, СВК-2	АТ-1, Т-1, СВК-1, Р-1, Р-2.
3	220/110/35 кВ “Оюутолгой”	АТ-2, Р-2.	АТ-1, Р-1.
4	220/22/35 кВ “Цагаан суврага”	Т-2, Р-1, Р-2	Т-1
5	110/35/10 кВ “Ухаахудаг”	Т-1	Т-2, Р-1, Р-2
6	110/35/10 кВ “Даланзадгад”	Т-1, Т-2	-

Судалгаанд ашигласан тооцооны схемийг Зураг 1-д харуулав.



1-р зураг. Говийн бүсийн 220 кВ болон 110 кВ шугам сүлжээний схем.

III. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН АРГА ЗҮЙ

Энэхүү судалгаанд ETAP болон DIgSILENT PowerFactory программ хангамжийг ашиглан сүлжээний горимын тооцоог хийж, ачааллын урсгал, хүчдэл болон чадлын алдагдлын үр дүнг харьцуулан шинжилсэн.

2.1 DIgSILENT PowerFactory программ: DIgSILENT PowerFactory нь цахилгаан эрчим хүчний системийн шинжилгээ, загварчлал хийхэд өргөн хэрэглэгддэг программ хангамж юм. Тус программд генерацийн төхөөрөмжүүдийн реактив чадлын удирдлагыг cosφ(P) болон Q(V) хяналтын горимоор хэрэгжүүлэх боломжтой. Эдгээр хяналтын аргууд нь сүлжээний хүчдэлийн түвшнийг тогтворжуулах, хүчдэлийн зөрчлийг бууруулахад ашиглагддаг. [11]. Энэхүү программ нь цахилгаан дамжуулах болон түгээх сүлжээний ажиллагааг судлах, системийн горимын тооцоо хийхэд ашиглагддаг бөгөөд эрчим хүчний компаниуд, судалгааны байгууллагууд болон их, дээд сургуулиудад өргөн хэрэглэгддэг. Мөн DIgSILENT PowerFactory программыг ашиглан цахилгаан системийн хүчдэлийн тогтвортой байдал (voltage stability)-ын үзэгдлийг судлах боломжтой бөгөөд системийн хүчдэлийн горим, ачааллын өөрчлөлт болон бусад хүчин зүйлсийн нөлөөг үнэлэхэд өргөн ашиглагддаг [12].

2.1.1 Хүчдэлийн хазайлтын үнэлгээ: Цахилгаан эрчим хүчний системийн ачааллын урсгалын шинжилгээний үед зангилааны хүчдэлийн түвшнийг үнэлэх нь системийн хэвийн ажиллагааг хангах чухал үзүүлэлт болдог. Хүчдэлийн түвшин нь цахилгаан тоног төхөөрөмжийн найдвартай ажиллагаа болон цахилгаан эрчим хүчний чанарт шууд нөлөөлдөг. Иймээс ачааллын урсгалын тооцооны үед зангилааны хүчдэлийн хазайлтыг тодорхойлох шаардлагатай байдаг. [10].

Хүчдэлийн хазайлтыг нэрлэсэн хүчдэлтэй харьцуулан дараах байдлаар тодорхойлно [8].

$$U_d = \frac{U_{\text{ном}} - U_i}{U_{\text{ном}}} \times 100\% \qquad (2)$$

Энд:

$U_{ном}$ — системийн нэрлэсэн хүчдэл,
U_i — i-р зангилааны хүчдэлийн хэмжээ,
U_d — хүчдэлийн хазайлтын хувь юм.

Энэ томьёог ашиглан зангилаа бүрийн хүчдэлийн хазайлтыг тодорхойлж, системийн хүчдэлийн горимыг үнэлэх боломжтой.

Цахилгаан системийн хэвийн ажиллагааны үед зангилааны хүчдэл нь нэрлэсэн хүчдэлийн ±5%-ийн хязгаарт байх шаардлагатай бөгөөд үндсэн зангилаанд үүсэх хүчдэлийн уналт 2%-иас ихгүй байх ёстой [10]. Ийм шалгуурыг ашигласнаар цахилгаан сүлжээний ажиллагааны горимыг үнэлэх, мөн системд шинэ эх үүсвэр холбох үед хүчдэлийн түвшний өөрчлөлтийг тодорхойлох боломжтой.

2.2 ETAP программ: ETAP программ нь цахилгаан эрчим хүчний системийн загварчлал болон ачааллын урсгалын тооцоог хийхэд өргөн хэрэглэгддэг программ хангамж юм. Load flow шинжилгээ нь цахилгаан системийн төлөвлөлт болон ажиллагааны үндсэн шинжилгээний нэг хэлбэр бөгөөд зангилааны хүчдэл, чадлын урсгал, чадлын алдагдлыг тодорхойлох боломжийг олгодог [8].

Цахилгаан эрчим хүчний системийн ачааллын урсгалын шинжилгээний үед дамжуулах шугамын чадлын алдагдлыг зангилаануудын идэвхтэй болон реактив чадлын урсгалын хамаарлаар тодорхойлж болно. Сүлжээний нийт идэвхтэй чадлын алдагдлыг зангилаануудын чадлын урсгал болон сүлжээний параметрүүдийн функц байдлаар илэрхийлдэг бөгөөд дараах байдлаар тодорхойлогдоно [9].

$$P_L = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \alpha_{ij}\left(P_i P_j + Q_i Q_j\right) + \beta_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j) \qquad (1)$$

Энд P_L нь сүлжээний нийт идэвхтэй чадлын алдагдал;

$P_i Q_i$ нь i-р зангилааны идэвхтэй болон реактив чадал;

$P_j Q_j$ нь j-р зангилааны идэвхтэй болон реактив чадал;

N нь сүлжээнд оролцож буй зангилааны тоо;

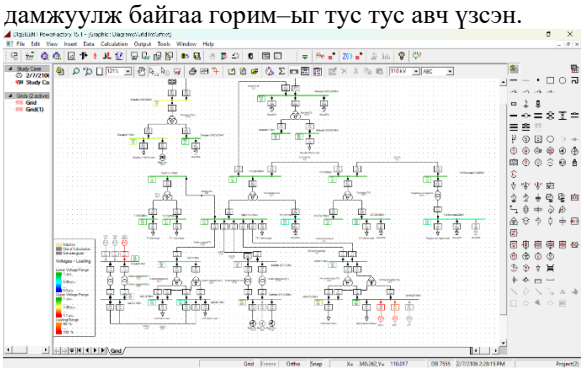
α_{ij}, β_{ij} нь сүлжээний параметрүүд (эсэргүүцэл, дамжуулах чадвар)-ээс хамаарах алдагдлын коэффициентууд;

i,j нь зангилааны индексүүд болно [9].

IV. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ҮР ДҮН

4.1 Цахилгаан сүлжээний ачааллын урсгалын тооцооны үр дүн: Доорх тооцоог 2024 оны өвлийн их ачааллын болон 2025 оны зуны бага ачааллын горимд DIgSILENT PowerFactory программ хангамжийг ашиглан гүйцэтгэсэн. Тооцоонд генерацийн реактор болон хүчдэлийн тохируулгын төхөөрөмжүүдийг ажиллагааны горимд авч үзсэн бөгөөд гарсан үр дүн нь бодит хүчдэлийн хэмжилтийн утгатай ойролцоо гарсан. Иймээс ETAP болон DIgSILENT PowerFactory программуудаар хийсэн тооцооны хүчдэлийн түвшин нь бодит хэмжилтийн утгатай ойролцоо байгааг харуулж байна.

Тооцоог хийхдээ Ухаахудаг цахилгаан станц нь Төвийн бүсийн нэгдсэн системтэй (ТБНС) зэрэгцээ ажиллаж, 3 машин–3 зуухтай горимд баяжуулах үйлдвэр ачааллаа бүрэн авсан нөхцөл, мөн Цэцийн салхин цахилгаан станц 34 МВт чадлыг ТБНС-д дамжуулж байгаа горим–ыг тус тус авч үзсэн.



2-р зураг. 2024 оны 12 дугаар сарын 18-ны өдрийн 12:00 цагийн өвлийн их ачааллын үеийн системийн балансын тооцооны үр дүн (DIgSILENT PowerFactory).

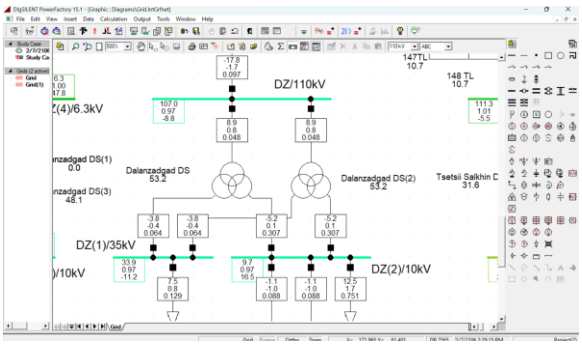
Дээрх зурагт өвлийн их ачааллын үеийн горимын тооцооны үр дүнг DIgSILENT PowerFactory программ хангамжийг ашиглан гүйцэтгэсэн байдлаар үзүүлэв. Тооцооны үр дүнг тухайн үеийн бодит хүчдэлийн түвшинтэй харьцуулснаар программын тооцооны үнэн зөв, найдвартай байдлыг үнэлэх боломж бүрдсэн. (Хүснэгт-4)

ДЭД СТАНЦУУДЫН ЗАНГИЛААНЫ ХҮЧДЭЛИЙН ТҮВШНИЙ ХАРЬЦУУЛСАН ҮР ДҮН

4-Р ХҮСНЭГТ.

№	Дэд станц	Uн (кВ)	Uхэмж (кВ)	Uтооц (кВ)	ΔU (%)
1	Мандал дэд станц	220	223.4	234.7	-4.81%
		35	36.5	33.9	7.52%
2	Тавантолгой дэд станц	220	230.2	232.5	-0.99%
		110	114.5	115.4	-0.78%
		35	35.1	35.4	-0.85%
3	Тавантолгой дэд станц	110	114.5	115.4	-0.78%
		35	35.1	36	-2.50%
		10	10.0	10.5	-4.38%
4	Даланзадгад дэд станц	110	109.9	107.1	2.61%
		35	35.6	33.9	5.01%
		10	10.2	9.7	5.15%
6	Оюутолгой дэд станц	220	227.9	233.7	-2.48%
		35	35.6	36	-1.11%
7	Цагаансуварга дэд станц	220	226.0	232.8	-2.92%
		22	22.1	22.6	-2.21%
8	Сонгино дэд станц	220	223.8	231	-3.12%
		110	113.8	114.9	-0.96%
		35	35.0	35.2	-0.57%

Даланзадгад дэд станцын хувьд төвийн бүсээс 12 цагын байдлаар 17.8 МВт эрчим хүч авч ажиллах үед 35 кВ болон 10 кВ талд хүчдэлийн уналт үүсч РПН тохируулах шаардлагатайг харж болно. (3-р зураг)



3-р зураг. Өвлийн их ачааллын үеийн Даланзадгад дэд станцын горим (DIgSILENT PowerFactory)

4.2 Сүлжээний чадлын алдагдлын бүтэц: Говийн бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний чадлын алдагдлын бүтцээс харахад ихэнх хувийг дамжуулах шугамын алдагдал эзэлж байна. Өвлийн их ачааллын үед 68%, зуны бага ачааллын үед 72% байгаа бол трансформаторын ороомгийн алдагдал 32–28% байна. Харин трансформаторын гангийн алдагдал маш бага хувь эзэлж байна.

Чадлын алдагдлын тооцооны үр дүнг ашиглан эрчмийн алдагдлыг эквивалент цагийн аргаар тодорхойлов. Тооцоогоор өвлийн их ачааллын үед нийт эрчмийн алдагдал 8643.26 МВт·ц, харин зуны бага ачааллын үед 6403.26 МВт·ц байна. (Хүснэгт-2, 2-р диаграм)

ЧАДЛЫН АЛДАГДЛЫН БҮТЭЦ

5-Р ХҮСНЭГТ.

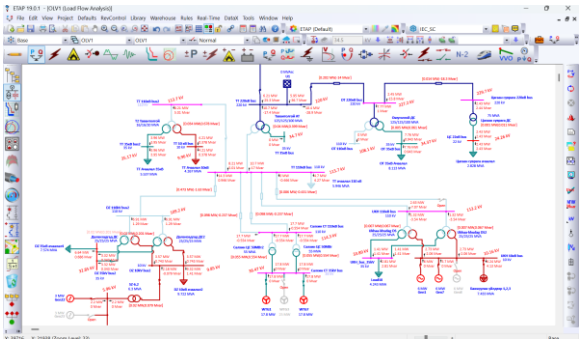
Үзүүлэлт	Ган	Ороомог	Шугам	ΔРΣ, МВт	ΔРΣ, %
ΔР, МВт (Өвөл)	0.0014	0.784	1.682	2.467	100
ΔР, % (Өвөл)	0.06	32	68	-	-
ΔР, МВт (Зун)	0.0014	0.520	1.306	1.827	100
ΔР, % (Зун)	0.08	28	72	-	-



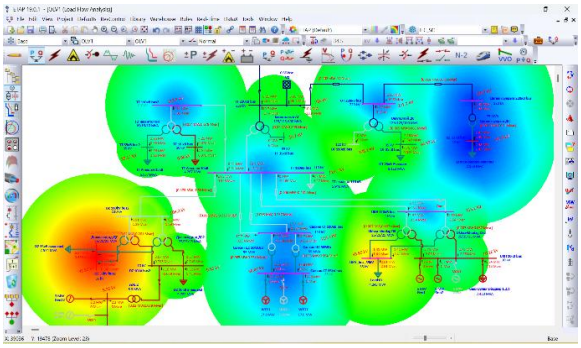
2-р диаграмм. Өвөл болон зуны ачааллын горим дахь чадлын алдагдлын бүтцийг харуулав.

4.3 ETAP тооцооны үр дүн: ETAP программ хангамжийг ашиглан Говийн бүсийн 220 кВ болон 110 кВ цахилгаан дамжуулах сүлжээний өвлийн их ачаалал болон зуны бага ачааллын үеийн чадлын урсгалын тооцоог гүйцэтгэж, зангилааны хүчдэлийн түвшин, чадлын урсгал, ачааллын хуваарилалтыг тодорхойлов. Тооцоонд дамжуулах шугам болон трансформаторын үндсэн параметрүүд (эсэргүүцэл, реактив эсэргүүцэл, урт, хүчин чадал зэрэг)-ийг анхдагч өгөгдөл болгон ашигласан.

Доорх зурагт ETAP программ ашиглан хийсэн тооцооны үр дүнг харуулав.

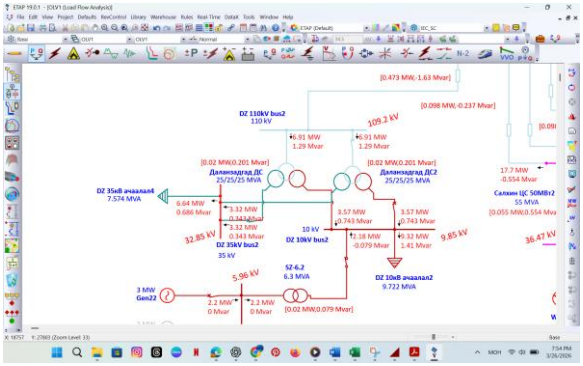


4-р зураг. Говийн бүсийн эрчим хүчний системийн 2024 оны өвлийн их ачааллын горим дахь ачаалал хуваарилалт, хүчдэлийн түвшний тооцооны үр дүн (ETAP программ).



5-р зураг. Говийн бүсийн эрчим хүчний системийн 2024 оны өвлийн их ачааллын үеийн хүчдэлийн тархалтын зураг (ETAP программын тооцооны үр дүн).

Дээрх зурагт ETAP программын тооцооны үр дүнд хүчдэлийн түвшний тархалтыг өнгөөр үзүүлсэн бөгөөд ногоон нь хэвийн, улаан нь хүчдэлийн уналт их байгааг илэрхийлнэ. Үр дүнгээс 35 кВ болон 10 кВ талд хүчдэлийн уналт ажиглагдаж байна.



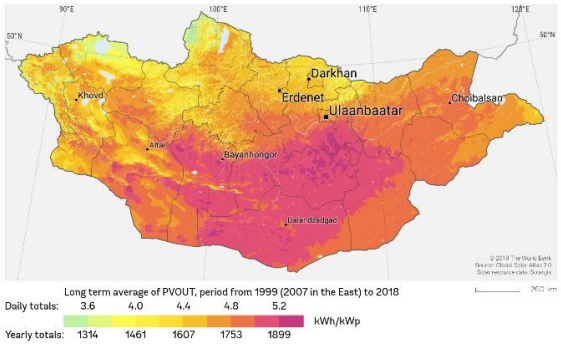
6-р зураг. Даланзадгад дэд станцын ачааллын горим болон хүчдэлийн уналт (ETAP программ хангамж)

Дээрх зурагт тооцооны үр дүнгээс харахад 110 кВ талд хүчдэл 109.2 кВ байгаа нь номинал утгад ойролцоо байгаа бол 35 кВ талд 32.85 кВ, 10 кВ талд 9.85 кВ хүртэл буурч хүчдэлийн уналт үүссэн нь ажиглагдаж байна. Мөн дэд станцын 10 кВ талд ачаалал 9.32 МВт хүрч, 35 кВ талд 6.64 МВт орчим чадлын урсгалтай байгаагаас доод хүчдэлийн түвшинд ачаалал төвлөрсөн байдал ажиглагдаж байна. Энэ нь Даланзадгад дэд станцын доод түвшний сүлжээнд ачааллын өсөлтөөс шалтгаалан хүчдэлийн уналт үүсэж байгааг илтгэж байна.

V. ЦАХИЛГААН ДАМЖУУЛАХ СҮЛЖЭЭНИЙ ГОРИМЫГ САЙЖРУУЛАХ СУДАЛГАА

Даланзадгад дэд станцад ачааллын өсөлттэй уялдан хүчдэлийн уналт нэмэгдэх хандлага ажиглагдаж байгаа тул үүнийг бууруулах зорилгоор 30 МВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан станц холбох хувилбарыг судлан үнэлэв.

5.1. Говийн бүсийн нарны эрчим хүчний нөөцийн үнэлгээ: Global Solar Atlas-ийн мэдээллээр Монгол орны ихэнх бүс нутагт жилийн нарны цацрагийн дундаж хэмжээ 1400–1700 кВт·ц/м² хүрдэг бөгөөд энэ нь нарны цахилгаан станц байгуулах өндөр боломжтойг харуулж байна [13]. (7-р зураг)



7-р зураг. Монгол орны нарны эрчим хүчний нөөцийн тархалтын газрын зураг (Global Solar Atlas).

5.2 Нарны цахилгаан станцын сонгосон тоноглолын үндсэн үзүүлэлтүүд: Судалгаанд Говийн бүсийн цахилгаан сүлжээнд холбогдох 30 МВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан станцын загварыг авч үзэв. Станцын үндсэн тоноглолууд болох нарны хавтан, инвертер болон DC/AC хувиргагчийн параметрүүдийг дараах байдлаар сонгов [18]. (Хүснэгт-6)

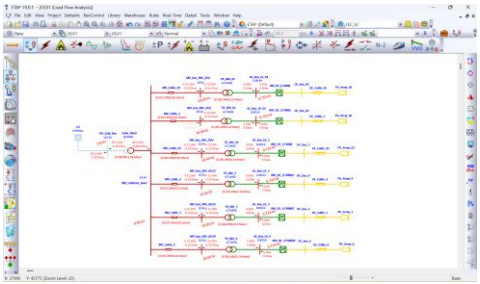
НАРНЫ СТАНЦЫН СОНГОСОН ТОНОГЛОЛЫН ҮНДСЭН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

6-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Утга
Нарны станцын хүчин чадал	30 МВт
Нэг хавтангийн чадал	540 Вт
Нийт хавтангийн тоо	55,556 ширхэг
Нэг инвертерийн чадал	5 МВт
Инвертерийн тоо	6 ширхэг
Нэг инвертерт холбогдох хавтан	9260 ширхэг
Дэд станцын трансформатор	50 MBA
Шугам	AC-120/19

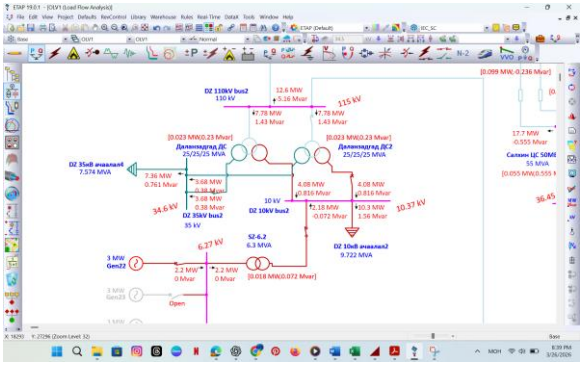
Станцын загварчлалд 540 Вт чадалтай нарны хавтанг ашигласан бөгөөд нийт 30 МВт суурилагдсан хүчин чадлыг хангахын тулд 55,556 ширхэг хавтан шаардлагатай гэж тооцоолов. Системийн инвертерийн чадлыг 5 МВт гэж авч үзэн нийт 6 ширхэг инвертер сонгон ашиглав.

5.3 Нарны станцын схем төлөвлөлт: Сонгосон тоноглолын параметрүүдэд үндэслэн ETAP программд нарны цахилгаан станцын загварчлалыг хийж, цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх горимыг харуулав.



8-р зураг. 30 МВт Нарны цахилгаан станцын схем загварчлал (ETAP программын тооцооны үр дүн).

5.3 Говийн бүсийн цахилгаан сүлжээнд нарны цахилгаан станцыг холбосон үеийн чадлын урсгалын тооцооны үр дүн: Судалгаанд Даланзадгад дэд станцаас зүүн урд зүгт ойролцоогоор 15 км зайд 30 МВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан станц барихаар төлөвлөж, тухайн зангилаанд холбосон нөхцөлд чадлын урсгалын тооцоог ETAP программ ашиглан гүйцэтгэв. Тооцооны үр дүнд Даланзадгад дэд станцын 110 кВ, 35 кВ болон 10 кВ талуудын хүчдэлийн түвшин сайжирч, системийн хүчдэлийн горимд эерэг нөлөө үзүүлж байгааг тогтоов.



9-р зураг. Даланзадгад дэд станцад 30 МВт нарны цахилгаан станц холбосон үеийн чадлын урсгалын тооцоо (ETAP программ).

Дээрх зурагт 30 МВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан станцыг системд холбосны дараах Даланзадгад дэд станцын ачааллын урсгал болон хүчдэлийн тархалтын тооцооны үр дүнг ETAP программ хангамжийн тусламжтайгаар үзүүлэв. Тооцооны үр дүнгээс харахад 110 кВ талд хүчдэл 115 кВ болж өссөн нь хэвийн түвшинд хүрснийг илтгэж байна. Мөн 35 кВ талд хүчдэл 34.6 кВ, 10 кВ талд 10.37 кВ болж өмнөх горимтой харьцуулахад хүчдэлийн уналт буурч сайжирсан байна. Түүнчлэн дэд станцын доод хүчдэлийн түвшинд ачааллын тархалт жигдэрч, чадлын урсгал илүү тогтвортой болсон нь ажиглагдаж байна. Энэ нь нарны цахилгаан станцыг холбох нь тухайн зангилаанд үүсэж байсан хүчдэлийн уналтыг бууруулж, сүлжээний горимын ажиллагааг сайжруулах үр дүнтэй шийдэл болохыг харуулж байна.

ДАЛАНЗАДГАД ДЭД СТАНЦЫН ЗАНГИЛААНУУДЫН ХҮЧДЭЛИЙН ТҮВШИН (БОДИТ ХЭМЖИЛТ БОЛОН ETAP ТООЦООНЫ ХАРЬЦУУЛАЛТ

7-Р ХҮСНЭГТ.

Хүчдэлийн түвшин (кВ)	Бодит хэмжилтийн утга (кВ)	Станц залгаагүй үе (ETAP тооцоо, кВ)	Нарны станц залгасан үе (кВ)
110	109.9	109.2	115
35	35.6	32.85	34.6
10	10.2	9.85	10.37

Хүснэгтээс харахад нарны цахилгаан станцыг Даланзадгад дэд станцад холбосны дараа 110 кВ, 35 кВ болон 10 кВ талуудын хүчдэлийн түвшин өсөж, системийн хүчдэлийн горим сайжирсан байна.

Өвлийн их ачааллын хэмжилтээс харахад ТБНС-ээс Даланзадгад дэд станц 19–21.9 МВт орчим ачаалал авч ажиллаж байна. Иймээс бага чадлын нарны цахилгаан станцыг холбосноор ТБНС-ээс авах эрчим хүчний хэрэглээг бууруулж, оргил ачааллын үед ойролцоогоор 10 МВт чадлыг системд нийлүүлэх боломжтой байна.

VI. ДҮГНЭЛТ

Говийн бүсийн 110–220 кВ-ын цахилгаан дамжуулах сүлжээний горимын шинжилгээг хийж бага чадлын цахилгаан станцаар сайжруулах судалгааг хийсний үр дүнд дараах дүгнэлтийг гаргаж байна. Үүнд:

1. Говийн бүсийн 110–220 кВ-ын цахилгаан дамжуулах сүлжээний горимын шинжилгээг ETAP болон DIgSILENT PowerFactory программ хангамж ашиглан гүйцэтгэж, өвлийн их болон зуны бага ачааллын горимд сүлжээний үзүүлэлтүүдийг тодорхойлж, хүчдэлийн уналт болон чадлын алдагдлыг тооцоолсон. Тооцооны үр дүнг бодит хэмжилтийн утгатай харьцуулахад ойролцоо гарсан нь ашигласан программ хангамжуудыг сүлжээний горимын тооцоонд хэрэглэх боломжтойг баталж, уг аргачлал нь үр ашигтай, найдвартай болохыг харуулж байна.

2. Тооцооны үр дүнгээс Даланзадгад дэд станцын ачаалал сүүлийн жилүүдэд тогтмол өсөх хандлагатай байгааг тогтоосон. Ялангуяа 35 кВ талд уул уурхайн төслүүдийн нөлөөгөөр, 10 кВ талд хэрэглэгчдийн тоо нэмэгдсэнтэй холбоотойгоор нийт ачаалал мэдэгдэхүйц өссөн байна. Өвлийн их ачааллын үеийн хэмжилтээр ачаалал 2023 онд 13.5 МВт, 2024 онд 17.5 МВт, 2025 онд 22 МВт болж өссөн байна. Ачааллын өсөлттэй уялдан 2024 онд 10 МВА трансформаторыг 25 МВА болгон шинэчилсэн боловч 2025 оны өвлийн оргил ачааллын үед ачаалал хөнгөлөх таслалтууд хийгдсэн нь цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ цаашид нэмэгдэх хандлагатай байгааг харуулж байна. Иймд өсөн нэмэгдэж буй ачааллыг хангах, сүлжээний горимыг сайжруулах зорилгоор нэмэлт эх үүсвэр холбох шаардлагатайг тодорхойлов.

3. Даланзадгад дэд станцаас зүүн урд чиглэлд ойролцоогоор 15 км зайд 30 МВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан станцыг системд холбох хувилбарыг боловсруулж, чадлын урсгалын тооцоог гүйцэтгэв. Тооцооны үр дүнгээс 110 кВ талд хүчдэл 109.2 кВ-оос 115 кВ хүртэл өссөн бол 35 кВ талд 34.1 кВ-оос 34.7 кВ, 10 кВ талд 9.7 кВ-оос 10.37 кВ хүртэл нэмэгдэж хүчдэлийн түвшин сайжирсан байна. Хүчдэлийн хазайлтын хувьд анхны горимд 110 кВ талд 0.92%, 35 кВ талд 9.98%, 10 кВ талд 5.26% байсан бол нарны станц холбогдсоны дараа тус бүр -4.43%, 2.01%, -1.35% болж, бүх түвшинд зөвшөөрөгдөх ±5%-ийн хязгаарт багтсан.

4. Судалгааны үр дүнгээс бага чадлын нарны цахилгаан станцыг сүлжээнд холбох нь техникийн хувьд боломжтой бөгөөд ачааллыг бууруулж,

хүчдэлийн горимыг сайжруулах үр ашигтай шийдэл болохыг тогтоов.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Монгол Улсын Эрчим хүчний яам. Эрчим хүчний салбарын хөгжлийн бодлого. Улаанбаатар хот, 2023.

[2] Цахилгаан дамжуулах үндэсний сүлжээ ТӨХК. Говийн бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний мэдээлэл. Улаанбаатар, 2024.

[3] Эрчим хүчний зохицуулах хороо. Монгол Улсын эрчим хүчний салбарын статистик тайлан. Улаанбаатар, 2023.

[4] Energy Regulatory Commission of Mongolia. Energy Sector Statistics 2023. Ulaanbaatar, 2023.

[5] Монгол Улсын Эрчим хүчний яам. Сэргээгдэх эрчим хүчний төслүүд [Online]. Available: *https://energy.gov.mn/post/*

[6] Ш.Гантөмөр, "Цахилгаан шугам сүлжээ, систем: Их дээд сургуулийн сурах бичиг," Ulaanbaatar, Mongolia: Соёмбопринтинг хэвлэл, 2025, ISBN 99929-5-724-7.

[7] Sh. Gantumur and G. Bekhbat, "Challenges of hybrid DGs for islanded micro-grid operation in west region energy system of Mongolia," in Proc. 2016 11th Int. Forum on Strategic Technology (IFOST 2016), 2017, pp. 237–242.

[8] J. A. X. Prabhu, S. Sharma, M. Nataraj, and D. P. Tripathi, “Design of Electrical System Based On Load Flow Analysis Using ETAP For IEC Projects,” 2016.

[9] Z.W.Khan and S.Khan, “Analyzing the Impacts of Distributed Generation on Power Losses and Voltage Profile,” IEEE, 2015.

[10] S.Kungtong and C.Chompoo-inwai, “Power Flow Monitoring and S. Kungtong and C. Chompoo-Inwai, “Power Flow Monitoring and Analysis for 24.6 MW at 6.9 kV Bus Diesel Power Plant Using ETAP,” in Proc. Int. Conf. Smart Grid and Clean Energy Technologies, 2016.

[11] Kraus,H., Brückl,O.,“Use and Programmatic Extension of PowerFactory for the Implementation of Automated Network Planning at the Distribution Grid Level,” *IEEE, 2020.*

[12] DIgSILENT GmbH, DIgSILENT PowerFactory Manual, Germany, 2012.

[13] M. Khanabadi and H. Ghasemi, “Transmission congestion management through optimal transmission switching,” IEEE.

[14] M. A. A. Bhuiyan, M. H. Bhuiyan, M. A. Rahman, M. A. Abir, N. Mehfuz, and S. Salehin, “Economic assessment of concrete and floating based solar chimney power plants in Bangladesh,” in *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, Dhaka, Bangladesh, June 2020.

[15] World Bank Group and Solargis, *Global Solar Atlas 2.0, Solar resource data for Mongolia*, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), 2020. [Online]. Available: https://globalsolaratlas.info

[16] G. Liu, “Application of ETAP in distributed power supply and micro-grid interconnection,” in *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, Yichang, China, Sept. 2019.

[17] R. R. Waqfi and M. Nour, “Impact of PV and Wind Penetration into a Distribution Network Using ETAP,” in *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSAO)*, 2017.

[18] K. Matiyali and A. Ashok, “Performance Evaluation of Grid Connected Solar PV Power Plant,” in *2016 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA)*, Bareilly, India, Sept. 30–Oct. 1, 2016

[19] C. Suthapanun, P. Jirapong, P. Bunchoo, and P. Thararaka, “Reliability Assessment Tool for Radial and Loop Distribution Systems Using DIgSILENT PowerFactory,” in *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering*, Chiang Mai University, Thailand, n.d.

[20] B. Shiva Kumar, K. Sudhakar, “Performance evaluation of 10 MW grid connected solar photovoltaic power plant in India, Energy Reports (1), 2015.

ДУЛААНЫ ТӨВ МАГИСТРАЛЬ ШУГАМЫН ТАСЛАХ ХААЛТЫГ ШИНЭЧЛЭН АЛСЫН ЗАЙН ХЯНАЛТ УДИРДЛАГЫН СИСТЕМД ХОЛБОСОН НЬ

Гантулгын УЯНГА[1], Оршуугийн ЧИМЭД[2]

[1]ЖМДМ ХХК

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: gn.uyang@gmail.com[1], chimedo@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Дулааны эрчим хүчний хэрэглээ сүүлийн жилүүдэд тогтмол өсөж, жилд дунджаар 150-240Гкал/цаг-ийн дулааны тооцоот ачаалал бүхий 350-500 гаруй барилга байгууламж төвлөрсөн дулаан хангамжид шинээр холбогдож байна. Үүний үр дүнд дулаан түгээлт жилдээ 4-7 хувиар нэмэгдэх хандлагатай байна. Мөн Монгол Улсын Засгийн газрын 274-р тогтоолоор батлагдсан "Эрчим хүч хэмнэх үндэсний хөтөлбөр"-ийн хүрээнд дулааны эрчим хүчийг хэмнэх, үр ашигтай ашиглах арга хэмжээнүүдийг хэрэгжүүлж байна. Энэхүү хөтөлбөртэй уялдуулан Улаанбаатар хотын дулааны шугам сүлжээний засвар үйлчилгээ, ашиглалтын ажлыг сайжруулах зорилгоор хаалтуудыг автоматжуулж, алсын зайн хяналт удирдлагын SCADA системд холбосон. Ингэснээр дулааны шугамын 11 байршилд суурилуулсан нийт 45 таслах хаалтыг алсаас удирдах боломж бүрдэж, бодит цагийн мэдээллийг GSM модем ашиглан үүрэн холбооны сүлжээгээр дамжуулан төв серверт хүргэх шийдэл хэрэгжсэн. Уг судалгааны ажлаар дээрх системийн техникийн шийдэл, ажиллагааны зарчим, үр өгөөжийг авч үзсэн болно.**

Түлхүүр үг: Дулааны шугам сүлжээ, SCADA систем, алсын зайн удирдлага, автоматжуулалт

I. ОРШИЛ

"УБДС" ТӨХК нь нийслэл хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системд холбогдсон нийт хэрэглэгчдийг дулааны эрчим хүчээр хэвийн найдвартай, тасралтгүй хангах, дамжуулах сүлжээний дулааны хүчний хэмнэлт болон өсөн нэмэгдэх хэрэглээг хангах үндсэн чиг үүрэгтэйгээр эх үүсгүүрүүдэд үйлдвэрлэсэн дулааны эрчим хүчийг өөрийн эзэмшлийн 373 км урттай 16 магистраль шугам, даралт өргөх 10 насос станцаар дамжуулан төвлөрсөн дулаан хангамжид холбогдсон аж ахуйн гэрээтэй 2838 хэрэглэгч нийт 3558.2 Гкал/ц-ийн дулааны ачаалал бүхий 13540 барилга, байгууламжийн дулааны эрчим хүчний хэрэглээг хангаж ажиллаж байна [1].



Зураг 1. Улаанбаатар хотын дулааны шугам сүлжээний схем

Дулааны эрчим хүчний хэрэглээний өсөлт сүүлийн жилүүдэд жилд дунджаар 150-240 Гкал/ц-ийн дулааны тооцоот ачаалал бүхий 350-500 гаруй барилга байгууламж төвлөрсөн дулаан хангамжид шинээр холбогдон дулаан түгээлт жилдээ 4-7 хувиар өссөн үзүүлэлттэй байна [2].

Хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн систем нь олон магистраль шугам, зангилаа, насос станц болон таслах хаалтуудаас бүрдсэн томоохон инженерийн систем юм [3]. Иймд системийн найдвартай ажиллагааг хангахын тулд технологийн параметрүүдийг тасралтгүй хянах, тоног төхөөрөмжийг шуурхай удирдах боломжтой байх шаардлагатай.

Дулааны шугам сүлжээний таслах хаалтууд нь системийн ажиллагаанд чухал үүрэг гүйцэтгэдэг бөгөөд аваар саатлын үед тухайн хэсгийг тусгаарлах, шугамын горимыг тохируулах, засвар үйлчилгээ хийхэд ашиглагддаг. Гэвч уламжлалт ашиглалтын үед эдгээр хаалтуудыг газар дээр нь очиж удирддаг тул үйл ажиллагааны хугацаа уртсах, хүний нөөц их шаарддаг зэрэг хүндрэлүүд үүсдэг.



Зураг 2. Ган бөмбөлгөн хаалт Ф700мм

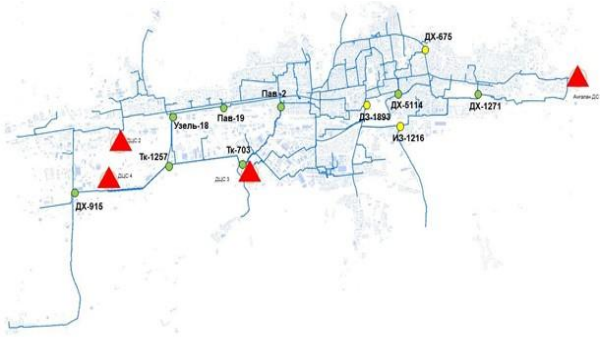
Улаанбаатар хотын дулааны шугам сүлжээний зарим зангилаанд байрлах таслах хаалтууд нь олон жилийн турш ашиглагдсан бөгөөд механик элэгдэл үүсэж, хаалтын жийргэвчийн битүүмжлэл муудах, ажиллагааны найдвартай байдал буурах зэрэг асуудлууд гарч байсан. Иймээс ашиглалтын

шаардлага хангахгүй болсон хаалтуудыг шинэчилж, орчин үеийн автоматжуулалтын системд холбох шаардлага бий болсон.

Дулааны шугамын ажиллагааны найдвартай байдлыг сайжруулах зорилгоор хуучирсан таслах хаалтуудыг шинэчилж, алсын зайн хяналт удирдлагын SCADA системийг нэвтрүүлэх ажлыг хэрэгжүүлэв.

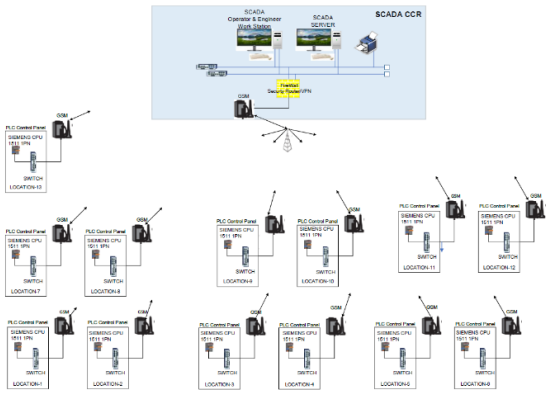
II. СИСТЕМИЙН БҮТЭЦ БА СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Системийн найдвартай ажиллагаанд өндөр ач холбогдол бүхий зангилаа цэгүүдийг сонгон авч шинэчлэл хийсэн бөгөөд судалгаанд ТК-703, ТК-1257, ДХ-915, ТК-1301, Узель-18, ПАВ-19, ПАВ-2, ДХ-5114 (ТК-542), ДХ-1271, ДХ-675, ТК-643 зэрэг нийт 11 байршил хамрагдсан.



Зураг 3. Скада системийн хяналтын схем

Дулааны шугам сүлжээний таслах хаалтуудын алсын зайн хяналт удирдлагын систем нь талбайд байрлах PLC (программчлагдах логик контроллер) удирдлагын самбарууд, мэдээлэл дамжуулах GSM модем IOT2050 холбооны сүлжээ болон төвлөрсөн скада хяналт удирдлагын системээс бүрдэнэ.



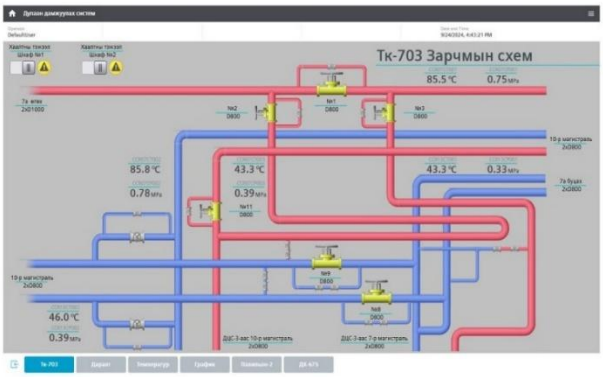
Зураг 4. Алсын зайн хяналт удирдлагын системийн ерөнхий бүтэц

Дулааны магистраль шугамын зангилаа бүрд PLC удирдлагын самбар суурилуулж цахилгаан редуктортой таслах хаалт, даралт болон температур мэдрэгчүүдийг холбосон. Эдгээр мэдрэгчүүд нь дулаан зөөгчийн технологийн параметрүүдийг хэмжиж, хэмжилтийн мэдээллийг PLC-д дамжуулдаг. PLC нь талбайн төхөөрөмжүүдийн ажиллагааг удирдах болон хэмжилтийн мэдээллийг боловсруулах үүргийг гүйцэтгэнэ.



Зураг 5. Удирдлагын самбарын дотоод зохион байгуулалт

PLC удирдлагын самбаруудыг GSM модем ашиглан үүрэн холбооны сүлжээгээр төв хяналтын системтэй холбосон ба төв хяналт, удирдлагын хэсэгт байрлах скада сервер болон операторын компьютерууд нь талбайн төхөөрөмжүүдээс ирсэн мэдээллийг бодит цаг хугацаанд хянах, мэдээллийг архивлах болон таслах хаалтуудыг алсын зайнаас удирдах боломжийг бүрдүүлдэг. Системийн хяналт удирдлагад Siemens компанийн WinCC unified программ хангамжийг ашигласан.



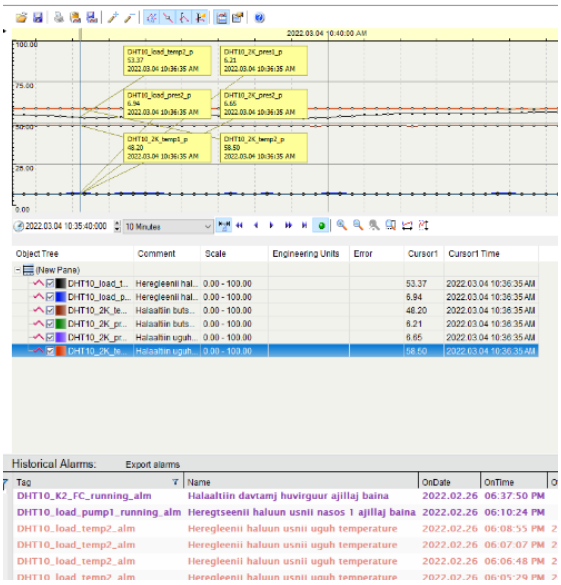
Зураг 6. Зарчмын схем /ТК-703/

Системийн ажиллагааг туршилт, хэмжилтийн аргаар үнэлж, шинэчлэл хийхээс өмнөх болон дараах горимын үзүүлэлтүүдийг харьцуулалтын аргаар шинжилсэн. Мөн таслах хаалтуудын ажиллагааг гар удирдлага болон алсын удирдлагын горимд ажиллуулж:

- Ажиллагааны хугацаа
- Хариу үйлдлийн хурд
- Системийн найдвартай байдал зэрэг үзүүлэлтүүдийг харьцуулан үнэлэв.

Цуглуулсан өгөгдлийн SCADA системд архивлан, параметрийн өөрчлөлтийн графикаар боловсруулж, хэвийн болон хэвийн бус горимыг тодорхойлсон.

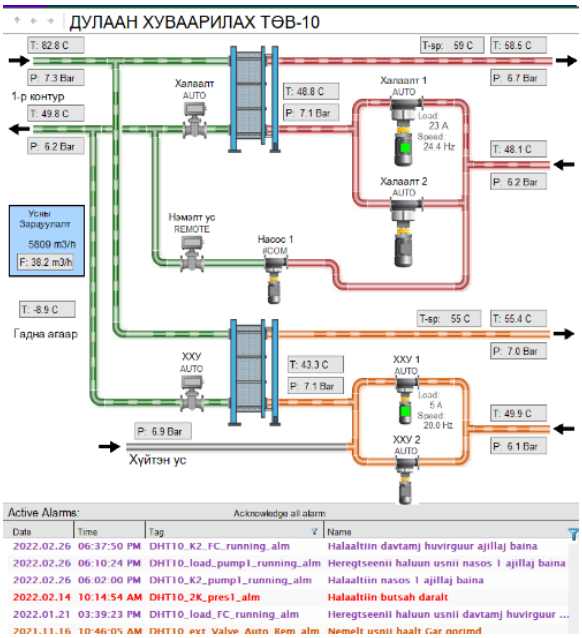
Энэхүү шийдлийн үр нөлөөг үнэлэхдээ системийн ажиллагаанд үзүүлэх нөлөө, аваар сааталд хариу үзүүлэх хугацаа, хүний оролцооны бууралт, ашиглалтын зардлын өөрчлөлт зэрэг шалгуурыг ашигласан.



Зураг 7. Технологийн схем

III. ҮР ДҮН

GSM модем болон үүрэн холбооны сүлжээг хяналт удирдлагад ашигласнаар талбайн төхөөрөмжүүдийг төв хяналтын системтэй холбохдоо шилэн кабель татах шаардлагагүй болж, холбооны дэд бүтцийн байгууламжийн зардлыг бууруулах боломж бүрдсэн.



Зураг 8. Параметрийн график

Мөн даралт болон температурын мэдрэгчүүдийг зангилаа бүрт суурилуулснаар дулааны шугамын технологийн параметрүүдийг бодит цаг хугацаанд хянах боломж бий болсон. Энэ нь системийн ажиллагааны горимыг тогтвортой байлгах, хэвийн бус өөрчлөлтийг эрт илрүүлэх нөхцөлийг бүрдүүлж байна.

IV. ДҮГНЭЛТ

1. Дулааны шугам сүлжээний таслах хаалтуудыг автоматжуулж, алсын зайн хяналт удирдлагын системд холбосноор дулаан хангамжийн системийн ажиллагааг төвлөрсөн байдлаар хянах, удирдах боломж бүрдсэн.
2. SCADA системийг нэвтрүүлснээр дулааны шугамын даралт болон температур зэрэг технологийн үндсэн параметрүүдийг бодит цаг хугацаанд хянах нөхцөл бүрдэж, системийн ажиллагаанд гарч болзошгүй өөрчлөлт, доголдлыг эрт илрүүлэх боломж нэмэгдсэн.
3. Аваар саатлын үед шугамын гэмтэлтэй хэсгийг богино хугацаанд тусгаарлах, хэрэглэгчдэд үзүүлэх нөлөөллийг багасгах, тасралтгүй ажиллагааг хангах нөхцөл сайжирсан.
4. Автоматжуулалтын шийдлийг хэрэгжүүлснээр хүний оролцоог бууруулж, ажиллагааны алдаа багасгах, хөдөлмөрийн бүтээмж нэмэгдэх, ашиглалтын зардал буурах зэрэг эдийн засгийн үр ашиг бий болсон.
5. GSM модемд суурилсан шийдэл нь дэд бүтцийн хөрөнгө оруулалтыг бууруулахын зэрэгцээ алслагдсан зангилаа цэгүүдийг хямд өртгөөр холбох боломжийг бүрдүүлсэн.
6. Цаашид энэхүү системийг өргөтгөн хөгжүүлж, өгөгдөлд суурилсан удирдлага, ухаалаг хяналтын систем, урьдчилан таамаглах засвар үйлчилгээний технологитой уялдуулах боломжтой.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Б.Намхайням, “Дулаан хангамжийн систем”,Улаанбаатар хот, 2019 он.

[2] http://www.erc.gov.mn/mn/

[3] Улаанбаатар дулаан хангамжийн төсөл, техникийн шаардлага, Улаанбаатар хот, 2023 он.

[4] http://www.siemens.com/

[5] КМС үйлдвэрийн хаалтны техникийн тодорхойлолт, БНСУ, 2023 он.

СТАНЦЫН ХАЯГДАЛ ДУЛААНЫГ АБСОРБЦОН ХӨРГӨХ СИСТЕМД АШИГЛАХ СУДАЛГАА (АМГАЛАН ДС-ын ЖИШЭЭН ДЭЭР)

Мөнх-Амгалангийн МӨНХЗУЛ[1], Даваасүрэнгийн РЭНЦЭНДОРЖ[2], Гэрэлт-Одын ТӨРМӨНХ[3], Мягмарсүрэнгийн ОЮУН-ЭРДЭНЭ[4]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автомажуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: zulaa115612@gmail.com[1]

Хураангуй: **Сүүлийн жилүүдэд Улаанбаатар хотын дулааны ачааллыг бууруулах зорилгоор нийслэлд Шархад, Яармаг, Дэнжийн мянга, Морингийн даваа гэх мэт 10 орчим тархмал дулааны станц барихаар төлөвлөж, газар чөлөөлөлт болон ТЭЗҮ-ийн ажлууд хийгдэж байна. ДЦС болон дулааны станцын өндөр температуртай яндангийн хийг шууд хүрээлэн буй орчинд хаях нь зөвхөн эрчим хүчний үр ашиггүй алдагдал төдийгүй дэлхийн дулаарлын эрчийг нэмэгдүүлэхэд нөлөөлдөг. Иймд энэхүү алдагдаж буй эрчим хүчийг ашигтай хэлбэрээр эргүүлэн ашиглах чиглэлээр дэлхий даяар судалгаа, хөгжүүлэлтийн ажлууд эрчимтэй хийгдэж байна [2]. Энэхүү судалгааны ажлын үндсэн зорилго нь 116 МВт-ын хүчин чадалтай дулааны станцын яндангийн хийн ашиглагдаагүй дулааны энергийг ашиглан, дулааны цахилгаан станцад шаардагдах их хэмжээний хөргөлтийн ачааллыг хангах хөргөлтийн системд ашиглах боломжийг судлахад оршино. Яндангийн хийн хаягдал дулааныг уур шингээлтийн хөргөлтийн төхөөрөмжид ашиглах бөгөөд үүнд хий–шингэний олон дамжлагат хөндлөн урсгалт дулаан солилцуурыг хэрэглэнэ. Энэхүү дулаан солилцуур нь одоо байгаа зуух болон яндангийн хоорондын зайд байрлуулахаар төлөвлөгдсөн. Абсорбцон хөргөх машин нь Уурын компрессорт хөргөх машинаас эрчим хүчний хэрэглээ багатай, байгаль орчинд ээлтэй байдгаараа давуу. Иймд энэхүү судалгааны ажил нь дулааны цахилгаан станцын хэвийн ажиллагааны үед хаягдаж буй утааны хийн дулааны эх үүсгүүртэй АХМ-г ашиглах боломжийг судалж, улмаар озоны давхаргыг задалдаг бодисын хэрэглээг бууруулах зорилготой. Төслийн ажлын хүрээнд дулаан солилцуурын хэд хэдэн хувилбаруудаас эдийн засгийн хувьд хамгийн оновчтой хийцийг сонгон эцсийн загвараар тодорхойлж, хий–шингэний олон дамжлагат хөндлөн урсгалт дулаан солилцуурын нарийвчилсан хийцийн параметрүүд дээр үндэслэн IPSEGO, ANSYS программ хангамжийг ашиглан инженерийн тооцоо, CFD шинжилгээг гүйцэтгэсэн.**

Түлхүүр үг: Яндангийн хий, дулаан солилцуур, хөндлөн урсгал, эрчим хүчний үр ашиг, озоны давхарга,

I. УДИРТГАЛ

Үйлдвэрийн хаягдал дулаан гэдэг нь үйлдвэрлэлийн технологийн явцад үүсдэг боловч бодит хэрэглээнд ашиглагддаггүй энергийг хэлнэ. Хаягдал дулааны эх үүсвэрт өндөр температуртай яндангийн хий, уурын хаягдал урсгал, халуун шингэнүүд, мөн тоног төхөөрөмжийн гадаргуугаас дамжуулалт, конвекц болон цацраг хэлбэрээр алдагдах дулаан ордог. Судалгааны үр дүнд үйлдвэрлэлийн салбарт хэрэглэгдэж буй нийт эрчим хүчний 20–50 орчим хувь нь хаягдал дулаан хэлбэрээр алдагддаг гэж тооцоолсон байдаг.

Тоног төхөөрөмжийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, эсвэл хаягдал дулааныг дахин ашиглах технологи нэвтрүүлэх замаар үйлдвэрлэлийн процесст гарах зарим хаягдал дулааны хэмжээг бууруулах боломжтой. Хаягдал дулааныг цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх, шаталтын агаарыг урьдчилан халаах, барилга байгууламжийг халаах, хөргөлт болон агааржуулалтын системд ашиглах зэрэгт ашиглаж болно. Ингэснээр түлш, цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг бууруулж, нийт эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэхийн зэрэгцээ хүрээлэн буй орчны бохирдол болон дэлхийн дулаарлын бууруулахад чухал ач холбогдолтой.

Хаягдал дулааныг дахин ашиглахад дараах үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүд (Зураг 1) шаардлагатай байдаг. Үүнд:

1. Хүртээмжтэй хаягдал дулааны эх үүсвэр
2. Хаягдал дулааныг сэргээн ашиглах технологи
3. Сэргээн ашигласан дулааны эцсийн хэрэглээ

Энэхүү судалгааны ажлын үндсэн зорилго нь 116 МВт-ын хүчин чадалтай Амгалан дулааны станцын зуухнаас гарч буй яндангийн хийнд агуулагдах хаягдал дулааныг (хаягдал дулааны эх үүсвэр болгон) ашиглан Абсорцон хөргөлтийн системийг ажиллуулах боломжийг судлахад оршино. Ингэснээр станцын технологийн хэсгүүдэд шаардагдах хөргөлтийн ачааллыг хангаж болохоос гадна фреоноор ажилладаг уурын компрессорт хөргөлтийн системийг орлуулах боломж бүрдэнэ.

Яндангийн хийн хаягдал дулааныг абсорбцон хөргөлтийн төхөөрөмжид ашиглахдаа хий–шингэний хөндлөн урсгалт дулаан солилцуурыг хаягдал дулаан сэргээн ашиглах төхөөрөмж болгон хэрэглэнэ. Энэхүү дулаан солилцуур нь эдийн засгийн хувьд хамгийн оновчтой хийцтэй, одоо байгаа зуух болон яндангийн хоорондох сул зайд байрлуулахаар төлөвлөгдсөн[3].

Энэхүү хийцийг хий–шингэний олон дамжлагат хөндлөн урсгалт дулаан солилцуурын нарийвчилсан хийцийн параметрүүдэд үндэслэн ANSYS программ хангамжийг ашиглан инженерийн тооцоо, шинжилгээнд хамруулсан. Мөн уг судалгааны ажил нь яндангийн хийн температурыг бууруулах замаар

агаарын бохирдол болон дэлхийн дулаарлын эрчийг сааруулахад хувь нэмэр оруулах зорилготой.

Энэхүү ажлын хүрээнд зөвхөн дулаан солилцуурын хийцийн тооцоо, шинжилгээг хамруулан авч үзсэн болно. Харин уур шингээлтийн хөргөлтийн төхөөрөмжийн техникийн үзүүлэлтүүдийг тухайн судалгаанд авч үзэж буй дулааны цахилгаан станцын хөргөлтийн ачааллын шаардлагад нийцүүлэн сонгон тодорхойлох болно.



1-р зураг. Хаягдал дулааныг дахин ашиглах үндсэн бүрэлдэхүүн [3]

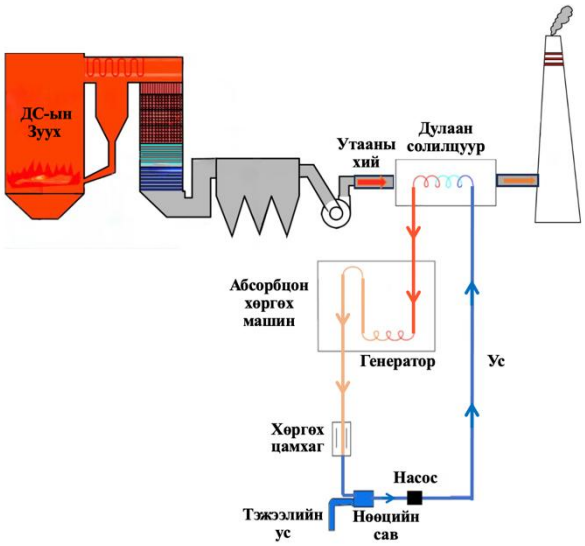
II. АРГА ЗҮЙ БА МАТЕРИАЛ

1. Тоног төхөөрөмжийн зарчмын схем, ажиллагааны зарчим

Тус систем нь нэмэлт тэжээлийн зориулалттай усны нөөцийн сав, насос, дулаан солилцуур, абсорбцон хөргөх машин, мөн хөргөлтийн цамхаг зэрэг үндсэн хэсгүүдээс бүрдэх бөгөөд эдгээр нь тохирох хэмжээ, диаметр бүхий хоолойнуудаар холбогдсон байна.

Зураг 2-т санал болгож буй системийн нарийвчилсан схемийг үзүүлсэн болно. Дулаан солилцуурыг абсорбцон хөргөх машинд шаардлагатай дулаан өгөлтийг хангахуйц хийц, техникийн үзүүлэлттэй байхаар сонгоход анхаарах хэрэгтэй.

Системийн бусад бүрэлдэхүүн хэсгүүд болох усны нөөцийн сав, насос, мөн холбох хоолойн диаметр, уртыг системийн шаардлагатай зарцуулалт болон ажиллагааны нөхцөлд үндэслэн сонгоно.



2-р зураг. ДС-д ашиглах АБХ машины зарчмын схем

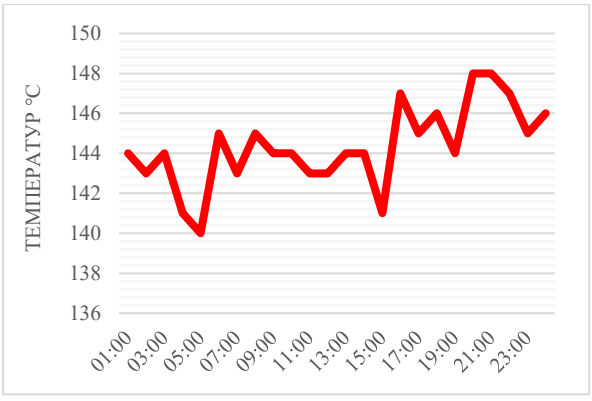
Энэхүү системийг хаягдал дулааныг каскад буюу шаталсан зарчмаар сэргээн ашиглах байдлаар санал болгосон бөгөөд ингэснээр хаягдал дулааныг илүү үр ашигтай хэрэглэх боломжтой. Ажлын процесс нь 135 °С-н дундаж температуртай утааны хийнээс аль болох их дулааныг сэргээн авах зорилготойгоор төлөвлөгдсөн.

Амгалан ДС-ын зуухны техникийн үзүүлэлт, утааны хийн температурын өөрчлөлтийг хоног, жилээр дараах графикаар харуулав.

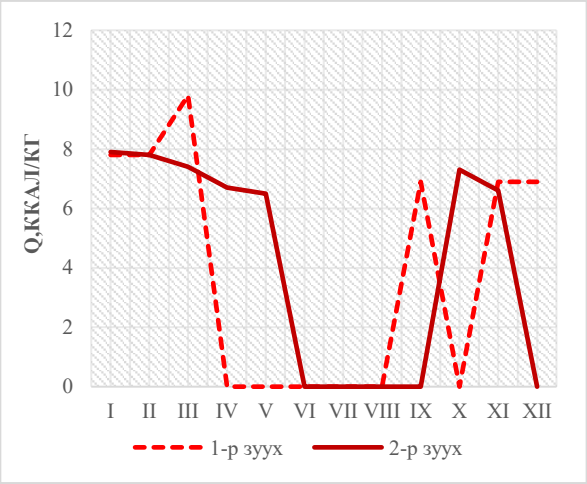
УС ХАЛААХ ЗУУХНЫ ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Утга
Загвар	QXF116-1.6/130/70-L
Хэвийн дулаан үйлдвэрлэл	116 МВт
Хэвийн даралт	1.6 МПа
Гарах усны тооцоот температур	130ºС
Буцах усны температур	70ºС
Гарах утааны хийн температур	135ºС
Нүүрсний төрөл	Багануур, шивээ овоо
Нэмэх элсний хэмжээ	1500 кг/ц
Нүүрсний зарцуулалт	30.33 т/ц
Зуухны тооцоот үр ашиг	90.93%



3-р зураг. Утааны хийн температур (24 цагаар)



4-р зураг. Утааны хийнээс ялгарах дулаан (жилээр)

Утааны хийнээс дулааныг дамжуулах ажлын биеэр усыг сонгосон бөгөөд энэ нь харьцангуй элбэг, хоргүй шинж чанартайгаас гадна дулаан багтаамж өндөртэй давуу талтай. Дулааны станцын зуухнаас гарсан утааны хийн дундаж температур 135 °C байхыг дараах хэмжилтүүдээр тодорхойлсон.

Иймээс тооцоот температураас өндөр температуртай, хаягдал дулаан агуулсан утааны хийг олон дамжлагат хөндлөн урсгалт дулаан солилцуур руу чиглүүлэн урсгана. Утааны хий дулаан солилцуурт дулаанаа өгсний дараа яндангаар дамжин гадагшилна.

Усны нөөцийн савнаас дулаан солилцуур руу усыг шахахын тулд урьдчилан тодорхойлсон үзүүлэлттэй усны насос ашиглана. Ус дулаан солилцуурын олон дамжлагат хоолойгоор каскад процессын дагуу урсаж, хална.

Халаагдсан ус нь системд үүсэх даралтын зөрүүгээр абсорбцон хөргөх машины генераторын уусмал агуулсан хэсэг рүү дамжина. АБХМ-с гарсан ус нь хөргөлтийн цамхаг руу дамжин орж хөргөгдөнө.

Хөргөгдсөн ус дараа нь усны нөөцийн сав руу буцаж орж, тэндээс насосоор дахин дулаан солилцуур руу шахагдан системд эргэлт үүсгэнэ. Мөн системийн явцад гарч болзошгүй усны алдагдлыг нөхөх зорилгоор нөөцийн саванд нэмэлт тэжээлийн ус нийлүүлэх зохицуулалтыг хийж өгсөн байна.

2. Тоног төхөөрөмжийн тооцоо

- Утааны эхний дундаж температур 135°C
- Хөндлөн огтлол 9м^2
- Утааны урсгалын хурд 6...10м/с
- Утааны эцсийн дундаж температур 115°C
- Утаанаас ялгарах дулаан

$$Q_{ут} = m \cdot C_{ут} \cdot \Delta t \qquad (1)$$

Үүнд;

- $C_{ут} = 1{,}05$ кДж/кг · к
- Δt=20 °C
- $m = \varrho \cdot m \cdot u = 76.5$кг/с
- ϱ=0.85 кг/м^3 (135°C үед)
- u=6÷10м/с тооцоонд u=10м/с

Утааны хийнээс авах дулааны хэмжээ [2]

$$Q_{ут} = 76{,}5 \cdot 1{,}05 \cdot 20 = 1530 \text{ кВт}$$

Дулаан солилцуурын үр ашиг 40÷65% гэвэл бодит ашиглах дулааны хэмжээ,

$$Q_{бод} = 612 \ldots 918 \text{ кВт}$$

Генераторт өгөх дулаан

$$Q_{ген} = 1530 \text{ кВт}$$

Олон улсын жишгээр NH_3-H_2O уусмалын концентрацыг 55% авсан[5].

Нүүрсний шаталтаас үүсэх 100...150°C утааны хийн дулааныг ашигладаг Абсорбцон хөргөх машины COP=0.45...0.6 тул тооцоонд COP=0.5 авлаа. Эндээс хөргөх хүчин чадал

$$Q_0 = 0{,}5 \cdot 1530 = 765 \text{ кВт байна.}$$

Энэ хүйтнийг:

- дата төв
- хүнсний агуулах
- нүүрсний уурхайн агааржуулалт
- төвлөрсөн хөргөлтийн систем зэрэгт ашиглах боломжтой юм.

NH_3-H_2O ийн хольцын буцлах температур t=90°C
Ууршиж эхлэх температур t=95°C гэвэл
Уусмалын дундаж температур $t_{дун}$=92°C байна.

$$\Delta T_1 = 135 - 92 = 43°C$$

$$\Delta T_2 = 115 - 92 = 23°C$$

$$\Delta T = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = 32°C \qquad (2)$$

$$к = 40 \ldots 70 \text{ Вт/м}^2\text{к}$$

$Q_{ген}$=1530 кВт бол генераторын шаардлагатай дулаан солилцох талбайн хэмжээ $F = 956\text{м}^2$
Үүнд: шугамын диаметр 38мм, 5...6м, 80 ... 1000ш байна.

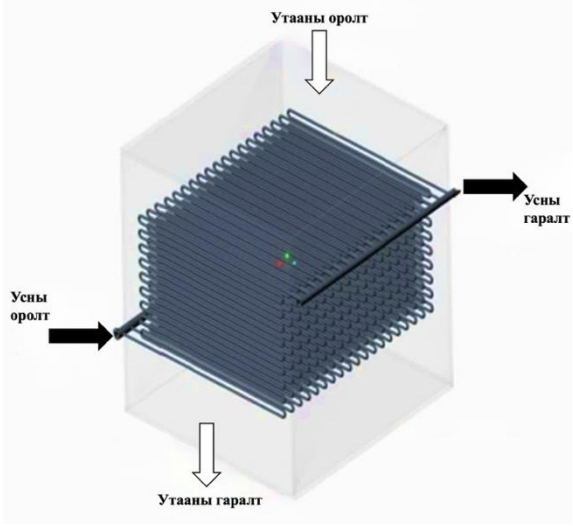
УСНЫ ҮЗҮҮЛЭЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Утга
Усны оролтын температур	20-30 °C
Усны гаралтын температур	90-95 °C
Температурын өсөлт	≈50 °C

3. Дулаан солилцуурын тооцоо

Хамгийн тохиромжтой нь хий-шингэний олон эсрэг урсгалт дулаан солилцуур байна. Утаа хоолойн гадна талаар, ус хоолойн дотор талаар урсаж дулаан солилцоно.



5-р зураг. Эсрэг урсгалт дулаан солилцуурын загварчилсан 3D дүрслэл

ДУЛААН СОЛИЛЦУУРЫН ХИЙЦИЙН ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

4-Р ХҮСНЭГТ

Параметр	Утга
Хоолойн диаметр	40 мм
Хоолойн урт	3 м
Материал	Ган
Хоолойн алхам	60 мм
Нэг эгнээнд	50 м
Нэг секц дэх хоолойн тоо	50 × 50 (2500)
Өргөн	3 м
Өндөр	3 м

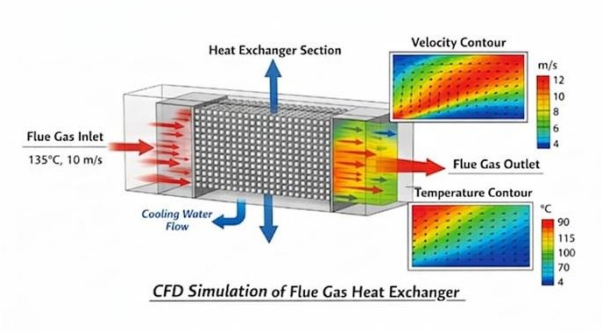
Эндээс дулаан солилцуурын шаардлагатай талбайн хэмжээ:

$$F = 956 \div 1000 м^2 \text{ байна.}$$

ДУЛААН СОЛИЛЦУУР ДАХ ДАРАЛТЫН УНАЛТЫН ТООЦОО

5-Р ХҮСНЭГТ

Параметр	Утга
ΔP Даралтын алдагдал, Па	300÷600Па (ДЦС, ДС-д зөвшөөрөгдөх хэмжээ)
Усны зарцуулалт, $м^3$/ц	36 $м^3$/ц



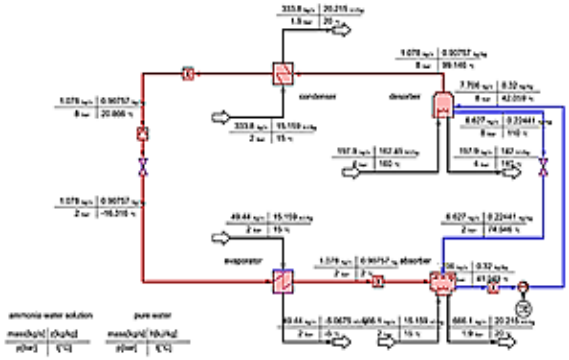
6-р зураг. Утааны хийн дулаан солилцуурын CFD симуляци

CFD шинжилгээний үр дүнгээс харахад утааны хий дулаан солилцуурын блок дундуур жигд тархан урсаж байна. Урсгалын дундаж хурд 8–12 м/с, температур нь 135°C-аас 105°C хүртэл буурч байна. Дулаан солилцуурын даралтын алдагдал 300–600 Па орчим байгаа нь ДС болон ДЦС-ын утааны системд зөвшөөрөгдөх хэмжээнд байна. CFD шинжилгээгээр энэхүү систем нь жилдээ ойролцоогоор 2.4 МВт дулаан сэргээн авах боломжтойг харуулж байна.

УУР-ШИНГЭНИЙ ДУЛААН СОЛИЛЦУУР

3-Р ХҮСНЭГТ

Параметр	Утга
Утааны орох температур	135℃
Утааны гарах температур	115℃
Утаа зайлуулах хэсгийн сувгийн огтлол	$9м^2$
Утааны хурд	10м/с
Зарцуулалт	76.5кг/с



7-р зураг. IPSEGO программын загварчлалын схем

Үр дүн:

- Сэргээн ашиглах дулаан: 2.5МВт/жил
- Генераторт өгөх дулаан: 1350кВт/цаг
- Хөргөлтийн ачаалал: 160 кВт
- ДС-ын дараах утааны хийн температурын хамгийн бага температур: 105°C
- COP: 0.65

III. АБСОРБЦОН ХӨРГӨЛТИЙН МАШИНЫ ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

Дулаан баланс

$$Q_{gen} + Q_{evap} = Q_{ab} + Q_{con} \quad (3)$$

$$Q_{evap} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{Chilled\ Water} \quad (4)$$

$$Q_{ab} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$Q_{con} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_{Cooling\ Water} \quad (6)$$

COP тооцоо

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{gen}} \quad (7)$$

$$CoolingCapacity = \frac{Q_{evap}}{3.5} \quad (8)$$

Хөргөлттэй агуулахын ачаалал [4], [7]

$$Q_{wall} = A \cdot U \cdot \Delta T\ (T_{surr} - T_{coldstorage}) \quad (10)$$

$$Q_{roof} = A_{roof} \cdot U \cdot \Delta T\ (T_{surr} - T_{coldstorage}) \quad (11)$$

$$Q_{floor} = A_{floor} \cdot U \cdot \Delta T\ (T_{surr} - T_{coldstorage}) \quad (12)$$

$$Q_i = V_{storage} \cdot x_i \cdot q_i/24\ hours \quad (13)$$

$$Q_1 = m \cdot C_o \cdot \Delta T\ (T_{surr} - T_{freeze}) \quad (14)$$

$$Q_2 = m \cdot C_l \quad (15)$$

$$Q_3 = m \cdot C_u \cdot \Delta T\ (T_{freeze} - T_{coldstorage}) \quad (16)$$

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (17)$$

АБСОРБЦОН ХӨРГӨЛТИЙН МАШИНЫ ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

6-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Утга
Загвар	BROAD X BE75
Хөргөлтийн хүчин чадал	765 kW
Нэрлэсэн яндангийн хийн температур	135°C
COP	1.41
NH3-H2O	55%
Конденсатын температур	95°C
Хөргөлтийн усны температур	7°C / 14°C
Хий-шингэний дулаан солилцуурын өмнө ба дараах усны температур	30°C /95°C
Эрчим хүчний эх үүсвэр	Утааны хийтэй хаягдах дулаан

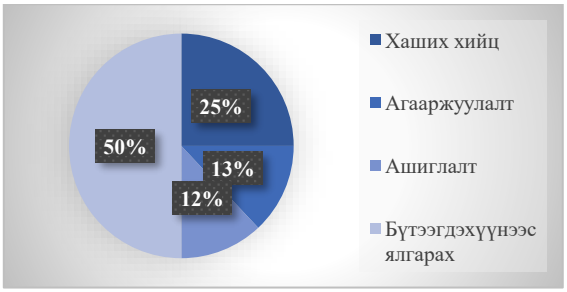
IV. ХӨРГӨХ БАЙГУУЛАМЖИЙН ТООЦОО

Хөргөх байгууламжийн дулааны ачааллын харьцааг дараах зураг харуулав.

ХӨРГӨХ БАЙГУУЛАМЖИЙН БАРИЛГЫН ХИЙЦ

7-Р ХҮСНЭГТ

Материал	Зузаан, м	Дулаан нэвтрүүлэлтийн коэффициент, Вт/м*к
Цементэн өнгөлгөө	0.02	0.88
Хөөсөн блок	0.3	0.08
Битум	0.004	0.3
Пенополиуретан	0.15	0.041
Мазайкан бетон хавтан	0.06	0.87
Бетонон ул	0.2	1.4
Нимгэн төмөр үе	0.012	0.13
Арматуртай бетон	0.04	1.4



8-р зураг. Хөргөлтийн системийн дулааны ачааллын харьцаа

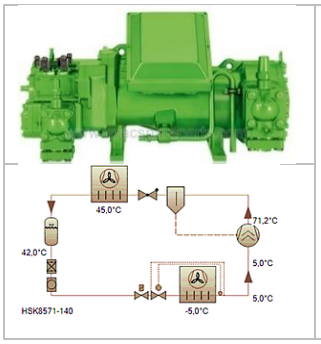
Компрессорын шаардлагатай хүйтэн үйлдвэрлэлийг тодорхойлохдоо хөргөх байгууламжийн нийт хүйтний хэрэгцээг к-хүйтний алдагдлын коэффициентоор үржүүлж тооцдог. Энэ коэффициент нь тоног төхөөрөмжийн ажиллагааны хэлбэлзэл, нэмэлт дулааны алдагдал болон найдвартай ажиллагааг хангах зорилготой.

$$Q_{км} = к \cdot \sum Q = 1 \times 160 = 160\ кВт$$

Шаардлагатай хөргөх чадлыг BITZER SOPTWARE программ ашиглан компрессор сонголт хийв.

ХӨРГӨЛТИЙН ТӨХӨӨРӨМЖИЙН ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

8-Р ХҮСНЭГТ



HSK8581-160-40P
Cooling capacity 80 кВт
Evap. capacity 160 кВт
Power input 124.3 кВт
Conden. capacity 437 кВт
COP/EER 2.52

Төхөөрөмжийн жилийн хугацаанд ажиллах хугацаа

$$t = 300 \times 12 = 3600\ цаг$$

Жилийн эрчим хүчний зарцуулалт

$$E = 124{,}3 \cdot 3600 = 447480\ кВт$$

Сарын эрчим хүчний зарцуулалт

$$447480/12 \approx 37290\ кВт$$

ХӨРГӨЛТИЙН ТӨХӨӨРӨМЖИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ХЭРЭГЛЭЭ

9-Р ХҮСНЭГТ

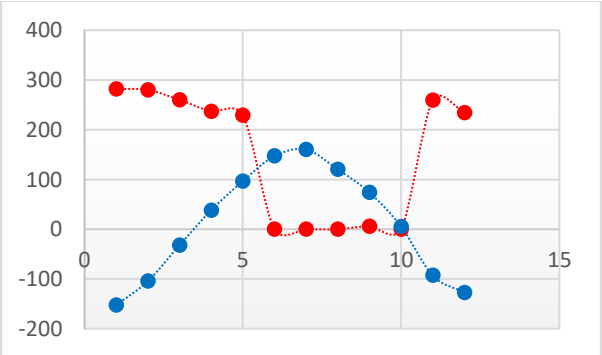
Эрчим хүчний хэрэглээ	Үнийн дүн, ₮
Өдрийн тарифаар	5 834 019
Шөнийн тарифаар	4 312590
Сараар	10 146 609
Жилээр	121 759 308

Хүлэмжийн хийн ялгарлыг тооцъё.

$$PE_{цх} = 32.03211\ тн\ CO_2$$

$$CO_2 = m \times GWP = 8.59 \times 3922 = 33.7\ тн\ CO_2$$

Амгалан ДС-аас авсан судалгаагаар 6-10 саруудад тэг зогсолт хийдэг. бусад саруудад 1,2-р зуухыг сэлгэн ажилуулдаг байна. Үүнээс хамааралтай, утааны зарцуулалт өөрчлөгдөж энэ нь хөргөх бүтээмжид нөлөөлөхөөр харагдаж байна. Гэтэл хөргөлтийн ачаалал дулааны улиралд нэмэгддэг тул энэ хамаарлыг дараах графикаар илэрхийлж дүгнэлээ.



9-р зураг. АБХМ-ны утаанаас авах дулаан, хөргөлтийн хэрэгцээт ачааллын хамаарлын график

Эндээс: Өвлийн улиралд утааны дулааныг сэргээн ашиглах боломжтой. Харин 3-р сард абсорцсон хөргөх машиныг ашиглаж болох боловч үр ашиг муутай. Зуны улиралд дулааны станц ажлахгүй тул судалгаанд тооцож сонгосон HSK8581-160-40P агрегатыг ажилуулах шаардлагатай болж байна.

V. ДҮГНЭЛТ

Нүүрсний цахилгаан станцын утааны хийн дулааныг ашиглан аммиакын уусмалаар ажилладаг абсорбцон хөргөх машины системийг ажиллуулах боломжтойг тогтоов. Судалгааны үр дүнгээс харахад 135 °C температуртай утааны хийн дулаанаас жилдээ ойролцоогоор 2.5 МВт дулааныг сэргээж, 160 кВт хүчин чадалтай абсорбцон хөргөх машиныг ажиллуулах боломжтой байна.

CFD шинжилгээний үр дүнгээс харахад утааны хий дулаан солилцуурын блок дундуур жигд тархан урсаж байна. Урсгалын дундаж хурд 8–12 м/с, температур нь 135°C-аас 105°C хүртэл буурч байна. Дулаан солилцуурын даралтын алдагдал 300–600 Па орчим байгаа нь дулааны цахилгаан станцын утааны системд зөвшөөрөгдөх хэмжээнд байна. CFD шинжилгээгээр энэхүү систем нь жилдээ ойролцоогоор 2.4 МВт дулаан сэргээн авах боломжтойг харуулж байна

Өвлийн улиралд утааны дулааныг сэргээн ашиглах боломжтой. Харин хаврын 3-р сард абсорцсон хөргөх машиныг ажиллуулах боломжтой хэдий ч системийн үр ашиг харьцангуй буурч, эдийн засгийн хувьд оновч багатай.

Станцын хаягдал дулааныг Аборбцон хөргөх смстемд ашиглаж хүйтнийг үйлдвэрлэхэд COP=0.54 байгаа нь эрчим хүчний хэмнэлт гаргаж болохыг баталж байна.

Дулааны станцын ажиллагааны горимоос шалтгаалан 4-р сараас 10-р сар хүртэл станцын ажиллагаа зогсдог тул хаягдал дулааныг ашиглах шийдэл нь дулааны цахилгаан станцанд илүү оновчтой гэж үзэв. Иймд судалгааны ажлын хүрээнд дулааны цахилгаан станцын утааны хийн дулааныг ашиглахыг гүнзгийрүүлэн судлахаар тодорхойлов.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] https://www.vision2050.gov.mn/

[2] Н.Оюунцэцэг, Ж.Цэен-Ойдов “Дулааны станцын курсын төслийн гарын авлага,” Улаанбаатар 2021он.

[3] K. Erdal, K.Erkan, “Can Waste Heat of a Thermal Power Plant Be a Key for Absorption Cooling Systems?” Research Article; Sakarya University Vol. 29, No. 1, 50-70, 2025

[4] M. Mehyo, H. Ozcan, AHA. Hassan, “Thermodynamic Analysis of a Power Plant wasre Heat Drive Absorption Refrigeration System,” Research Article; Madrid, Spain Aug 16-18, 2018. pp. HTFF 106.

[5] M. Jonsson and J. Yan, “Ammonia-water bottoming cycles: a comparison between gas engine and gas diesel engines as prime movers,” *Energy*, vol. 26, no. 1, pp. 31–44. 2001.

[6] D. W. Sun,“Comparison of the performances of NH3-H2O, NH3-LiNO3 and NH3-NaSCN absorption refrigerationsystems,” *Energy conversion management*, vol. 39, pp. 357-368, 1998.

[7] L. H. Zhu, S. J. Wang and J. J. Gu,“Performance investigation of a thermal-driven refrigeration system,” International *Journal of Energy Research*, vol. 32, pp. 939-949, 2008.

ГҮНИЙ УУРХАЙН АГААРЖУУЛАЛТЫН ХАЯГДАЛ ДУЛААНЫГ КОНДИЦИОНЕРЫН СИСТЕМД СЭРГЭЭН АШИГЛАХ СУДАЛГАА

Мөнх-Амгалан МӨНХЗУЛ[1], Мягмарсүрэн ОЮУН-ЭРДЭНЭ[2]
[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим
[2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: zulaa115612@gmail.com[1]

Хураангуй: **Дэлхийн хүйтэн, сэрүүн бүс нутгуудад байрлах гүний уурхайн хувьд газрын гадаргуу дээрх барилга байгууламж болон уурхайн гүнд сэлгэх гадна агаарыг халаах шаардлага үүсдэг. Уурхайн ашиглагдсан агаар нь ихэвчлэн орчны атмосферийн агаараас илүү өндөр температуртайгаар гадагшилдаг тул энэ дулааныг дахин ашиглах боломжийг үнэлэх нь сэргээх боломжтой дулааны хэмжээг ойролцоогоор тооцоолж, уг дулааныг сэргээн ашигласнаар бий болох эрчим хүчний хэмнэлт тодорхойлох чухал алхам болно. Ихэнх уурхайн үйл ажиллагаанд агааржуулалтын системийн зардал нь нийт үйлдвэрлэлийн зардлын томоохон хэсгийг эзэлдэг бөгөөд уурхай илүү гүнзгий болохын хэрээр гүний түвшинд ажиллагсдын аюулгүй байдал болон ажлын нөхцөлийг сайжруулахын тулд агаар хөргөх систем ашиглалт нэмэгддэг. Оюу Толгойн Гүний уурхайн агааржуулалтын систем нь олборлолтын тасралтгүй ажиллагаа, хөдөлмөрийн аюулгүй байдал, ажиллагсдын эрүүл ахуйд шийдвэрлэх нөлөөтэй үндсэн дэд системийн нэг юм. Ялангуяа Монгол Улс зэрэг эрс тэс, хүйтэн уур амьсгалтай бүс нутагт уурхайн ам, босоо ам, агааржуулалтын сувгуудын доторлогоо болон технологийн тоног төхөөрөмжийг хөлдөлтөөс хамгаалах зорилгоор оролтын агаарыг урьдчилан халаах шаардлага үүсдэг. Үүний улмаас их хэмжээний дулааны эрчим хүч зарцуулагдахын зэрэгцээ агааржуулалтын системээр гадагшилж буй гарцын агаар нь атмосферийн агаараас харьцангуй өндөр температуртайгаар алдагдаж, их хэмжээний бага потенциалт хаягдал дулааныг агуулсан хэвээр байна. Гэвч энэхүү дулааны нөөцийг системтэйгээр сэргээн ашиглах технологи одоогийн байдлаар хязгаарлагдмал байгаа бөгөөд эрчим хүчний үнэ өсөх, хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулах шаардлага нэмэгдэж буй нөхцөлд уг асуудал нь эдийн засаг, эрчим хүчний үр ашиг, байгаль орчны хувьд чухал ач холбогдолтойд тооцогдож байна. Иймд энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь гүний уурхайн агааржуулалтын системийн зайлуулах агаарт агуулагдах хаягдал дулааны нөөцийг тооцоолон үнэлж, гликолийн уусмал бүхий дулаан солилцуурт суурилсан шийдлээр дулааныг сэргээн ашиглах боломжийг судалж, улмаар эрчим хүчний хэрэглээг бууруулах болон системийн ажиллагааны үр ашгийг тоон шинжилгээ, загварчлалын аргаар тодорхойлоход оршино.**

Түлхүүр үг: Ашиглагдсан агаар, дулааныг дахин ашиглах, техник-эдийн засгийн үнэлгээ, халаалт, хөргөлт, хүлэмжийн хий

I. УДИРТГАЛ

Аж үйлдвэрийн салбар нь эрчим хүч үйлдвэрлэлийн дараа орох нүүрсний хоёр дахь том хэрэглэгч бөгөөд дэлхийн нүүрсний нийт эрэлтийн бараг гуравны нэгийг бүрдүүлдэг. Ялангуяа орчин үеийн нийгмийн үндсэн хэрэгцээг хангадаг төмөр, ган, цементийн үйлдвэрлэлд нүүрс зонхилох эрчим хүчний эх үүсвэр хэвээр байна. Үүнтэй зэрэгцэн уул уурхайн салбар нь хүдэр олборлолт, боловсруулалт, агааржуулалт, тээвэр, алслагдсан бүсэд байрлах тоног төхөөрөмжийн ажиллагаа зэрэг олон үйл явцад их хэмжээний эрчим хүч хэрэглэдэг, өндөр эрчим хүчний ачаалалтай салбар юм. Иймээс уул уурхайн үйл ажиллагаа нь шууд болон шууд бус байдлаар их хэмжээний CO_2 ялгаруулдаг. Мөн нүүрстэй холбоотой ажлын байр тодорхой бүс нутгуудад төвлөрсөн байдаг тул эрчим хүчний шилжилтийн нийгмийн үр дагаврыг төр, засгийн түвшинд анхааралтай авч үзэх шаардлагатай . Иймээс нөхцөлд уул уурхайн үйл ажиллагааны эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэх нь хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулах чухал арга замын нэг болж байна.

Хаягдал дулаан сэргээх технологи нь олон салбарт эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэхэд чухал үүрэгтэй. Үйлдвэрийн процессууд, дата төвүүд, утааны хийн системүүд, агааржуулалт, агаар сэлгэлтийн төхөөрөмжүүд, байгалийн хийн тэлэлт, ахуйн хэрэглээ болон бохир ус, дулааны цахилгаан станцуудын турбинээс гарах бага потенциалт дулааныг сэргээн ашиглах нь эрчим хүчний анхдагч хэрэглээг бууруулж, байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийг багасгах боломжийг бүрдүүлдэг.

Монгол Улсад уул уурхайн салбар нь хамгийн их эрчим хүч хэрэглэдэг салбаруудын нэг юм. Эрчим хүчний өндөр хэрэглээ нь үйлдвэрлэлийн зардлыг өсгөж, улмаар гүний уурхайн эдийн засгийн үр ашгийг сөргөөр нөлөөлдөг. Гүний уурхайн эрчим хүч их зарцуулдаг үндсэн системүүдийн нэг нь хүйтний улиралд аюулгүй, хэвийн ажиллагааг хангах зорилгоор ашиглагддаг оролтын агаар халаах систем юм. Агааржуулалт нь гүний уурхайн салшгүй хэсэг боловч агааржуулалтын зайлуулах агаараар дамжин их хэмжээний бага потенциалт дулаан атмосферт хаягддаг.

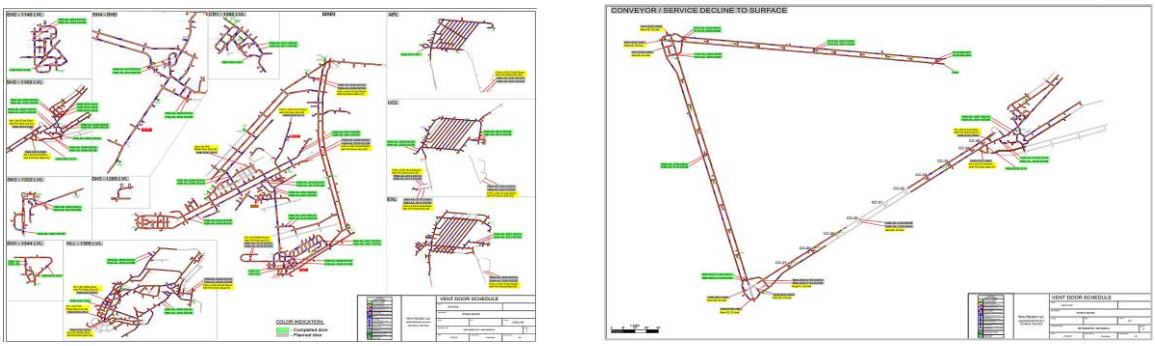
Судалгааны урьдчилсан тооцооллоор Оюу Толгойн гүйний уурхайн зайлуулах агаараас жилд 74,888 МВт·цаг хүртэл дулааны энергийг сэргээн ашиглах боломжтой бөгөөд энэ нь уурхайн барилга байгууламжийн халаалт, ахуйн халуун усны хангамж, зарим тохиолдолд оролтын агаарыг урьдчилан халаахад ашиглагдах нөөц болж болохыг харуулж байна. Иймэ хэмжээний дулаан сэргээх нь өвлийн улирлын халаалтын эрчим хүчний хэрэглээг мэдэгдэхүйц бууруулах, улмаар үйл ажиллагааны зардлыг хэмнэх, нүүрстөрөгчийн ялгарлыг багасгах

нөхцөл бүрдүүлнэ. Гэсэн хэдий ч уурхайн агааржуулалтын сүлжээ нь аюулгүй ажиллагааны хатуу шаардлагатай тул гарцын агаарын урсгалын хэмжээг бууруулах, эсвэл даралтын алдагдлыг нэмэгдүүлэх аливаа шийдэл нь сэнсний найдвартай, тасралтгүй ажиллагаанд сөргөөр нөлөөлөх эрсдэлтэй. Иймд дулаан сэргээх системийг агааржуулалтын сүлжээний гидродинамик горим, агаарын зарцуулалт, даралтын баланс, сэнсний ажлын горимтой уялдуулан оновчлох шаардлагатай байна.

II. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ

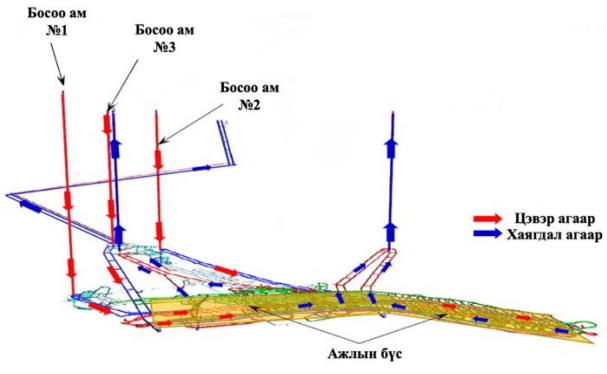
1. Уурхайн хөгжлийн түүх ба олборлолтын төлөвлөгөө

Өмнийн говьд орших Оюутолгойн бүлэг ордын тандалт судалгаа тэртээ 1957 онд эхэлсэн гэж үзвэл 66 жилийн дараа буюу өнөөдөр гүний уурхайн олборлолт эхэлж байна. 2015 онд далд уурхайн санхүүжилтийн төлөвлөгөө батлагдсанаар бүтээн байгуулалт өрнөсөн. Оюутолгойн хамгийн өндөр агуулгатай, хамгийн их нөөцтэй хэсэг буюу нийт үнэ цэний 80 гаруй хувийг агуулсан Хюгогийн ордыг зөвхөн гүний уурхайн аргаар блокчлон олборлоно. Далд уурхайгаас 20 жилийн хугацаанд нийт 440 сая тонн хүдэр олборлож 2044 онд олборлолтын үйл ажиллагаа дуусна [1].



1-р зураг. Гүний уурхайн олборлолтын маршут

Өнөөдрийн байдлаар гүний уурхайн олборлолтын маршрут зураг 2-т харуулсан байдлаар явагдаж байна. Гүний уурхайн хувьд олборлолтын маршрут өөрчлөгддөг тул сэлгэх шаардлагатай агаарын хэмжээ үүнээс хамаардаг онцлогтой.[8]



2-р зураг. Гүний уурхайн агааржуулалтын хэлхээ[3]

Уурхайн ажлын бүсүүдээр цэвэр агаарын урсгалыг хангахын тулд уурхай нь атмосферийн орчинтой орох болон гарах босоо амаар холбогддог. Цэвэр агаар уурхайд орох босоо амыг агаар оруулах босоо ам (intake shaft эсвэл downcast shaft) гэж нэрлэдэг. Харин уурхайн ашиглагдсан агаар гадагшлах босоо амыг агаар гаргах босоо ам (exhaust shaft эсвэл upcast shaft) гэж нэрлэдэг.Газрын гадаргуу дээр эдгээр босоо амны амсар орчимд агааржуулалтын тоног төхөөрөмж байрлах барилга байгууламжууд байрладаг. Эдгээр байгууламжид агааржуулалтын сэнсүүд суурилагддаг бөгөөд тэдгээр нь агаарыг уурхай руу шахах эсвэл уурхайгаас сорж гаргах үүрэгтэй байдаг.

Үүнээс, судалгаанд идэвхитэй үйл ажиллагаа явуулж буй гурван босоо амыг сонгон тооцсон.

Ам тус бүрийн ДС-аас авах хэрэглээг дараах хүснэгтээр[4] харуулав.

1. Гүний уурхайн дулааны ба агаарын температурын өөрчлөлт

ХҮЙТНИЙ УЛИРАЛД УУРХАЙН ГҮН РҮҮ ӨГӨХ АГААРЫГ ХАЛААХАД ШААРДЛАГАТАЙ ДУЛААНЫ ХЭРЭГЛЭЭ

1-р хүснэгт

Уурхайн босоо ам	Агаарыг халаахад шаардлагатай дулааны хэрэглээ, МВт (жилээр)
Босоо ам №1	30
Босоо ам №2	16
Босоо ам №3	30
НИЙТ	**76**

Жишээ болгон тооцсон амаас хаягдах агаарын үзүүлэлтийг хүснэгт 1-т харуулав.

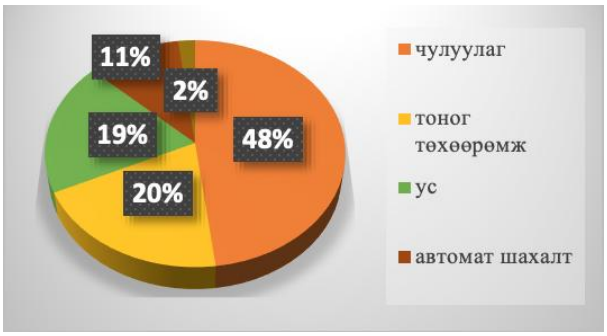
УУРХАЙН АМААС ЗАЙЛУУЛАГДАХ АГААРЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ .

Параметр	Үзүүлэлт
Агаарын эзлэхүүний зарцуулалт, $м^3/с$	450
Температур, °C	30
Нягт, $кг/м^3$	1.15
Дулаан багтаамж, кДж/кг·К	1.0

Массын зарцуулалт , кг/с	517.5
Гадна агаарын тооцоот температур[2], °C	-24.2

Гүний уурхайд агаарын температурыг нэмэгдүүлэх хэд хэдэн дулааны эх үүсвэр байдаг. Ойролцоогоор 1.2…2000 м гүнтэй гүний уурхайд үүсэх дулааны эх үүсвэрүүдийг дараах байдлаар тооцоолж болно.[5]



3-р зураг. Гүний уурхайн дулааны ачаалал

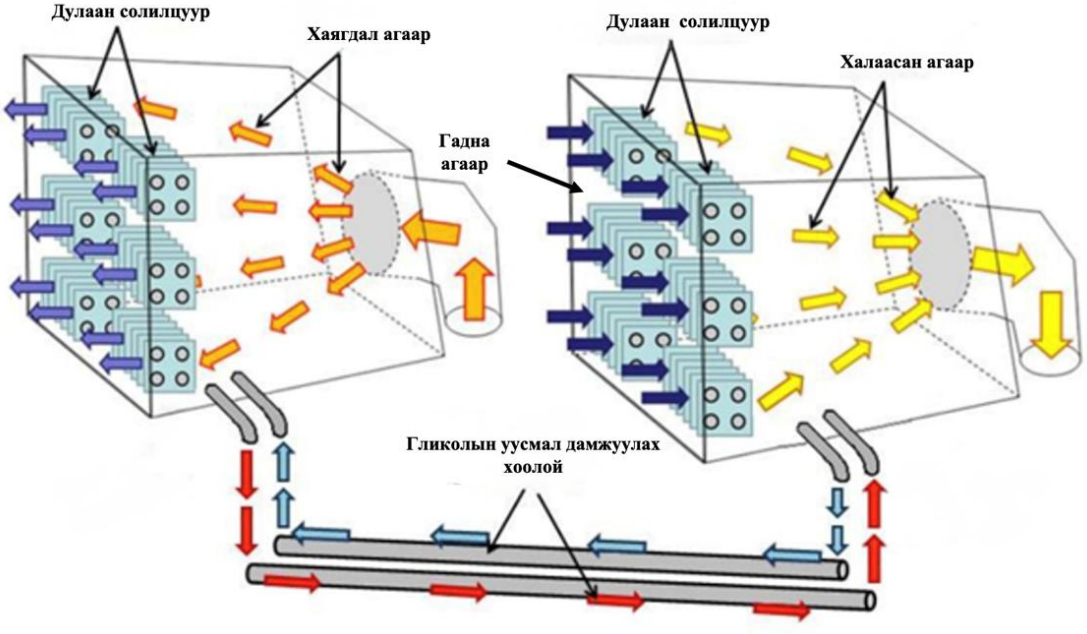
Гүний уурхайд үүсэх дулааны томоохон эх үүсвэрүүдийн нэг нь уурхайн тоног төхөөрөмж, ялангуяа дизель хөдөлгүүртэй машин механизм байдаг. Эдгээр тоног төхөөрөмж нь харьцангуй бага ашигт үйлийн коэффициенттой (ойролцоогоор 33%) тул их хэмжээний дулаан ялгаруулдаг. Харин цахилгаан тоног төхөөрөмж ашигласан тохиолдолд ялгарах дулааны хэмжээ харьцангуй бага байдаг, учир нь цахилгаан хөдөлгүүрүүдийн үр ашиг өндөр байдаг.

Мөн уурхайн ус нь дулааны эх үүсвэрийн нэг болдог. Агаар дулаан устай харьцах үед конвекцийн дулаан дамжуулалтын улмаас уснаас агаарт дулаан дамждаг. Зарим тохиолдолд ус ууршсанаар агаарын чийгшил нэмэгдэж, агаарын мэдрэгдэх дулаан (sensible heat) далд дулаан (latent heat) руу шилжих боломжтой.

Үүнээс гадна агаарын автокомпресс (auto-compression) буюу агаар доошлох үед потенциал энерги дулааны энерги рүү хувирах үзэгдэл нөлөөлдөг. Агаар уурхайн гүн рүү доошлох тусам температур нь ойролцоогоор 100 м тутамд 1°C-аар нэмэгддэг. Харин агаар буцаан газрын гадаргуу руу дээшлэх үед эсрэгээрээ температур буурах хандлагатай байдаг.[6]

Бусад бага хэмжээний дулааны эх үүсвэрүүдэд хүний бодисын солилцоо болон тэсрэх бодисын урвалын дулаан орно. Эдгээр бүх дулааны эх үүсвэрүүд нь гүний уурхайд агаарын температурыг нэмэгдүүлж, зарим тохиолдолд уурхайн орчны температурыг бууруулахын тулд агаар хөргөх систем ашиглах шаардлагыг бий болгодог.

Хүйтэн уур амьсгалтай бүс нутагт байрлах гүний уурхайд газрын гадаргуу дээрх байгууламжууд болон уурхайд оруулах цэвэр агаарыг халаахдаа дулаан солилцуур бүхий хаалттай гликолийн схемийг ашигладаг.



4-р зураг. Кондиционерын блокийн агаар халаагуурт зайлуулах агаарын дулааныг ашиглах схем[7]

III. АРГА ЗҮЙ БА МАТЕРИАЛ

Энергийн тооцооллыг гүйцэтгэхийн тулд этилен гликолийн хольцын нягт болон хувийн дулаан багтаамжийг тодорхойлох шаардлагатай. Эдгээр шинж чанарыг тодорхойлох зарим хамаарлуудыг (M. Conde Engineering, 2002)-оос авсан.[5]

Энэ хамаарал нь уусмал дахь гликолийн эзлэх хувь (ξ)-ийг харгалзан үздэг тул янз бүрийн найрлагатай гликолийн хольцод ашиглах боломжтой.

Хамаарал дараах хэлбэртэй байна.

$$P_x = A_1 + A_2\xi + A_3\left(\frac{T}{273.15}\right) + A_4\left(\frac{T}{273.15}\right)^2 + A_5\left(\frac{T}{273.15}\right)^3 \quad (1)$$

Энд:

- P_x— тодорхойлох шинж чанар (нягт эсвэл хувийн дулаан багтаамж)
- T— температур (K)
- ξ— уусмал дахь гликолийн эзлэх хувь
- A_1, A_2, A_3, A_4, A_5— туршилтаар тодорхойлсон коэффициентүүд

Энэ тооцоогоор, гликолийн уусмал дах хувь с=48% байгаа нь хөлдөх температур -40..-30°C-т с=40..50% хязгаарт байна. [8]

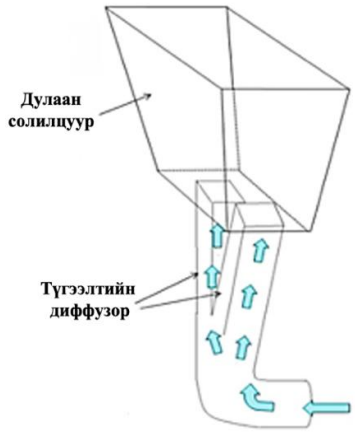
Уурхайн гүнд өгөх агаарын температур 15°C гэвэл температурын зөрүү Δt=30-15=15°C.

Сэргээн ашиглах боломжтой дулааны хэмжээ (нэг удаагийн агаар сэлгэлтээр. Дундаж агаар сэлгэлтийн тоог 15 гэж тооцсон),

Q=M·c· Δt=517.5кВт бол нийт сэргээн ашиглах боломжтой дулааны хэмжээ Q≈7.8МВт.

Уурхайн кондиционерын блокын AHU-н (Air handling Unit) халаагуурт шаардлагатай дулааны хэмжээг агаарын зарцуулалтаас хамааруулан тооцоход q=700кВт, дулаан солилцуурын үр ашгийг $\eta_{heat.ex}$=0.6 гэвэл бодитоор ашиглах боломжтой дулааны хэмжээ $Q_{бодит}$= Q· $\eta_{heat.ex}$ = 4...5 МВт

Дулаан солилцуурыг агаар зайлуулах аманд холбох схеммйг дараах зурагт харуулав.



5-р зураг. Дулаан солилцуурын хийц, холболт

ГЛИКОЛЫН УУСМАЛ БҮХИЙ ДУЛААН СОЛИЛЦУУРЫН ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

3-Р ХҮСНЭГТ .

Үзүүлэлт	Утга
Гликолийн зарцуулалт	0.126м^3/с
Гликолийн уусмалын хурд	1,5..2,5м/с
Дулаан солилцуурын шаардлагатай дулаан солилцох талбайн хэмжээ	7800м2
Хоолойн урт	4м
Шугамын диаметр	DN250…300 мм
Шугамын тоо	≈3000ш

ДҮГНЭЛТ

1. Ихэнх уурхайнуудад хүйтний улиралд гадна агаарыг халааж уурхайн гүн рүү өгөхийн тулд (air heater) ашигладаг. Эдгээр халаагуур нь ихэвчлэн байгалийн хий, пропан, дизель түлш эсвэл уурын систем ашиглан ажилладаг. Оюу Толгойн уурхайн хувьд агаарыг халаахын тулд Дулааны станцаас жилд 76МВт дулааныг хэрэглэдэг.
2. Судалгааны үр дүнгээр, агааржуулалтын системээр зайлуулах агаартай хаягдах дулааны хэмжээ онолын хувьд 7.8 МВт, бодитоор ашиглах боломжтой дулааны хэмжээ 4...5МВт байна.
3. Энэ дулааныг сэргээн ашиглахад 78000м2 дулаан солилцох талбай бүхий 48% гликолийн уусмалаар ажилладаг хий-шингэний дулаан солилцуурыг ашиглах боломжтой байна.
4. Энэ дулааныг ашигласнаар ДС-н ачааллыг 27% бууруулахаар байна.
5. Зуны улиралд энэ дулааныг хэрэгцээний халуун усыг халаах болон бусад зориулалтаар ашиглах боломжтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] https://mininginsight.mn/index.php

[2] Барилгад хэрэглэх уур амьсгал ба геофизикийн үзүүлэлт БНбД 23-01-09

[3] E.Baasankhand, and P.Byambatsogt, “Study on exhaust air heat recovery systems from underground mine ventilation” Khureltogoot-2023, pp70-74

[4] Project of Urologic district heating network hydraulic regime calculations in Oyu Tolgoi, 2023

[5] M. Conde Engineering, 2002

[6] McPherson, M., “Ventilation Engineering”Subsurface Ventilation and Environmental Engineering , pp. 175-208,1993.

[7] Watzlaf, G., Ackman, T., “Underground Mine Ventilation Heat Recovery”, *Mine Water and the Environment*, vol25, pp. 1-14, March 2006.

[8] Behera, S., Waste Heat Recovery in Mining Ventilation Systems, 2019.

[9] ANSYS Fluent Theory Guide, 2022.

БАЙГАЛЬД ЭЭЛТЭЙ ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ЭХ ҮҮСГҮҮР СОНГОХ СУДАЛГАА

Доржсүрэнгийн ГЭРЭЛСҮРЭН[1] Батсамбуугийн ӨЛЗИЙБАДРАХ[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: gereleegegee49@gmail.com[1]

Хураангуй: **Дэлхий дахинд жил бүр 2 тэрбум тонн орчим хог хаягдал үүсэж байгаа бөгөөд хүн амын өсөлт, хотжилт, үйлдвэрлэлийн хөгжлөөс шалтгаалан 2050 он гэхэд 3.4 тэрбум тоннд хүрэх төлөвтэй байна. Монгол Улсад 396 төвлөрсөн хогийн цэг 3811.6 га талбайг эзэлж байгаа ба Улаанбаатар хотод өдөрт 3000–3500 тонн хог хаягдал үүсдэг. Үүний дийлэнх хувь нь ангилалгүйгээр хогийн цэгт хүргэгдэж, ихэнх нь булшлагддаг нь байгаль орчин, хүний эрүүл мэндэд сөрөг нөлөө үзүүлдэг [1]. Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд хог хаягдлыг шатааж дулааны эрчим хүч үйлдвэрлэх технологийг судалж, Улаанбаатар хотын Баянхошууны дахин төлөвлөлтийн бүсийн дулаан хангамжийг Waste-to-Energy технологид суурилсан дулааны станцаар хангах боломжийг тооцоолсон. Судалгааны үр дүнд Баянхошууны 1.2 сая м² талбай бүхий барилга байгууламжийн нийт дулааны ачаалал 31.7 МВт болохыг тогтоож, 12 МВт хүчин чадалтай гурван зуух бүхий 36 МВт-ын хог шатаах дулааны станц төлөвлөх боломжтойг тогтоосон. Мөн утааны хий цэвэрлэх SNCR, SDR болон уутан шүүлтүүрийн систем ашигласнаар ялгаруулалтын хэмжээг олон улсын стандартын түвшнээс бага байлгах боломжтой. Эдийн засгийн тооцоогоор станцын анхны хөрөнгө оруулалт 29.7 тэрбум төгрөг бөгөөд энгийн эргэн төлөгдөх хугацаа 22.6 жил байна. Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд хог хаягдлаас эрчим хүч үйлдвэрлэх технологи нь Улаанбаатар хотын хог хаягдлын менежмент, агаарын бохирдлыг бууруулах, дулаан хангамжийг нэмэгдүүлэхэд үр ашигтай шийдэл болох нь тогтоогдлоо.**

Түлхүүр үг: Хог хаягдал, эрчим хүч, утааны хий, дулаан хангамж, нөөц боломж

I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд дэлхийн хэмжээнд хог хаягдлын хэмжээ эрчимтэй өсч байгаа нь байгаль орчин, нийгэм, эдийн засгийн томоохон асуудлын нэг болж байна. Хотжилт, хүн амын өсөлт, үйлдвэрлэлийн хөгжлийн нөлөөгөөр их хэмжээний ахуйн болон үйлдвэрлэлийн хог хаягдал үүсэж, түүнийг боловсруулах, устгах асуудал улс орнуудын тулгамдсан асуудал болжээ.

Монгол Улсад, ялангуяа Улаанбаатар хотод хог хаягдлын ихэнхийг ангилалгүйгээр хогийн цэгт булшлах хэлбэрээр шийдвэрлэж байгаа нь хөрс, ус, агаарын бохирдлыг нэмэгдүүлж байна. Нөгөө талаас хотын дулаан хангамжийн ачаалал жилээс жилд нэмэгдэж, шинэ эх үүсвэр шаардлагатай болж байгаа нөхцөл үүсээд байна.

Ийм нөхцөлд хог хаягдлыг эрчим хүчний эх үүсвэр болгон ашиглах Waste-to-Energy технологи нь байгаль орчинд ээлтэй, эдийн засгийн үр ашигтай шийдэлд тооцогддог. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь Улаанбаатар хотын Баянхошууны дахин төлөвлөлтийн бүсийн дулаан хангамжийг хог шатааж эрчим хүч үйлдвэрлэх дулааны станцаар хангах боломжийг судалж, техникийн болон эдийн засгийн үндэслэлийг тодорхойлоход оршино.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТ

Энэхүү судалгааны ажлын объект нь Улаанбаатар хотын Баянхошууны дахин төлөвлөлтийн бүсийн дулаан хангамжийн системийн өсөн нэмэгдэж буй ачаалалд тулгуурлан хатуу ахуйн хог хаягдлыг ашиглан дулаан үйлдвэрлэх Waste-to-Energy технологид суурилсан 36 МВт хүчин чадалтай дулааны станц юм.

Судалгаанд Баянхошууны 1.5 км² талбай бүхий дахин төлөвлөлтийн бүсэд баригдах 1.26 сая м² талбайд орон сууц, үйлчилгээний барилга байгууламжийн дулааны хэрэгцээг тооцоолон, түүнийг хангах хог шатаах зуух бүхий дулааны станцын техникийн шийдэл, технологийн схем, утааны хий цэвэрлэх систем болон дулаан түгээлтийн системийг судалсан.

III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Судалгаанд инженерийн тооцооллын болон харьцуулсан шинжилгээний аргуудыг ашигласан.

1.Улаанбаатар хотын нарангийн энгэр, цагаан даваа, морингийн даваа гэсэн 3 хогийн цэгт цагт ирж байгаа хогийн төрөл, зарцуулалтыг гаргаж түүнээс 2 төрлийн буюу цаас, цаасан бүтээгдэхүүн болон хүнсний хог хаягдлыг хог шатаах технологи бүхий зуухаар шатаавал хэр хэмжээний дулааны эрчим хүч гаргаж авах боломжтойг тогтоосон.

$$Q = B \cdot \eta \cdot Q_{\text{доод}}^{\text{аж}} \qquad (1)$$

2. Баянхошууны дахин төлөвлөлтийн бүсийн барилга байгууламжийн дулааны ачааллыг дулаацуулга, халуун ус хангамж, агааржуулалтын тооцооны аргаар тодорхойлсон.

Дараах тооцооны аргачлалаар тооцоолно [3]. Үүнд:

Дулааны ачаалал ба жилийн хэрэглээг тооцоолох, Гкал/ц

$$Q_{\text{д}} = q_{\text{д}} \cdot V_{\text{д}} \cdot \left(t_{\text{д}} - t_{\text{г.д}}\right) \qquad (1)$$

Хэрэгцээний халуун усны системийн дулааны ачаалал, Гкал/ц

$$Q_{\text{хху}}^{\text{7.дунд}} = \frac{a \cdot m \cdot c \cdot \left(t_{\text{хал}} - t_{\text{хүй}}\right)}{T} \qquad (2)$$

Дулаацуулгын системийн жилийн хэрэглээ

$$Q_{\text{д}}^{\text{жил}} = Q_{\text{д}}^{\text{жил}} \cdot n_{\text{д}} = \overline{Q_{\text{д}}} \cdot Q'_{\text{д}} \cdot n_{\text{д}} \qquad (3)$$

Дулааны жилийн нийт хэрэглээ, Гкал/ц

$$Q_{\text{нийт}}^{\text{жил}} = Q_{\text{д}}^{\text{жил}} + Q_{\text{ххү}}^{\text{жил}} + Q_{\text{а}}^{\text{жил}} \qquad (4)$$

Түлшний зарцуулалт, тн

$$B_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{нийт}}^{\text{жил}} \cdot 10^3}{Q_{\text{доод}}^{\text{аж}} \cdot n_{\text{зуух}}} \qquad (5)$$

2. Дулааны ачааллын тооцоонд үндэслэн хог шатаах 12 МВт гурван ширхэг зуухыг сонгон дулааны станцын технологийн схемийг сонгон зуухны дулааны болон материалын балансын тэгшитгэлүүдийг ашиглан эх үүсгүүрийн тооцоог хийсэн. Ингэж хийхдээ дулааны станцын тооцооны дагуу хийж гүйцэтгэсэн. [4].

3. Хог шатаах зуухнаас гарах температурт тохирсон дулаан түгээлтийн температурын горимыг сонгож тоо болон тоо-чанарын дулаан түгээлтийн 2 аргаар тооцоо хийж сүлжээний усны зарцуулалт, температурын график байгуулан жилийн турш аль дулаан түгээлтийн аргыг ашиглах нь бага усны зарцуулалттай байхыг тогтоосон. [5].

4. Хог шатаах станц болон хатуу түлшээр ажиллах дулааны станцын байгаль орчны нөлөөллийг харьцуулан үнэлсэн.

4.Төслийн эдийн засгийн үр ашгийг тодорхойлох зорилгоор хөрөнгө оруулалтын зардал, дулааны өөрийн өртөг, цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ, эргэн төлөгдөх хугацаа зэрэг үзүүлэлтүүдийг тооцоолсон.

IV. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ҮР ДҮН

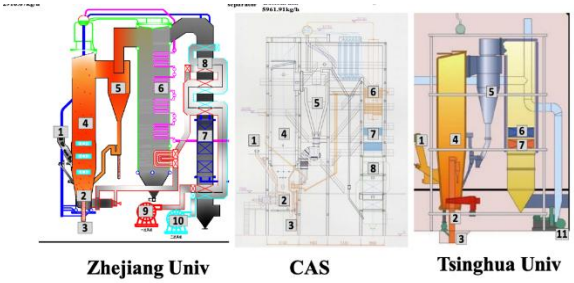
Судалгааны үр дүнд цаас болон хүнсний хог хаягдлаас 178 Гкал/ц дулаан гаргаж авах боломжтойг тооцсон.

Баянхошуугийн дахин төлөвлөлтийн бүсийн нийт дулааны ачаалал 31.7 МВт болохыг тогтоосон. Үүнийг хангах зорилгоор цагт 12 тонн ялган ангилсан хог шатаах хүчин чадалтай, тус бүр 12 МВт хүчин чадал бүхий гурван зуухтай 36 МВт-ын дулааны станц төлөвлөх боломжтой гэж үзсэн.

Хог шатаах зуухны төрөл

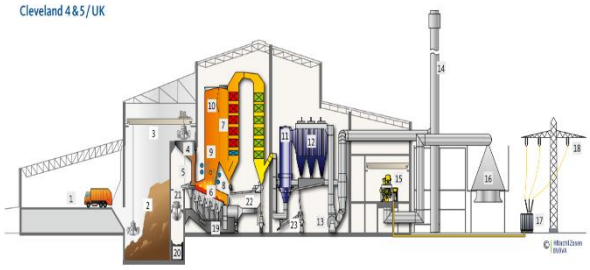


1-р зураг. Хөдөлгөөнтэй ул ширэмтэй

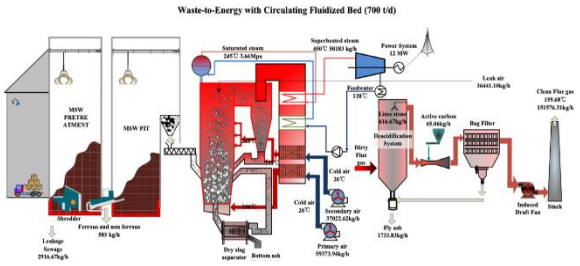


2-р зураг. Эргэх буцлах давхаргатай

Технологийн тооцоогоор сонгосон зуухны дулааны болон материалын балансын алдаа 3%-аас бага гарсан нь тооцооны үр дүнгийн найдвартай байдлыг харуулсан.

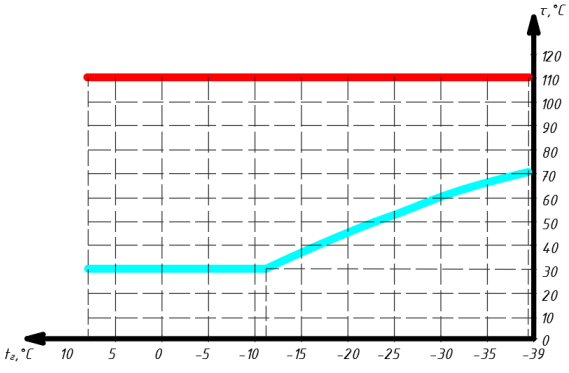


3-р зураг. Ул ширэмтэй зуухтай ДЦС-ын технологийн схем

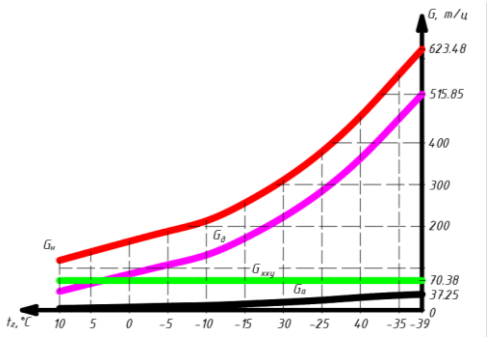


4-р зураг. Эргэх буцлах давхаргатай зуухтай ДЦС-ын технологийн схем

Дулаан түгээлтйн тооцоог 2 аргаар хийж гүйцэтгэхэд тоон тохируулгын үед сүлжээний усны зарцуулалт тоо-чанарын тохируулгатай үеэсээ жилийн турш бага байгааг тогтоосон.



5-р зураг. Тоон тохируулгатай үеийн температурын график



6-р зураг. Тоон тохируулгатай үеийн сүлжээний усны зарцуулалтын график

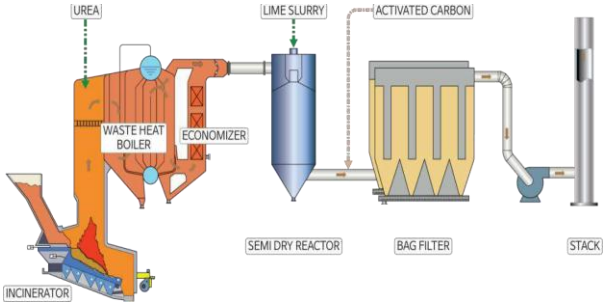
Утааны хий цэвэрлэх SNCR, SDR болон уутан шүүлтүүрийн системийг ашигласнаар азотын исэл, хүчиллэг хий, тоосонцор зэрэг бохирдуулагч бодисыг олон улсын стандартын хэмжээнээс доогуур түвшинд бууруулах боломжтой.

Азотын ислийг бууруулагч: SNCR (Катализад ордоггүй бодисыг бууруулах) систем нь карбамидын усыг /шүвтэр/ 870^0- 1200^0C -д хүрсэн бойлуурын шатаах камерын тухайн хэсэг рүү оруулж, шатаах процессын дүнд үүссэн азотын ислийг арилгах процесс юм.

Хүчиллэг бодис уусгагч: Утааны хийг хагас-хуурай реактор (SDR) руу оруулж, шохойн чулууны хольцыг хийх үед HCl, SO2 зэрэг хүчиллэг бодисууд арилдаг. Үүний зэрэгцээ зохистой температурт хүртэл хөргөж, дараа нь уутан шүүлтүүр рүү оруулна.

Уутан шүүлтүүр: Уутан шүүлтүүр дотор нарийн ширхэгтэй үнс, үлдэгдэл шүршигч бодис болон идэвхжүүлсэн нүүрстөрөгч нь утааны хийнээс тусгаарлагдсан байдалтай байх бөгөөд ялгаруулалтын түвшин 10 мг/м (стандарт, хуурай)-аас бага түвшинд хүрдэг.

Эцэст нь SNCR, SDR, уутан шүүлтүүрээр бүрэн цэвэршсэн хийг яндангийн өмнө хэсэгт суурилуулсан утаа сорогчоор (FD fan) агаар руу гадагшлуулна.



7-р зураг. Шаталтаас үүсэх утааны хийн зам

Мөн байгаль орчны харьцуулсан тооцоогоор хог шатаах дулааны станц нь уламжлалт хатуу түлшээр ажиллах станцтай харьцуулахад нүүрстөрөгчийн давхар ислийн ялгарлыг 2 дахин бага гаргах боломжтой нь тогтоогдсон.

1 ТН ЭХ ҮҮСВЭРЭЭС ЯЛГАРАХ БОХИРДУУЛАГЧИЙН ХЭМЖЭЭ, КГ

1-р хүснэгт

Бохирдуулагчийн нэр	1тн нүүрс шатаахад /кг/	1 тн хог шатаахад /кг/
PM2.5	0.62	0.4
PM10	1	0.6
Nox	2.72	2.5
CO	5	1
SO2	9	0.5

Эдийн засгийн тооцоогоор станцын анхны хөрөнгө оруулалт 29.7 тэрбум төгрөг, цэвэр өнөөгийн үнэ цэнэ 8.3 тэрбум төгрөг, энгийн эргэн төлөгдөх хугацаа 22.6 жил байхаар гарсан.

ДҮГНЭЛТ

1. Улаанбаатар хотод үүсэж буй хог хаягдлын хэмжээ жилээс жилд өсөн нэмэгдэж байгаа бөгөөд түүнийг эрчим хүчний эх үүсвэр болгон ашиглах нь хог хаягдлын менежментийг сайжруулах, байгаль орчны бохирдлыг бууруулах чухал шийдэл болох нь судалгаагаар тогтоогдлоо.
2. Баянхошууны дахин төлөвлөлтийн бүсийн дулаан хангамжийг 36 МВт хүчин чадалтай хог шатаах дулааны станцаар хангах техникийн боломжтой бөгөөд утааны хий цэвэрлэх орчин үеийн технологи ашигласнаар ялгаруулалтыг олон улсын стандартад нийцүүлэх боломжтой байна.
3. Төслийн эдийн засгийн тооцоогоор хог шатаах дулааны станцыг барьж байгуулах нь хөрөнгө оруулалтын хувьд боломжтой бөгөөд урт хугацаанд дулаан хангамжийг нэмэгдүүлэх, нүүрс хэрэглээг бууруулах, хүлэмжийн хийн ялгарлыг багасгах зэрэг нийгэм, эдийн засаг, экологийн олон талын эерэг үр нөлөөтэй гэж дүгнэгдэв.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Хатуу хог хаягдлын данс-2022, 2023 он.

[2] Улаанбаатар хотын хог хаягдлын менежментийг сайжруулах хөтөлбөр, 2013-2016 он.

[3] Б.Намхайням, “Дулаан хангамжийн систем”, Улаанбаатар, 2001 он.

[4] Н.Оюунцэцэг, Ж.Цэен-Ойдов, Дулааны станцын диплом, курсын төслийн гарын авлага, Улаабаатар, 2021.

[5] О.Пүрэвжал, Дулаан хангамжийн системийн дулааны ба гидравлик горим, Улаанбаатар, 2023.

[6] IRENA, Монгол улсын дулаан хангамжийн системд зориулсан сэргээгдэх эрчим хүчний шийдэл, Дулаан хангамжийн стратеги төлөвлөгөөг боловсруулах.

ЧОЙБАЛСАН ХОТЫН ДУЛААНЫ ХАНГАМЖИЙН СИСТЕМИЙН НАЙДВАРЖИЛТЫН ТООЦОО

Пунцагдамбын МӨНХДЭЛГЭР[1], Пашкагийн БЯМБАЦОГТ[2]
Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим Хүчний Инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж автоматжуулалтын тэнхим
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: M.HD21E701@must.edu.mn [1]

Хураангуй: **Энэхүү судалгааны ажлаар Чойбалсан хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг дулаан дамжуулах шугам сүлжээний эвдрэл гэмтлийн статистик мэдээлэлд тулгуурлан үнэлэв. Судалгаанд 2019–2024 оны хугацаанд бүртгэгдсэн гэмтлийн мэдээллийг ашиглан дулааны шугам сүлжээний эвдрэлийн бүтэц, давтамж, шугамын насжилтын хамаарлыг шинжилсэн. Үр дүнгээс харахад дулааны шугам сүлжээнд гарсан нийт гэмтлийн дотор цэгэн цооролт 46.7%-ийг эзэлж, хамгийн түгээмэл гэмтлийн төрөл болох нь тогтоогдсон бөгөөд тэдгээрийн 62.6% нь дулаан дамжуулах өгөх шугам дээр гарч байгаа нь температур, даралтын горим болон зэврэлтийн нөлөөлөлтэй холбоотой болохыг харуулж байна. Мөн дулааны шугам сүлжээний 57.5% нь ашиглалтын хугацаа дууссан нь системийн найдвартай ажиллагаанд сөргөөр нөлөөлж байгааг илрүүлэв. Дулаан хангамжийн системийн найдвартай байдлыг Горскихын аргачлалаар үнэлэхэд системийн ерөнхий найдваржилтын коэффициент** Кнад = 0.73 **гарсан бөгөөд энэ нь системийг “найдвар багатай” ангилалд хамаарахыг илтгэж байна. Судалгааны үр дүн нь дулаан дамжуулах шугам сүлжээг үе шаттайгаар шинэчлэх, зэврэлтээс хамгаалах арга хэмжээг сайжруулах, мөн ашиглалт засвар үйлчилгээний төлөвлөлтийг оновчтой болгох шаардлагатайг харуулж байна.**

Түлхүүр үг: Дулааны хангамжийн систем, найдваржилт, дулааны шугамын гэмтэл

I. УДИРТГАЛ

Дулаан хангамжийн систем нь хот, суурин газрын инженерийн дэд бүтцийн чухал бүрэлдэхүүн хэсэг бөгөөд хүн ам болон үйлдвэрлэл, үйлчилгээний байгууллагуудыг дулааны эрчим хүчээр тасралтгүй, найдвартай хангах үндсэн үүргийг гүйцэтгэдэг. Ялангуяа эх газрын эрс тэс уур амьсгалтай Монгол Улсын нөхцөлд дулаан хангамжийн системийн хэвийн ажиллагаа нь хүн амын амьдралын таатай нөхцөлийг хангах, нийгэм, эдийн засгийн үйл ажиллагааг тогтвортой явуулахад онцгой ач холбогдолтой. Иймээс хотуудын дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг судлах, системийн элементүүдийн ажиллагааг үнэлэх, найдваржилтын тооцоо хийх нь эрчим хүчний салбарын судалгааны чухал чиглэлүүдийн нэг юм. Чойбалсан хот нь Монгол Улсын зүүн бүсийн төв бөгөөд Дорнод аймгийн нийгэм, эдийн засгийн гол төв суурин газар юм. Тус хот болон зүүн бүсийн хэрэглэгчдийг дулаан, цахилгааны эрчим хүчээр хангах үндсэн эх үүсвэр нь Чойбалсангийн дулааны цахилгаан станц (ДБЭХС ТӨХК) юм. Зүүн бүсийн эрчим хүчний систем нь төвийн бүсийн нэгдсэн системээс тусдаа, бие даан ажилладаг онцлогтой.

Сүүлийн жилүүдэд Чойбалсан хот болон зүүн бүсийн нийгэм, эдийн засгийн хөгжил, хүн амын өсөлт, хотжилтын түвшин нэмэгдэхийн хэрээр эрчим хүчний хэрэглээ, ялангуяа дулааны эрчим хүчний хэрэгцээ өсөх хандлагатай байна. Техник, эдийн засгийн үндэслэлийн судалгаанд дурдсанаар Чойбалсан хотын дулааны эрчим хүчний хэрэглээ жил бүр өсөх бөгөөд ирээдүйд хэрэглээний хэмжээ мэдэгдэхүйц нэмэгдэх төлөвтэй байна. Өвлийн оргил ачааллын үед Чойбалсан хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн систем нь 130/70°C температурын горимоор ажиллаж, хэрэглэгчдийг халуун ус болон дулаанаар хангах зорилгоор их хэмжээний сүлжээний усыг халаадаг. Энэ нь системийн тоног төхөөрөмжийг бүрэн ачаалалтай ажиллуулах нөхцөлийг бүрдүүлдэг.Иймээс нөхцөлд дулаан хангамжийн системийн тоног төхөөрөмж болон шугам сүлжээнд гэмтэл, саатал үүсэх эрсдэл нэмэгдэж, системийн найдвартай ажиллагаанд сөргөөр нөлөөлөх магадлалтай. Сүүлийн жилүүдэд дулаан дамжуулах шугам сүлжээний насжилт нэмэгдэх, шугам хоолойн зэврэлт, дулаан алдагдал, ашиглалтын горимын доголдол зэрэг хүчин зүйлсээс шалтгаалан дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагаа буурах хандлага ажиглагдаж байна. Түүнчлэн дулааны сүлжээний эвдрэл, гэмтлийн статистик мэдээллээс үзэхэд шугам хоолойн дотоод болон гадаад зэврэлт, усны химийн горимын алдагдал, ашиглалтын нөхцөл зэргээс үүдэн эвдрэл үүсэх тохиолдол түгээмэл байна [6]. Дулааны шугам сүлжээний найдвартай ажиллагааг хангахын тулд түүний техникийн төлөв байдал, ашиглалтын нөхцөл, эвдрэл гэмтлийн шалтгааныг шинжлэх ухааны үндэслэлтэйгээр судалж, найдваржилтын тооцоо хийх шаардлагатай. Найдваржилтын судалгаа нь дулааны сүлжээний эвдрэл гэмтлийн давтамж, эвдрэл үүсэх магадлал, ашиглалтын хугацаа болон системийн тасралтгүй ажиллагааг үнэлэх боломжийг олгодог [8]. Иймд энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь Чойбалсан хотын дулаан хангамжийн системд гарч буй гэмтлийн статистик мэдээлэлд тулгуурлан системийн найдваржилтыг үнэлэх, эвдрэлийн давтамж, засварын хугацаа зэрэг үндсэн үзүүлэлтүүдийг тодорхойлох, улмаар дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг дээшлүүлэх боломжийг судлахад оршино.

II. ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН СИСТЕМИЙН НАЙДВАРЖИЛТЫН ОНОЛЫН ҮНДЭС

Дулаан хангамжийн системийн найдваржилт гэдэг нь тухайн систем тодорхой хугацаанд тогтоосон горим, нөхцөлд хэрэглэгчдийг шаардлагатай хэмжээний дулааны эрчим хүчээр тасралтгүй хангах чадварыг илэрхийлдэг. Найдваржилт нь инженерийн системийн чухал үзүүлэлт бөгөөд системийн ашиглалтын үр ашиг, аюулгүй ажиллагаатай шууд холбоотой байдаг [8]. Инженерийн системийн найдваржилт нь дараах үндсэн шинж чанаруудын нийлбэрээр тодорхойлогддог [8]. Үүнд:

- Сааталгүй ажиллагаа (безотказность) – тодорхой хугацаанд эвдрэлгүй ажиллах чадвар
- Удаан эдэлгээ (долговечность) – системийн ашиглалтын нийт хугацаанд бат бөх хэвийн ажиллах боломж
- Засварлагдах чадвар (ремонтопригодность) – эвдрэл гарсан үед богино хугацаанд засварлах боломж /чадвар/
- Хадгалах чадвар (сохраняемость) – ашиглалтын явцад техникийн үзүүлэлтүүдээ хадгалах чадвар.

Дулаан хангамжийн системийн найдваржилтыг үнэлэхэд ихэвчлэн дараах үндсэн үзүүлэлтүүдийг ашигладаг:

- сааталгүй ажиллагааны магадлал
- бэлэн байдлын коэффициент
- системийн тэсвэрлэх чадвар

Эдгээр үзүүлэлтүүд нь дулаан хангамжийн системийн техникийн төлөв байдал, ашиглалтын нөхцөл, тоног төхөөрөмжийн чанар, нөөцлөлтийн түвшин зэрэг хүчин зүйлсээс хамаардаг [8]. Дулааны шугам сүлжээний найдвартай ажиллагаанд дараах хүчин зүйлүүд голлон нөлөөлдөг. Үүнд:

- шугам хоолойн насжилт
- дотоод болон гадаад зэврэлт
- дулааны алдагдал
- усны химийн горим
- ашиглалтын горим, ачааллын өөрчлөлт
- засвар үйлчилгээний чанар

Эдгээр хүчин зүйлүүд нь шугам хоолойн эвдрэл гэмтлийн давтамжийг нэмэгдүүлж, системийн нийт найдвартай ажиллагаанд нөлөөлдөг [8]. Дулаан дамжуулах шугам хоолойн эвдрэл гэмтлийн гол шалтгаануудын нэг нь зэврэлт бөгөөд энэ нь усны химийн найрлага, хүчилтөрөгчийн агууламж, температур, металлын бүтэц зэрэг олон хүчин зүйлээс хамаардаг. Зэврэлтийн үр дүнд шугам хоолойн ханын зузаан багасаж, нэвт цооролт үүсэх, улмаар дулаан дамжуулах системийн найдвартай ажиллагаа алдагдах нөхцөл бүрддэг [6]. Иймээс дулааны шугам сүлжээний техникийн байдалд тогтмол хяналт тавих, эвдрэл гэмтлийн статистик мэдээллийг цуглуулах, найдвартай ажиллагааны үзүүлэлтүүдийг тооцоолох нь дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг сайжруулах үндсэн нөхцөл болдог.

III. ДУЛААНЫ ШУГАМЫН ГЭМТЛИЙН СУДАЛГАА

Чойбалсан хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн гадна дулааны шугам сүлжээний нийт урт 2021 оны байдлаар 26.6 хос км сунасан схемтэй бөгөөд систем нь ашиглалтад орсноос хойш 55 дахь жилдээ ажиллаж байна. Сүүлийн жилүүдэд улсын төсөв болон байгууллагын өөрийн хөрөнгөөр тодорхой хэмжээний өргөтгөл, шинэчлэл хийгдсэн боловч шугам сүлжээний дийлэнх хэсэг нь ашиглалтын хугацаа өндөр болсон хэвээр байна. Дулааны шугам сүлжээний ашиглалтын байдалд хийсэн судалгаанаас харахад нийт шугам хоолойн 57.5 хувь нь ашиглалтын хугацаа дууссан бөгөөд үе шаттайгаар шинэчлэн солих шаардлагатай. Мөн шугам сүлжээний 30 гаруй хувь нь далд сувагт байрласан нь ашиглалтын болон засвар үйлчилгээний нөхцөлийг хүндрүүлэх хүчин зүйл болж байна.

ЧОЙБАЛСАН ХОТЫН ДУЛААНЫ ШУГАМЫН УРТ, НАСЖИЛТ, ДИАМЕТР

1-Р ХҮСНЭГТ

№	Магистраль шугам	Шугамын насжилт	Шугамын урт	Шугамын диаметр
1	I магистраль	17-55 жил	6382 м	Ф426 мм
2	II магистраль	50 жил	5090 м	Ф500 мм
3	III магистраль	7-50 жил	1850 м	Ф320 мм

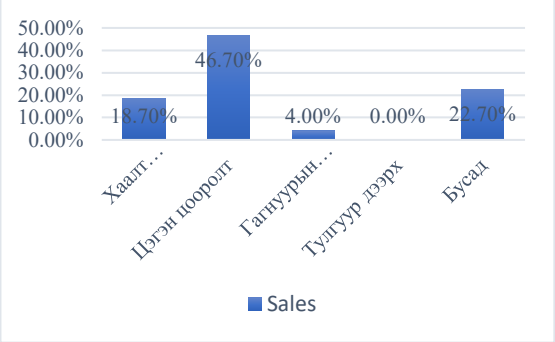
Сүүлийн жилүүдэд дулааны шугам сүлжээнд гарсан гэмтлийн судалгааг 2019–2024 оны статистик мэдээлэлд үндэслэн хийсэн бөгөөд уг хугацаанд нийт 51 гэмтэл бүртгэгдсэн байна. Гэмтлийн төрлөөр ангилж үзвэл хаалт арматурын гэмтэл, гагнуурын оёдлын гэмтэл, цэгэн цооролт болон бусад төрлийн гэмтлүүд илэрсэн байна.

ЧОЙБАЛСАН ХОТЫН ТӨВ ШУГАМД ГАРСАН СҮҮЛИЙН 5 ЖИЛИЙН ГЭМТЛИЙН СУДАЛГАА

2-Р ХҮСНЭГТ

№		2019	2020	2021	2022	2023	2024
Гэмтлийн төрөл	Хаалт	1	1	2	3	4	0
	Цэгэн цооролт	2	3	4	2	2	3
	Гагнуурын гэмтэл	1	0	0	2	2	1

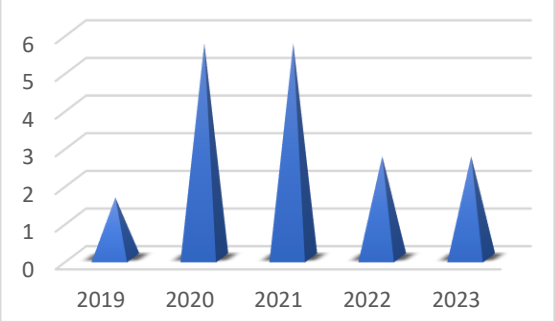
	Тулгаар дээрх гэмтэл	0	0	0	0	0	0
	Бусад	2	3	4	6	4	0
	Нийт	5	7	10	13	12	4



Зураг 1. Чойбалсан хотын дулааны төв шугам дээр гарсан гэмтлүүдийн хувь хэмжээ

Дээрх судалгааны дүнгээс харахад гагнуурын оёдлын гэмтэл 4.0%, тулгуур дээрх гэмтэл 8.0%, хаалт арматурын гэмтэл 18.7% цэгэн цооролтын гэмтэл 46.7%, бусад гэмтэл 22.7%-ийг тус тус эзэлж байна.

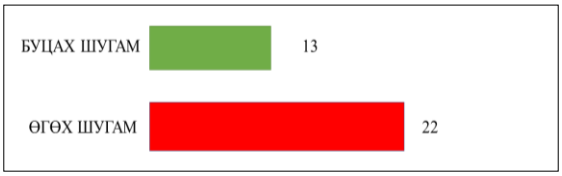
Эндээс дулааны шугамын түгээмэл гэмтлийн нэг бол цэгэн цооролт гэж харагдаж байна.



Зураг 2. Дулааны шугамын сүүлийн 5 жилд гарсан цэгэн цооролтууд

Цэгэн цооролтын хэмжээг сүүлийн 5 жилийн судалгаанаас харахад 2022, 2023 онуудад маш их гарсан байна. Сүүлийн 2 жилд харьцангуй бууж байгаа боловч цэгэн цооролтоос үүдэлтэй гэмтэл гарсаар байна. Энэ гэмтэл нь бага талбайг хамардаг боловч сүлжээний хэвийн ажиллагааг маш их доголдуулдаг гэмтэл юм.

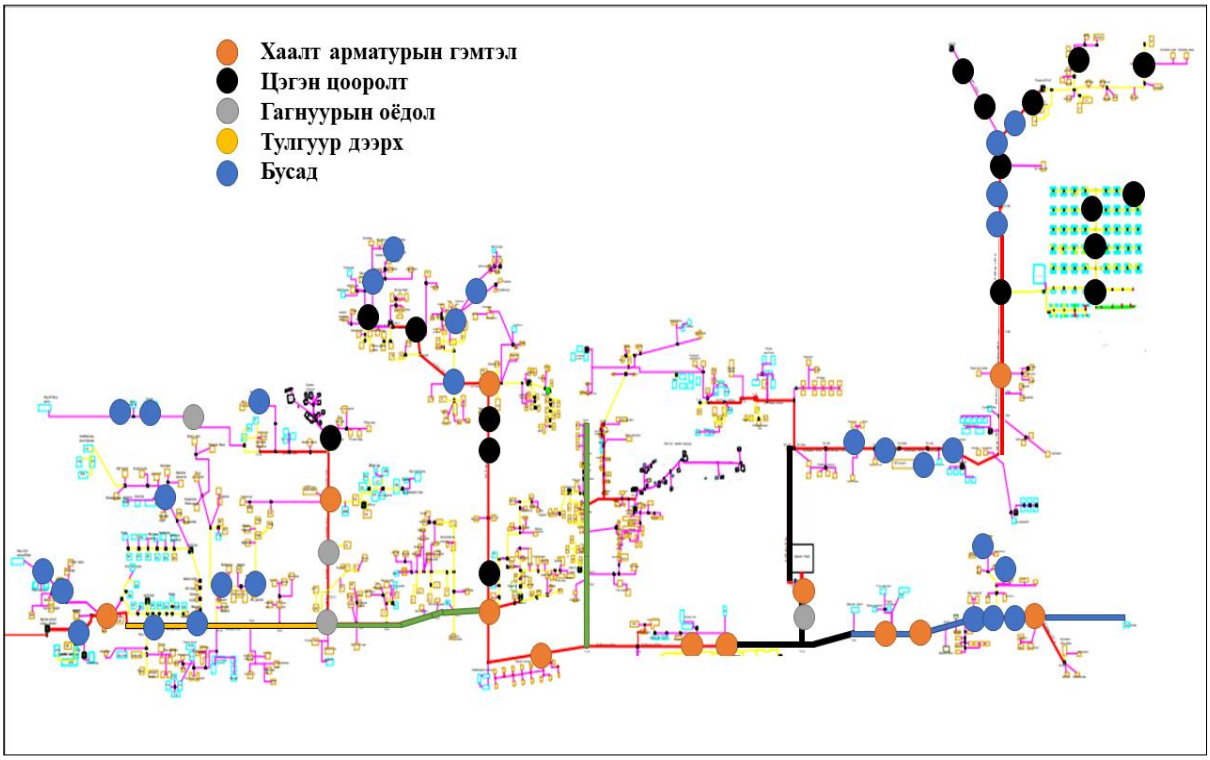
Мөн түүнчлэн тухайн гэмтлүүд дулаан дамжуулах шугам хоолойн даралт, сүлжээний усны температур, зэргээс хамаарах учир тэдгээр учир шалтгаануудыг тодруулах зорилгоор өгөх буцах шугам дээр гарсан тоон үзүүлэлтүүдийг нэгтгэн графикаар үзүүлэв.



Зураг 3. Чойбалсан хотын дулаан дамжуулах өгөх, буцах шугамд гарсан цэгэн цооролтын харьцаа



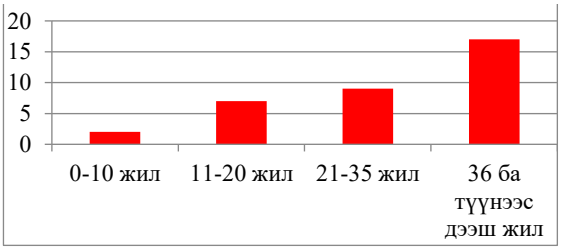
Зураг 4. Чойбалсан хотын дулаан дамжуулах өгөх, буцах шугамд гарсан цэгэн цооролтыг хувиар илэрхийлбэл



Зураг 5. Чойбалсан хотын дулааны төв шугам дээр гарсан гэмтлүүдийн байршил

Эндээс харахад нийт гарсан цэгэн цооролтын 62.6% нь дулаан дамжуулах өгөх шугам дээр гарсан байна.

Дулаан дамжуулах шугам хоолойн насжилтын байдлаас хамааруулан гарсан цэгэн цооролтын хэмжээг доорх зурагт харуулав.



Зураг 6. Шугамын насжилтаас хамаарсан цэгэн цооролт

Графикаас харахад 36 жил буюу эдэлгээний хугацаа дууссан шугам дээр нийт гэмтлийн 17, 21-35 жил ажилласан шугам дээр 9, 11-20 жил ажилласан шугам дээр 7.0-10 жил ажиллаж байгаа шугам дээр 2 гэмтэл гарсан байна. Эндээс харахад цэгэн цооролт нь шугам хоолойн ашиглалтын хугацааг богиносгож, эдэлгээний хугацааг 12-15 жил буюу нормт хугацаанаас 1.5-2 дахин бага болгож байгаа юм.

IV. ЧОЙБАЛСАН ХОТЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН СИСТЕМИЙН НАЙДВАРТАЙ БАЙДЛЫН ҮНЭЛГЭЭ, ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

Чойбалсан хотын дулааны шугамд үүсэж буй гэмтэл түүнд нөлөөлж буй үзүүлэлтүүдийг судалж үзсэнээр өөрийн дулаан хангамжийн системийн найдвартай байдлын үнэлгээ хийж гүйцэтгэнэ. Дулаан хангамжийн системийн найдвартай байдлыг үнэлэхэд ОХУ-ын эрдэмтэн А.А.Горскихын боловсруулсан аргачлал өргөн хэрэглэгддэг. Энэхүү аргачлал нь дулаан хангамжийн системийн найдвартай байдлыг тодорхойлохдоо системийн ажиллагаанд нөлөөлөх үндсэн хүчин зүйлүүдийг тус бүрд нь үнэлж, тэдгээрийн дундаж коэффициентоор системийн ерөнхий найдвартай байдлыг тодорхойлдог. Горскихын аргачлалын дагуу дулаан хангамжийн системийн найдвартай байдлыг дараах үндсэн үзүүлэлтүүдээр үнэлнэ.

- Дулааны эх үүсгүүрийн цахилгаан хангамжийн найдвартай байдал
- Дулааны эх үүсгүүрийн ус хангамжийн найдвартай байдал
- Дулааны эх үүсгүүрийн түлш хангамжийн найдвартай байдал
- Дулааны эх үүсгүүрийн хүчин чадал болон дулааны сүлжээний нэвтрүүлэх чадварын нийцэл
- Дулаан хангамжийн системийн нөөцлөлтийн түвшин
- Дулааны сүлжээний техникийн байдал
- Дулааны сүлжээний зогсолтын үзүүлэлт
- Аваар ослын улмаас дулааны дутуу түгээлтийн үзүүлэлт
- Дулаан хангамжийн чанарын үзүүлэлт

Эдгээр үзүүлэлт бүрийг 0–1 хоорондын үнэлгээний коэффициентээр илэрхийлдэг. Горскихын аргачлалаар дулаан хангамжийн системийн ерөнхий

найдваржилтын коэффициентийг дараах томьёогоор тодорхойлно.

Кнад=9/(Кэ+Кв+Кт+Кб+Кр+Кс+Котк+Кнед+К) (1)

- **Кэ** – цахилгаан хангамжийн найдвартай байдлын коэффициент
- **Кв** – ус хангамжийн найдвартай байдлын коэффициент
- **Кт** – түлш хангамжийн найдвартай байдлын коэффициент
- **Кб** – хүчин чадлын нийцлийн коэффициент
- **Кр** – нөөцийн түвшний коэффициент
- **Кс** – дулааны сүлжээний техникийн байдлын коэффициент
- **Котк** – дулааны сүлжээний зогсолтын коэффициент
- **Кнед** – дулааны дутуу түгээлтийн коэффициент
- **К** – дулаан хангамжийн чанарын коэффициент

ДУЛААНЫ ЭХ ҮҮСВЭРИЙН ЦАХИЛГААН ХАНГАМЖИЙН НАЙДВАРТАЙ БАЙДЛЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ

3-РХҮСНЭГТ

Нөөц цахилгаан хангамж байгаа үед	1.0
Нөөц цахилгаан хангамж байхгүй үед дулаан эрчим хүчний эх үүсвэрийн хүчин чадал (Гкал) 5.0 хүртэл	0.8
5.0-20	0.7
20 дээш	0.6

ДУЛААНЫ ЭХ ҮҮСВЭРИЙН УС ХАНГАМЖИЙН НАЙДВАРТАЙ БАЙДЛЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ

4-Р ХҮСНЭГТ

Нөөц усан хангамж байгаа үед	1.0
Нөөц усан хангамж байхгүй үед дулаан эрчим хүчний эх үүсвэрийн хүчин чадал (Гкал/ц) 5.0 хүртэл	0.8
5.0-20	0.7
20 дээш	0.6

Судалгаанд ашигласан үзүүлэлтүүдийг дараах байдлаар тодорхойлсон.

ГОРСКИХЫН АРГАЧЛАЛЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН СИСТЕМИЙН ЕРӨНХИЙ НАЙДВАРЖИЛТЫН КОЭФФИЦИЕНТУУД

5-Р ХҮСНЭГТ

Найдваржилтын үзүүлэлт	Үнэлгээний коэффициент
Дулааны эх үүсгүүрийн цахилгаан хангамжийн найдвартай байдал (Кэ)	1.0
Дулааны эх үүсгүүрийн ус хангамжийн найдвартай байдал (Кв)	1.0
Дулааны эх үүсгүүрийн түлш хангамжийн найдвартай байдал (Кт)	1.0
Дулааны эх үүсгүүрийн хүчин чадлын нийцэл (Кб)	1.0
Дулаан эх үүсгүүр болон сүлжээний нөөцийн түвшин (Кр)	0.2
Дулааны сүлжээний техникийн байдал (Кс)	0.5
Дулааны сүлжээний зогсолтын үзүүлэлт (Котк)	1.0
Дулааны дутуу түгээлтийн үзүүлэлт (Кнед)	0.5
Дулаан хангамжийн чанарын үзүүлэлт (К)	0.4

V. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар Чойбалсан хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг дулаан дамжуулах шугам сүлжээний эвдрэл гэмтлийн статистик мэдээлэлд тулгуурлан үнэлж, системийн найдвартай байдалд нөлөөлөх үндсэн хүчин зүйлсийг тодорхойлов. Судалгаанд 2019–2024 оны хугацаанд бүртгэгдсэн гэмтлийн мэдээллийг ашиглан дулааны шугам сүлжээний эвдрэлийн бүтэц, давтамж болон шугамын насжилтын хамаарлыг шинжилсэн. Үр дүнгээс харахад нийт гэмтлийн дотор цэгэн цооролт давамгайлж, нийт гэмтлийн 46.7%-ийг эзэлж байгаа нь дулааны шугам хоолойн зэврэлт, ашиглалтын хугацаа болон орчны нөхцөлтэй шууд хамааралтай болохыг харуулж байна. Мөн цэгэн цооролтын 62.6% нь дулаан дамжуулах өгөх шугам дээр илэрч байгаа нь температур, даралтын горимын нөлөөлөл илүү их байгааг илтгэнэ. Дулааны шугам сүлжээний ашиглалтын байдлыг үнэлэхэд нийт шугамын 57.5% нь ашиглалтын хугацаа дууссан бөгөөд системийн дийлэнх хэсэг нь олон жилийн турш ашиглагдсан нь гэмтэл үүсэх эрсдэлийг нэмэгдүүлж, системийн найдвартай ажиллагаанд сөрөг нөлөө үзүүлж байгааг тогтоов. Найдваржилтын үнэлгээг Горскихын аргачлалын дагуу гүйцэтгэхэд дулаан хангамжийн системийн ерөнхий найдваржилтын коэффициент Кнад = 0.73 гарсан бөгөөд энэ нь системийн найдвартай ажиллагаа хангалттай түвшинд хүрээгүй, “найдвар багатай” ангилалд хамаарахыг илтгэж байна. Иймд Чойбалсан хотын дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг дээшлүүлэхийн тулд дулаан дамжуулах шугам сүлжээг үе шаттайгаар шинэчлэх, зэврэлтээс хамгаалах арга хэмжээг сайжруулах, усны химийн горимын хяналтыг боловсронгуй болгох, мөн ашиглалт засвар үйлчилгээний төлөвлөлтийг найдвартай ажиллагааны үзүүлэлтүүдэд тулгуурлан оновчтой зохион байгуулах шаардлагатай байна. Цаашид дулаан хангамжийн системийн техникийн төлөв байдлын мониторингийг тогтмолжуулж, найдвартай ажиллагааны тоон үзүүлэлтүүдийг ашиглан урьдчилан сэргийлэх засвар үйлчилгээний бодлогыг хэрэгжүүлэх нь системийн ашиглалтын үр ашиг болон тогтвортой ажиллагааг сайжруулах чухал ач холбогдолтой гэж үзэж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Төрөөс эрчим хүчний талаар баримтлах бодлого

[2] Б.Намхайням, “Дулаан хангамжийн систем”, Улаанбаатар: Соёмбо принтинг, 2015 он, хуудас 277-282.

[3] П.Сайнбилэг, “Дулааны шугам сүлжээний ашиглалтын заавар”, Улаанбаатар: Сүхбаатар хэвлэл, 1995 он, хуудас 112-115

[4] ЭБЭХЯ.“Нэгдсэн сүлжээний дүрэм”,Улаанбаатар, 2010 он хх 50-51

[5] БНбД 41-02-05, Гадна дулаан хангамж

[6] Л.Дашчимэг, “Дархан хотын дулааны шугамын гэмтлийн судалгаа”, Улаанбаатар, ШУТИС, ЭХИС, 2016. ХХ 158-164.

[7] Эрчим хүч engineering, сэтгүүл

[8] В.НМелькумов, “Мониторинг надежноти тепловых сетей”, Диссертация на соискание ученой сгеиспи кандидата технических наук, Воронеж, 2011.

ӨНДӨР ДАРАЛТЫН ТОГООТ ЗУУХНЫ БАГАСГАСАН ФОСФАТЫН УСНЫ ХИМИЙН ГОРИМЫН ҮР АШГИЙН ШИНЖИЛГЭЭ

Жаргалсайханы Жаргалмаа [1], Батсүхийн Оюунсувд [2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, “ДЦС-4” ТӨХК, [2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулааны цахилгаан станцын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: jjrgal199@gmail.com [1], oyunsuvd.edu@gmail.com [2]

Хураангуй: **Өндөр даралтын тогоот зуухны усыг фосфатаар боловсруулах уламжлалт фосфатжуулалтын горим нь "фосфат нуугдах үзэгдэл" болон чөлөөт натрийн шүлтийн хуримтлалаас үүдэлтэй металлын зэврэлт үүсгэх эрсдэлийг дагуулдаг. Иймд 13.8 МПа даралттай зуухны усны химийн горимд дүн шинжилгээ хийж, багасгасан фосфатын горимд шилжүүлэх үндэслэл болон эдийн засгийн үр ашгийг тодорхойлоход энэхүү өгүүллийн зорилго оршино. Судалгаанд Б.М. Ларины онолын хамаарлыг ашиглан тогооны усны цэвэр хэсгийн фосфатын концентрацийг цахилгаан дамжуулах чадвар ба pH-аар тодорхойлох тооцоог хийж, багасгасан фосфатын горимд шилжих үндэслэлийг боловсруулан, үргэлжийн үлээлгийн хувийн оновчтой утгыг тогтоосон. Зуухны үргэлжийн үлээлгийн хэмжээг 0.5% хүртэл бууруулснаар уурын чанар тухайлбал натри ба цахиурын концентраци ашиглалтын стандарт норм шаардлагыг хангах эсэхийг одоогийн уурын чанарын шинжилгээний үр дүн дээр тулгуурлан тооцоолсон. Багасгасан фосфатын горим нь өндөр даралтын тогоот зуухны хувьд кальцийн хатуулгийн хаг тогтохоос сэргийлэх болон зэврэлтээс хамгаалах "буфер" үүргийг зэрэг хангах хамгийн оновчтой шийдэл юм.**

Түлхүүр үг: Түлхүүр үг: Тогоот зуух, багасгасан фосфатын горим, фосфат нуугдах үзэгдэл, шүлтийн зэврэлт, Б.М. Ларины онолын шулуун, үлээлгийн хэмжээ.

I. УДИРТГАЛ

Дулааны цахилгаан станцын аюулгүй, найдвартай ажиллагаа нь ус-уурын замын металл гадаргууг зэврэлтээс хамгаалах болон дулаан дамжуулах гадаргууд хаг хурдас үүсэхээс сэргийлэх усны химийн горимоос шууд хамааралтай байдаг. Тогоот зуухны усыг фосфатын нэгдлээр боловсруулах (Phosphate treatment) үзэл баримтлалыг анх 1920-иод оны дундуур АНУ-ын химийн инженер, доктор Ралф Э. Холл (Ralph E. Hall) шинжлэх ухааны үндэслэлтэйгээр дэвшүүлсэн бөгөөд энэ нь эрчим хүчний салбарт дулааны цахилгаан станцын дотоод циклийн усны заслын боловсруулалтын технологид шинэ эрин үеийг эхлүүлсэн юм.

1920-иод оноос өмнө уурын зуухны халах гадаргуугийн хаг хурдастай тэмцэхэд голдуу сод (Sodium carbonate - Na_2CO_3)-ыг ашигладаг байв. Гэвч уурын зуухны даралт ихсэх тусам (тус үед даралт 1.5 МПа-аас давж эхэлсэн) сод нь зуухны усанд задарч, идэмхий шүлт (NaOH)-ийг үүсгэн металлыг хэврэгшүүлэх, мөн кальцийн карбонат нь хатуу хаг үүсгэхээс бүрэн сэргийлж чадахгүй байлаа.

Доктор Холл фосфатын ион (PO_4^{3-}) нь зуухны усанд агуулагдах кальцийн ионтой нэгдэж, хатуу хаг хурдас биш, харин усанд уусдаггүй зөөлөн хэлбэрийн нитэг үүсгэдэг болохыг тогтоосон нь өндөр даралтын зуухнуудын ашиглалтын хугацааг үлэмж уртасгасан билээ [1].

Гэвч орчин үеийн өндөр параметртэй, 13.8 МПа (140 ата) ба түүнээс дээш даралттай тогоот зуухнуудад фосфатын уламжлалт горим нь тодорхой хүндрэлүүдийг дагуулж байна. Үүний нэг нь "Фосфат нуугдах үзэгдэл" буюу фосфатын ион зуухны халаах гадаргуугийн хананд түр зуур тунаж, ачаалал өөрчлөгдөх үед эргэж уусах үзэгдэл юм. Энэхүү процесс нь зуухны усны pH утгыг тогтворгүй болгож, улмаар металлын гадаргуу дээрх хамгаалалтын магнетит (Fe_3O_4)-ийн үеийг уусгах, "шүлтийн зэврэлт" үүсгэх эрсдэлийг дагуулдаг [9].

Манай судалгааны объект болох “ ДЦС-4” ТӨХК-ийн 13.8 МПа даралттай зуухны хувьд давстай хэсгийн pH утга 10.7-д хүрч, чөлөөт шүлт (NaOH) үүсэх аюултай нөхцөл бүрдсэн нь фосфатын горимыг оновчлох зайлшгүй шаардлагыг бий болгож байна. Хэдийгээр олон улсын практикт фосфатгүй горимыг санал болгодог [6], ч тэжээлийн усны цахилгаан дамжуулах чадвар стандартын шаардлагад (χ <0.2 мкСм/см) хараахан хүрээгүй нөхцөлд багасгасан фосфатын горимд шилжих нь хамгийн оновчтой шийдэл юм.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Судалгаандаа профессор Б.М. Ларины ионы хөдөлгөөнт чанарын онолын тооцоолол болон лабораторийн туршилт дээр үндэслэн гаргаж авсан тогооны усны фосфатын концентрацийг, тогооны усны pH болон цахилгаан дамжуулах чадвараар тодорхойлох шууд бус аргын тэгшитгэлийг ашигласан. Энэхүү хамаарлын үндсэн тэгшитгэл нь дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ [4].

$$\chi = f \cdot C_{PO_4} + \chi_{OH} + \chi_{улд} \quad (1)$$

$$\chi_{OH} = \lambda_{OH} \cdot 10^{(\mathrm{pH}-14)} \quad (2)$$

χ_{OH} pH-аас шууд хамаардаг бөгөөд дараах тэгшитгэлээр тодорхойлно.

ТЭМДЭГЛЭГЭЭНИЙ ТАЙЛБАР

1-Р ХҮСНЭГТ

Д/д	Тэмдэглэгээ	Физик утга	Нэгж
1	χ	Кондуктометрээр хэмжсэн тогооны усны нийт цахилгаан дамжуулах чадвар	мкСм/см
2	$\chi_{он}$	Усан дахь гидроксилийн ионы (OH^-) үүсгэж буй цахилгаан дамжуулах чадвар	мкСм/см
3	$\lambda_{он}$	198, 25° С үеийн ионы хөдөлгөөнт чанар	
4	$\chi_{үлд}$	үлдэгдэл цахилгаан дамжуулах чадвар-Тэжээлийн уснаас орж ирж буй бусад давслагийн (хлорид, сульфат) нөлөө	мкСм/см
5	f	(хувийн цахилгаан дамжуулах коэффициент): 1 мг/л фосфатын ионы үүсгэх цахилгаан дамжуулах чадварыг илэрхийлэх коэффициент	Энэ нь 25°С-д тодорхойлсон натри ба фосфатын молийн харьцаа ($\alpha Na = Na/PO_4$)-наас хамаарч өөрчлөгдөнө.

Станцын тэжээлийн усанд нэмэлтээр өгөгддөг аммиак (NH_3) болон гидразин (N_2H_4) нь тогооны усны цахилгаан дамжуулах чадварыг хуурамчаар нэмэгдүүлдэг тул тооцоонд дараах залруулгыг хийсэн. Үүнд:

1. Тэжээлийн усны залруулга: Тэжээлийн усны нийт цахилгаан дамжуулах чадварыг бус, зөвхөн H-катионит шүүлтүүрийн дараах тэжээлийн усны цахилгаан дамжуулах чадварыг ашигласан.

2. Аммиакийн залруулга: Тогооны усны pH-ын утгаас хамааруулан гидроксил (OH^-)-ийн ионы цахилгаан дамжуулах чадварыг хасаж, залруулсан цахилгаан дамжуулах чадварын бодит утгыг гаргаж авсан [4,5].

Тогооны усанд оруулж буй натрийн фосфатууд (тодруулбал $Na_3PO_4 \cdot H_2O$ — гурван натрит фосфат) кальцийн хаг үүсэх процессоос дараах байдлаар сэргийлдэг. Тогооны усанд PO_4^{3-} ба Ca^{2+} ион илүүдэх үед тодорхой нөхцөлүүдийн дор $Ca_{10}(PO_4)_6 \cdot (OH)_2$ гидроксилапатит буюу хөдлөмтгий хэлбэртэй нитэг үүсдэг. Ингэснээр кальцийн ионы концентраци багасаж, тогооны ус бусад хаг үүсгэгч нэгдлүүд ($CaCO_3$, $CaSO_4$, $CaSiO_3$) ханасан нөхцөлд хүрэхгүй болдог [6].

Лабораторийн шинжилгээгээр тэжээлийн усны ерөнхий хатуулгийг стандарт комплексонометрийн (ЭДТА) аргаар тодорхойлоход тэжээлийн усны цэвэршилт өндөр байгаагийн улмаас ихэнхдээ хатуулаг "илрэхгүй" байгаа нь тухайн ус хатуулаггүй гэсэн үг биш, харин аргын боломжоос хэтэрсэн бага концентрацитай байгааг илтгэнэ [3]. Иймд үлдэгдэл хатуулгийн (0.5 мкг-экв/л хүртэлх) тогооны усны төлөв байдалд үзүүлэх нөлөөг тооцохдоо цахилгаан дамжуулах чанарын залруулсан утгад суурилсан математик загварчлалыг судалгаанд ашигласан.

Дараах хүснэгтэд нийт 72 удаагийн тэжээлийн ба зуухны усны шинжилгээний үр дүнгээр тооцсон залруулсан тогооны усны цахилгаан дамжуулах чадварын бодит тооцоот утга, тогооны усны цэвэр хэсгийн фосфатын, хэмжилтийн утга, мөн Б.М.Ларины тэгшитгэлээр тодорхойлсон тогооны усны цэвэр хэсгийн цахилгаан дамжуулах чадварын онолын утгыг тус тус үзүүлэв [4].

ЗУУХНЫ УСНЫ ШИНЖИЛГЭЭНИЙ БА

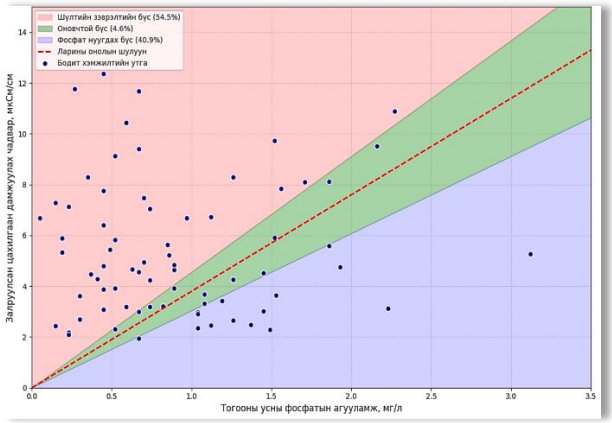
ТООЦООЛСОН ҮР ДҮН [3,4]

2-Р ХҮСНЭГТ

Д.д	Фосфатын агууламж, мг/л	Залруулсан цахилгаан дамжуулах чадварын бодит утга, мкСм/см	Онолын цахилгаан дамжуулах чадвар, мкСм/см	Үлээлэг, %
1	1.37	2.482	5.206	1.17
2	0.67	1.946	2.546	1.11
3	1.04	2.982	3.952	1.09
4	1.26	4.256	4.788	1.17
5	0.23	2.178	0.874	1.04
6	0.74	4.246	2.812	0.74
7	0.19	5.334	0.722	0.52
8	0.63	4.670	2.394	0.51
9	0.89	4.646	3.382	0.82
10	0.41	4.282	1.558	1.04
11	0.67	4.553	2.546	1.08
12	0.35	8.299	1.33	1.09
13	0.49	5.446	1.862	1.0
14	0.37	4.470	1.406	0.95
15	0.45	12.370	1.71	0.72
16	3.12	5.263	11.856	0.86
17	0.74	7.056	2.812	0.93
18	1.08	3.689	4.104	0.77
19	0.82	3.211	3.116	0.75
20	1.52	5.920	5.776	0.68
21	0.89	3.923	3.382	0.7
22	1.56	7.852	5.928	0.82
23	1.86	8.130	7.068	0.76
24	1.71	8.111	6.498	0.79
25	0.74	3.198	2.812	0.88
26	1.45	4.522	5.51	1.04
27	1.53	3.630	5.814	1.18
28	1.93	4.753	7.334	1.09
29	0.89	4.839	3.382	1.02
30	0.85	5.639	3.23	0.96
31	1.12	6.731	4.256	0.97
32	0.59	10.432	2.242	1.02
33	0.15	2.430	0.57	1.04
34	0.7	4.956	2.66	1.03
35	0.3	2.689	1.14	0.98
36	1.19	3.432	4.522	0.92
37	1.04	2.911	3.952	0.89
38	1.04	2.363	3.952	1.05
39	0.52	2.320	1.976	1.01
40	1.26	2.662	4.788	0.87
41	1.12	2.459	4.256	1.04
42	1.08	3.327	4.104	0.86
43	1.45	3.011	5.51	1.0
44	0.67	2.990	2.546	0.95
45	0.59	3.195	2.242	0.93
46	1.52	9.723	5.776	0.98
47	1.49	2.282	5.662	0.44
48	2.23	3.134	8.474	0.96
49	2.27	10.895	8.626	0.95

50	0.52	3.909	1.976	1.0
51	0.27	11.778	1.026	0.98
52	0.86	5.232	3.268	0.97
53	0.45	6.413	1.71	0.99
54	0.15	7.282	0.57	0.96
55	0.7	7.482	2.66	0.93
56	2.16	9.523	8.208	0.94
57	0.52	9.120	1.976	0.81
58	0.52	5.823	1.976	0.81
59	0.45	3.870	1.71	0.47
60	0.67	9.400	2.546	0.78
61	1.26	8.300	4.788	0.83
62	0.19	5.899	0.722	0.89
63	0.23	7.132	0.874	0.6
64	0.67	11.690	2.546	0.87
65	0.3	3.609	1.14	0.84
66	1.86	5.590	7.068	0.74
67	0.23	2.088	0.874	0.81
68	0.45	4.804	1.71	0.86
69	0.97	6.689	3.686	0.93
70	0.45	3.073	1.71	0.78
71	0.45	7.753	1.71	0.7
72	0.05	6.690	0.19	0.74

Дээрх хүснэгтэд заасан утгуудаар тогооны усны фосфатын агууламжаас хамаарсан залруулсан цахилгаан дамжуулах чадварын бодит ба онолын харьцуулалтыг графикаар 1-р зурагт үзүүлэв.



1-р зураг. Тогооны усны фосфатын агууламжаас хамаарсан залруулсан цахилгаан дамжуулах чадвар (Бодит ба онолын харьцуулалт)

Энэхүү графикийн онолын гол тулгуур нь өндөр даралтын уурын зуухны тогооны усны цахилгаан дамжуулах чадвар нь түүнд агуулагдаж буй ионуудын нийлбэр цахилгаан дамжуулах чадвартай тэнцүү байдагт оршино. График дээр дүрсэлсэн улаан шулуун нь натри ба фосфатын молийн харьцаа αNa ==2.8- 3.0 байх үеийн онолын идеал хамаарал, харин цэнхэр цэгүүд нь бодит хэмжилтийн утгуудаас аммиак болон тэжээлийн усны цахилгаан дамжуулах чадварыг хасаж тооцсон залруулсан цахилгаан дамжуулах чадварын бодит утгууд юм [7].

Графикаас харахад онолын улаан шугамын дээд хэсэгт залруулсан цахилгаан дамжуулах чадварын бодит цэгүүдийн ихэнх нь байрлаж байгаа нь тодорхой харагдаж байна.

Шүлтийн зэврэлтийн бүс (ягаан): Нийт өгөгдлийн 54.5% орчим нь шулууны дээр байрлаж байна. Онолын хувьд энэ нь натри-фосфатын харьцаа алдагдаж, чөлөөт идэмхий шүлт (NaOH) хуримтлагдсаныг заана. Өөрөөр хэлбэл αNa>3 байгааг заана. Энэ нь металлын гадаргуу дахь хамгаалалтын магнетит үеийг уусгаж, шүлтийн зэврэлт үүсгэх, улмаар металл цоорох өндөр эрсдэлтэйг харуулж байна.

Фосфат нуугдах үзэгдлийн бүс (цэнхэр): Нийт өгөгдлийн 40.9% орчим нь шулууны доор байна. Лабораторийн шинжилгээгээр фосфат усанд байгаа мэт боловч цахилгаан дамжуулах чадвар онолын түвшинд хүрэхгүй байгаа нь фосфатын ионууд зуухны халах гадаргуу дээр тунадасжиж фосфатын болон кальцийн хаг үүсэх, дулаан дамжуулалт муудах, түлшний зарцуулалт нэмэгдэх үндсэн нөхцөл болж байна [7].

Тэжээлийн усны хатуулаг титрлэлтийн аргаар илрэхгүй байгаа хэдий ч ийнхүү 'фосфат нуугдах үзэгдэл' ажиглагдаж байгаа нь 0.5 мкг-экв/л хүртэлх үлдэгдэл хатуулаг фосфатын ионтой урвалд орж, металлын гадаргуу дээр тунадас хаг үүсгэснээр батлагдаж байна.

Түүнчлэн 40.9%-ийн хаг үүсэх эрсдэл нь үлээлгийн хэмжээнээс шууд хамааралтай.

Хүснэгт 1-ээс харахад үлээлгийн хэмжээ 0.5-1% хүртэл байх нормт хэмжээнээсээ үе үе ихсэж байсан нь харагдаж байна. Үлээлгийн хувь хэт их байх нь тогооны усны эргэлтийн хурд болон дулааны ачаалалд нөлөөлж, фосфатын ионууд металл дээр тунадасжих нөхцөлийг өдөөж болно. Үлээлгийг оновчтой бага түвшинд барьснаар тогооны усан дахь фосфатын ионы "идэвхтэй" байх хугацааг уртасгаж, металл гадаргуу дээр тогтох хагны хуримтлалыг багасгадаг [9].

Оновчтой горимын бүс(ногоон): Нийт 72 цэгийн зөвхөн 4.6% нь Ларины онолын шугамд нийцэж, натри-фосфатын молийн харьцаа харьцаа αNa = 2.8 - 3.0 түвшинд байна. Энэ бүсэд тогооны усны цэвэр хэсгийн фосфатын агууламж 0.3 -0.6 мг/л байх үед цэгүүд улаан шулуунтай хамгийн бага сарнилтайгаар давхцаж байна.

Дараах 2-р зурагт тогооны усны залруулсан цахилгаан дамжуулах чадварын бодит утгаас үргэлжийн үлээлгийн хэмжээ хэрхэн хамаарах хамаарлын графикийг үзүүлэв.



2-р зураг. Тогооны усны залруулсан цахилгаан дамжуулах чадварын бодит утгаас хамаарсан хамаарсан үргэлжийн үлээлэг

Дээрх графикт регрессийн шинжилгээ хийхэд корреляцийн коэффициент (r) ойролцоогоор -0.12 ÷ -0.15 гарч байна. Энэ нь маш сул сөрөг хамааралтайг илтгэнэ. Онолын хувьд цахилгаан дамжуулах чадвар ихсэхэд үлээлгийг нэмэгдүүлэх ёстой боловч практик дээр энэ хоёр үзүүлэлт хоорондоо уялдаагүй (эмх замбараагүй) байгааг харуулж байна. Үлээлгийн хувийн хэлбэлзлийн зөвхөн 2% орчим нь цахилгаан дамжуулах чадвараас хамаарч байна. Үлдсэн 98% нь бусад хүчин зүйлс (субьектив шийдвэр, фосфатын тун г.м) байгааг харуулж байна. Итгэлцүүрийн түвшин P> 0.05 байгаа нь статистикийн хувьд энэхүү хамаарал нь найдвартай биш гэдгийг илтгэнэ. Өөрөөр хэлбэл тус станцад тогооны усны цахилгаан дамжуулах чадварын бодит утгад тулгуурлан зуухны үргэлжийн үлээлгийг тохируулдаггүй гэдэг нь харагдаж байна. Детерминацийн коэффициент нь $R^2 = 0.0168$ гарсан. Энэ нь үлээлгийн хэмжээг тохируулахад усны чанарын бодит үзүүлэлтийг харгалзахгүй, зөвхөн субьектив удирдлагаар явуулж байгааг статистикийн хувьд баталж байна.

III. БАГАСГАСАН ФОСФАТЫН ГОРИМД ШИЛЖСЭНЭЭР ГАРАХ ҮР ДҮН

Судалгааны хүрээнд хийгдсэн 72 удаагийн туршилтын үр дүн болон математик залруулгын үр дүнд дараах үр ашгийн тооцоог хийв.

1. Үлээлгийн хувийг бууруулах

Лабораторийн шинжилгээгээр зуухны ханасан ба хэт халсан ууранд агуулагдах натрийн агууламж Na < 2 мкг/л, болон цахиур SiO_2 < 14 мкг/л буюу маш бага байгаа нь тогооны усны үлээлгийг бууруулах нөөц боломж байгааг харуулж байна. Иймээс багасгасан фосфатын горимыг нэвтрүүлснээр одоогийн дундаж үлээлгийн хувь 0.9 % байгааг 0.5% хүртэл буюу 0.4%-иар бууруулна. Тогооны усны үлээлгийг бууруулснаар тэр хэмжээний усыг халаах дулааныг хэмнэнэ.

Түлшний хэмнэлт (нүүрс): Үлээлгийн усыг халаахад зарцуулж буй дулааныг тооцвол жилд нэг зуухны хувьд ойролцоогоор 520 тн бодит нүүрс хэмнэнэ [2].

2. Нэг зуухны хувьд тооцоолсон усны хэмнэлт

Зуухны ачааллыг D = 420 тн/ц гэж үзвэл (13.8 МПа зуухны дундаж):

- Цагт хэмнэх ус: $G = D \cdot p = 420 \cdot 0.004 = 1.68$ тн/ц
- Жилд хэмнэх ус (8000 цаг ажиллана гэвэл):$1.68 \cdot 8000 = 13{,}440$ тн/жил

3. Фосфатын хэмнэлт

Ларины алгоритмыг ашиглан тогооны усны цэвэр хэсгийн фосфатын концентрацийг 0.3-0.6 мг/л түвшинд барьснаар хэрэглээг 40-60%-иар бууруулна.

ДҮГНЭЛТ

Судалгаанд хамрагдсан 72 удаагийн хэмжилтийн статистик өгөгдөлд хийсэн шинжилгээгээр тогооны усны залруулсан цахилгаан дамжуулах чадвар болон фосфатын агууламжийн хамаарал нь Ларины онолын шугаман загварт нийцэж байна. Нийт хэмжилтийн үр дүнгээс үзэхэд фосфатын агууламжийг 0.3 -0.6 мг/л мужид барих нь металлын гадаргууд шүлтийн зэврэлт үүсэх болон фосфат нуугдах үзэгдлийн эрсдэлийг хамгийн бага түвшинд барих боломжтойг тогтоолоо.

Тэжээлийн усны давсны цахилгаан дамжуулах чадвар болон аммиакийн нөлөөг тооцсон залруулсан алгоритмаар байгуулсан график нь тогооны усны бодит төлөв байдлыг 90 гаруй хувийн магадлалтайгаар илэрхийлж байна. График дээрх цэгүүдийн хазайлт нь тогооны усан дахь чөлөөт шүлтийн илүүдэл болон фосфатын тунадасжилтыг тодорхойлох үндэслэл болж байгаа бөгөөд энэхүү загварыг “ДЦС-4” ТӨХК-ийн ус уурын дотоод циклийн хяналтын системд нэвтрүүлснээр зуухны ус-химийн горимыг тогтвортой барьж, тоноглолын ашиглалтын хугацааг уртасгах техникийн боломж бүрдэнэ.

Зуухны үргэлжийн үлээлгийг ЦДЧ-ын хэмжилтийн утгаас хамааруулан автоматжуулах шаардлагатай. Үлээлгийг 0.5%-иар тогтвортой барьснаар, цахилгаан дамжуулах чадварын хэлбэлзлийг багасгаж, ус-химийн горимыг оновчтой барих боломжтой.

Тогооны усны химийн горимыг багасгасан фосфатын горимд шилжүүлснээр жилд нэг зуухны хувьд 13,440 тн химийн давсгүйжүүлсэн ус, 520 тн бодит нүүрс хэмнэх боломжтойг тооцооллоо.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] R. E. Hall, "A System of Boiler Water Treatment Based on Chemical Equilibrium," Industrial & Engineering Chemistry, vol. 17, no. 3, pp. 283–290, Mar. 1925, doi: 10.1021/ie50183a024.

[2] С. Батмөнх, Дулааны цахилгаан станц, Улаанбаатар: Шинжлэх ухаан, технологийн их сургууль, 2010.

[3] “ДЦС-4” ТӨХК-ийн шуурхай ба төв лабораторийн уур усны химийн шинжилгээний тайлан 2024, 2025.

[4] Б. М. Ларин, "Оптимизация фосфатного режима барабанных котлов," Теплоэнергетика, no. 5, pp. 24–28, 2003.

[5] Б. М. Ларин ба Е. Н. Бушуев, Методы контроля и управления водным режимом барабанных котлов высокого давления, Москва: Энергоатомиздат, 2001.

[6] Feedwater, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants / Industrial Plants, VGB-S-010-T-00, VGB PowerTech e.V., 2011.

[7] Общие технические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химических режимов ТЭС, РД 153-34.1-37.532-98, Министерство энергетики РФ, 1998.

[8] Т. Х. Маргулова ба О. И. Мартынова, Водные режимы тепловых и атомных электростанций, Москва: Высшая школа, 1987.

[9] Т. И. Петрова ба О. В. Егошина, "Анализ состояния фосфатных водно-химических режимов барабанных котлов высокого давления," Теплоэнергетика, no. 11, pp. 121–129, 2024. doi: 10.56304/S0040363624700395

[10] L. D. Paul and R. B. Dooley, Corrosion Fatigue crack initiation of boiler tubes, California: Electric Power Research Institute (EPRI), 1996.

[11] S. Tsubakizaki et al., "Advanced Water Treatment Technologies (High-AVT) for HRSG Corrosion Control," Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, vol. 54, no. 3, 2017.

[12] I. M. Baghni and A. I. Zwebek, "Using of congruent phosphate as equilibrium phosphate boilers water treatment," Engineering Academy Journal, 2010.

[13] IAPWS, "Technical Guidance Document: Phosphate and NaOH treatments for the steam-water circuits of drum boilers," International Association for the Properties of Water and Steam, Sept. 2015.

[14] EPRI, "Cycle Chemistry Guidelines for Fossil Plants: Phosphate Treatment for Drum Units," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 2004.

[15] ASME, "Consensus on Operating Practices for the Control of Feedwater and Boiler Water Chemistry," The American Society of Mechanical Engineers, 2021.

“ЭРДЭНЭТ ДЦС” ТӨХК-ИЙН БКЗ-75-39 ФБ ЗУУХНЫ ТООС БЭЛТГЭЛИЙН СИСТЕМИЙН ШБМ-287/410 МАРКИЙН ҮРЛЭН ТЭЭРМИЙН ГОРИМЫН СУДАЛГАА

Гансүхийн ҮҮРИЙНТУЯА[1], Должинсүрэнгийн БАЛДАНДОРЖ[2]

[1]”Эрдэнэт ДЦС” ТӨХК

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, ДЦС-ын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: uurka03@gmail.com[1] dbaldandorj@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Эрдэнэт ДЦС-ТӨХК-ийн БКЗ-75-39 ФБ маркын №2 зуухны тоос бэлтгэлийн системийн ажиллагаа, эрчим хүчний зарцуулалт болон системийн үр ашгийг судалж, ШБМ-287/410 үрлэн тээрмийн бүтээмжийг тооцоолсон болно. Судалгааны хүрээнд тээрмийн найдвартай ажиллагаа, үр ашигт чухал нөлөө үзүүлдэг хуяг (бронь)-ийн хацар болон ханын элэгдэл, мөн ган шаарны жингийн элэгдлийг туршилт, хэмжилтийн аргаар тодорхойлж, элэгдлийн хурд болон ашиглалтын хугацаатай хамаарах зүй тогтлыг тогтоож хуяг болон шаарны элэгдэл нэмэгдэхийн хэрээр тээрмийн нунтаглах процессын үр ашиг буурч, эрчим хүчний хувийн зарцуулалт өсөх хандлагатай болох нь тогтоогдлоо. Судалгааны үр дүнг нэгтгэн дүгнэж, тээрмийн ашиглалтын оновчтой горимыг тодорхойлох, хуяг болон шаар солих хугацааг зөв төлөвлөх, улмаар эрчим хүчний зарцуулалтыг бууруулах, тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын хугацааг уртасгах чиглэлээр техник-эдийн засгийн үндэслэл бүхий санал, зөвлөмж боловсруулав.**

Түлхүүр үг: БКЗ-75-39 ФБ, тоос бэлтгэлийн систем, тээрмийн хуяг буюу бронийн хацар, ханын элэгдэл ба ган шаарны жингийн элэгдэл, эрчим хүчний зарцуулалт

I. УДИРТГАЛ

Эрчим хүчний салбар нь Монгол улсын нийгэм, эдийн засгийн хөгжил дэвшил болон үндэсний аюулгүй бие даасан байдлыг хангах стратегийн ач холбогдол бүхий хөгжлийн тэргүүлэх салбар юм. Дулааны цахилгаан станцын технологийн үндсэн процессын нэг нь нүүрсийг шаардлагатай хэмжээнд хүртэл нунтаглах процесс юм. Тоос бэлтгэлийн системийн үр ашиг нь зуухны шаталтын процесс, түлшний зарцуулалт, станцын нийт ашигт ажиллагаанд шууд нөлөөлдөг. “ЭДЦС ТӨХК”-ийн БКЗ-75-39фб зуухны ажиллагаанд нүүрсний нунтаглалтын хэмжээ чухал үүрэгтэй бөгөөд нунтаглах процессын горим алдагдсанаар шаталтын тогтвортой байдал буурдаг. Иймээс энэхүү судалгааны зорилго нь ШБМ-287/410 тээрмийн ажиллагаа тээрмийн эд ангийн элэгдэл, бүтээмжийн тооцоо хийж, сайжруулах боломжийг тодорхойлоход оршино.

II. СУДАЛГААНЫ ЗОРИЛГО

БКЗ-75-39 ФБ маркын №2 зуухны тоос бэлтгэлийн системийн ажиллагааг иж бүрнээр нь судалж, нүүрс нунтаглах үндсэн тоног төхөөрөмж болох ШБМ-287/410 үрлэн тээрмийн бүтээмж, эрчим хүчний хувийн зарцуулалт болон ашиглалтын үр ашгийг тодорхойлох, цаашлаад тээрмийн найдвартай, тасралтгүй ажиллагааг хангах оновчтой нөхцөлийг тогтооход оршино. Үүний хүрээнд тээрмийн ажиллагаанд чухал нөлөө үзүүлдэг хүчин зүйлс болох ачаалал, тэжээлийн горим, эргэлтийн нөхцөл болон нунтаглалтын процессыг судалж, тэдгээрийн харилцан хамаарлыг тодорхойлохыг зорилоо. Мөн тээрмийн дотоод эд анги болох хуяг бронийн хацар болон ханын элэгдэл, ган шаарны жингийн элэгдлийг туршилт, хэмжилтэд тулгуурлан тогтоож, элэгдлийн хурд, ашиглалтын хугацаатай уялдах хамаарлыг илрүүлэхэд чиглэнэ.Түүнчлэн элэгдлийн түвшин нь тээрмийн нунтаглах процессын үр ашиг бүтээгдэхүүний чанар, эрчим хүчний зарцуулалтад хэрхэн нөлөөлж байгааг үнэлж, эдгээр үзүүлэлтүүдийн хоорондын хамаарлыг тоон болон график аргаар тодорхойлохыг зорьсон. Судалгааны эцсийн зорилго нь тээрмийн ашиглалтын оновчтой горимыг тодорхойлох, хуяг болон шаар солих хугацааг шинжлэх ухааны үндэслэлтэй тогтоох, улмаар эрчим хүчний зарцуулалтыг бууруулах, тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын хугацааг уртасгах, үйлдвэрлэлийн үр ашгийг дээшлүүлэхэд чиглэсэн практик ач холбогдол бүхий зөвлөмж боловсруулахад оршино.

III. СУДАЛГААНЫ ХЭСЭГ

Эрдэнэтийн ДЦС-ын БКЗ-75-39 ФБ маркын 2-р зуухны ШБМ-287/410 маркын 2-р тээрэмд үзлэг хийж шаарны жин, хэмжээ тээрмийн хуяг буюу бронын хацрын элэгдэл зэргийг судалж тодорхойлсон. Судалгааны явцад тус станц нь Шарын голын уурхайн нүүрсээр ажиллаж байв. Үрлэн тээрэм нь практикт хамгийн их ашиглагддаг ба голчлон дэгдэмхий эд $V^{ш}$ багатай түлшийг, алхан тээрэм нь хүлэр, занар, хүрэн нүүрс, мөн түүнчлэн чулуун нүүрсийг нунтаглахад голчлон ашиглагддаг. Зарим хэлбэрийн чулуун нүүрсийг нунтаглахад дунд эргэлтийн булт тээрмийг, харин $К_{ло}$≥1,15 зөөлөн нүүрсэнд, тухайлбал чийглэг ихтэй хүрэн нүүрсэнд тээрэм-салхилуурыг ашигладаг.

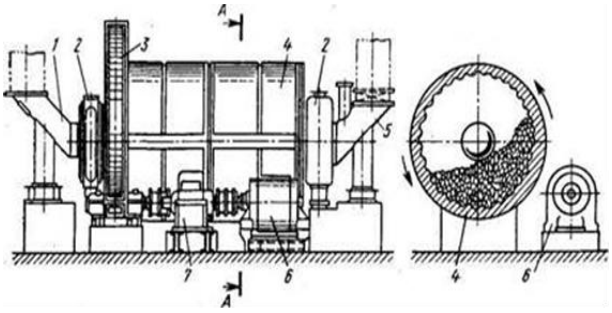
ШАРЫН ГОЛЫН УУРХАЙН НҮҮРСНИЙ ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

1-Р ХҮСНЭГТ.

№	Элементийн нэр	Тэмдэглэгээ	Нэгж	Утга
1	Ажлын чийглэг	$W^{р}$	%	19.5
2	Ажлын үнслэг	$A^{р}$	%	23.7

3	Хүхрийн агууламж	S^p	%	1.1
4	Нүүрстөрөгчийн агууламж	C^p	%	42.8
5	Устөрөгчийн агууламж	H^p	%	2.8
6	Азотын агууламж	N^p	%	0.6
7	Хүчилтөрөгчийн агууламж	O^p	%	9.5
8	Дэгдэмхий эд	V^p	%	44.6
9	Дулаан гаргах доод чадвар	Q_H^p	ккал /кг	3850

Үрлэн тээрэм. Практикт хамгийн их ашиглагддаг тээрэм нь үрлэн ба алхан тээрэм юм. Үрлэн тээрэм нь голчлон дэгдэмхий эд $V^{ш}$ багатай түлшийг, алхан тээрэм нь хүлэр, занар, хүрэн нүүрс, мөн түүнчлэн залуу чулуун нүүрсийг нунтаглахад голчлон ашигладаг. Зарим хэлбэрийн чулуун нүүрсийг нунтаглахад дунд эргэлтийн булт тээрмийг, харин $К_{ло}$≥1,15 зөөлөн нүүрсэнд, тухайлбал чийглэг ихтэй хүрэн нүүрсэнд тээрэм-салхилуурыг ашигладаг.



1 -р зураг – Үрлэн тээрмийн дагуу огтлол

1–гарах хоолой; 2–тулгуур хольхивч; 3–том араа; 4–их бие-барабан; 5–орох хоолой; 6– цахилгаан хөдөлгүүр; 7– редуктор

IV. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

ШБМ 287/410 маркийн 2-ийн үрлэн тээрэмд үзлэг хийх тээрмийн шаарны жин, хэмжээ тодорхойлсон протокол

Тээрмийн шаарны жин тодорхойлох томьёо:

$$G_{ш} = 3.26 \cdot B \cdot L \cdot (D - K), \text{тн} \quad (1)$$

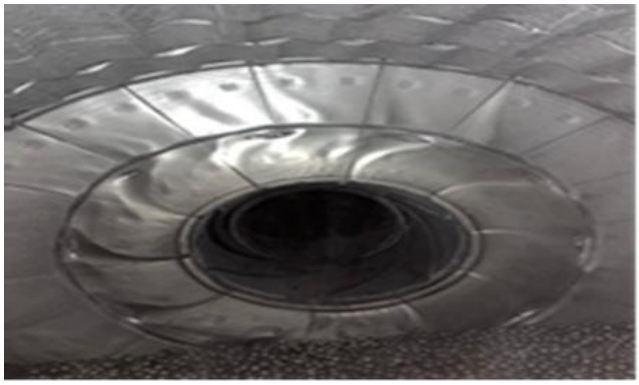
B – тээрмийн барабаны хэвтээ тэнхлэгийн дагуух хэмжээ, м

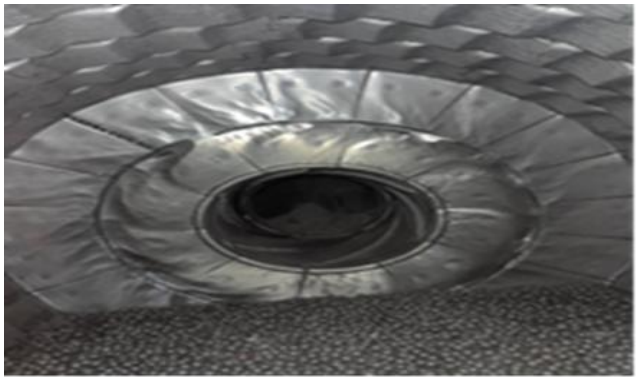
$L -$ тээрмийн барабаны урт, м

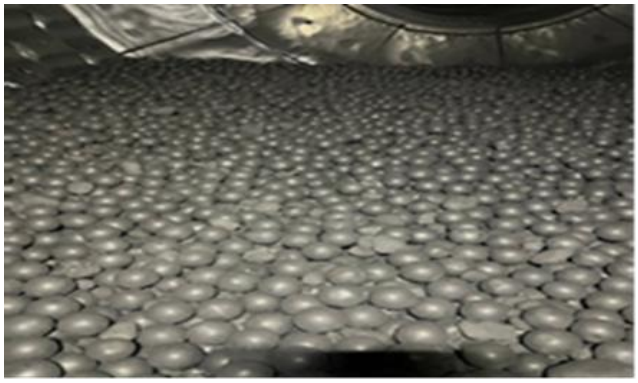
$D -$ тээрмийн барабаны диаметр, м

$K -$ барабаны босоо тэнхлэгийн дагуух хоосон зай м

$$G_{ш} = 3.26 \cdot B \cdot L \cdot (D - K)$$
$$= 3.26 \cdot 2.47 \cdot 4.10 \cdot (2.87 - 2.275)$$
$$= 19.6 \text{ тн}$$







2-р зураг. ШБМ-2 хуяг буюу бронийн хацар, ханын элэгдэл ба ган шаарны жингийн элэгдэл

Тээрмийн хуягын өндөр 3.5-3.8 см байв. Орох талын тойргын дотоод брон 9ш цөмрөөд цоорсон ховил бүгд элэгдсэн. Гарах талын тойргын дотоод брон 3ш цөмрөөд цоорсон ховил бүгд элэгдсэн 2 тн шаар нэмэх шаардлагатай шаарны элэгдлийг жингээр тооцоход 1 ш шаарны жин 80, 129.4, 262.8 гр буюу дунджаар 157 гр байгаа нь 45.3%-ийн элэгдэлтэй байгааг харуулж байв. Шинэ долгионт бронийн өндрийн хамгийн их зөрүү 50 мм байдаг, харин элэгдсэн бронийг хэмжихэд 34-36 мм буюу дунпжаар 35 мм гарсан. ШБМ-2 бронийн элэгдэл 30%, шаарны элэгдэл 45% гарсан. К-6 зуухны Шарын голын нүүрсний тоосны үзүүлэлт: тоосны чийг 5.8%, 90 микроны шүүрэн дээрх үлдэгдэл 22.7% байсан.

ШБМ-287/410 ҮРЛЭН ТЭЭРМИЙН ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ.

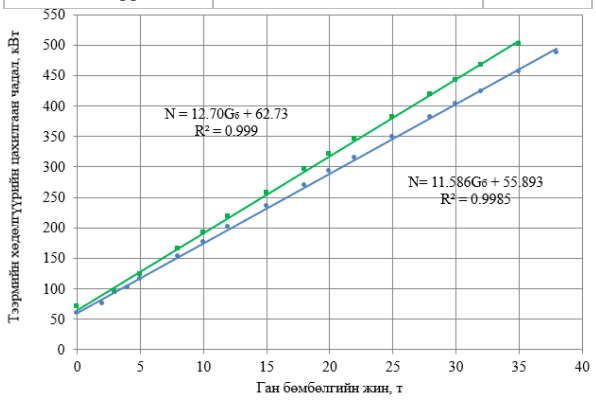
№	ШБМ-287/410 үрлэн тээрмийн техникийн үзүүлэлт		
	ШБМ-287-/410	Нэгж	Тоо
1.	Тооцооны хүчин чадал	т/ц	12
2.	Барабаны дотоод диаметр	мм	2870
3.	Барабаны дотоод ури	мм	4100
4.	Шарикын жин	тн	30
5.	Шаарикны диаметр	мм	40

ШБМ-2 ҮРЛЭН ТЭЭРМИЙН ЦЭХ-НИЙ ХУВИЙН ЗАРЦУУЛАЛТЫН ТООЦОО

3-Р ХҮСНЭГТ

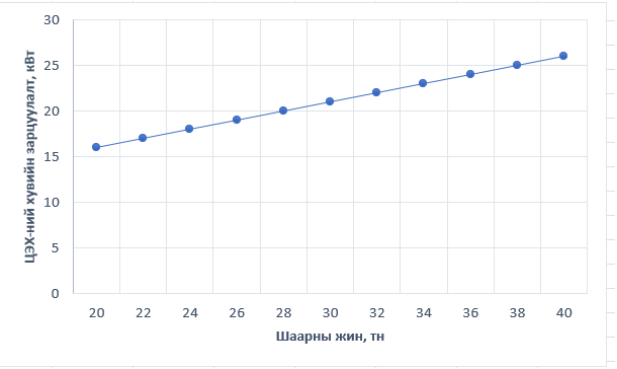
Тооцооны үзүүлэлт	**Тэмдэглэгээ**	**Хэмжих нэгж**	**Үр дүн**
Түлшний үзүүлэлт			**К-2**
ШАРЫН ГОЛ			**ШБМ-2**
Ажлын чийг	$W^{р}$	%	17.7
Тоосны чийглэг	$W^{пл}$	%	5.80
Аналитик	W^{A}	%	5
Хамгийн их чийглэг	$W^{P}max$	%	19.939
Дэгдэмхий эдийн гаралт	$V^{г}$	%	45.90
Тоосны нунтагралт 90 мкм	R_{90}	%	22.70
Нунтаглагдах чадварын коэффициент /ВТИ-ээр/	$К_{ЛО}^{ВТИ}$	-	1.05
Тээрмийн төрөл, марк	ШБМ		287/410
Техникийн үзүүлэлт			
Барабаны эргэлтийн тоо	n	об/мин	18.7
Барабаны хөндлөн огтлолын талбай	f	$м^2$	6.47
Барабаны эзлэхүүн	$V_б$	$і^3$	26.51
Ган бөмбөлгийн макс жин	G	тн	30
Барбаны диаметр	$D_б$	м2	2.87
Барбаны урт	$L_б$	м2	4.1
Тооцооны хэмжигдэхүүн $Dб^{2,4}*Lб*nб^{0,8}$			536.01
Ханын зузаан	S	м2	0.071
Овоолсон ган бөмбөлгийн нягт	$g_{ган.бөм}$	$т/м^3$	4.9
Барабаны критик эргэлт	$n_{кр}$	об/мин	24.97
Ган бөмбөлгийн дүүргэлтийн хувь	$f_б$	%	0.231
Тээрмийн нунтаглалтын тооцоо			
Барабан дахь ган бөмбөлгийн дүүргэлтийн оновчтой утга	$f_{опт}$	%	0.231
Тооцооны үзүүлэлт	$f_{опт}^{0,6}$		0.415
Тооцооны үзүүлэлт	$sqrt(Ln100/R_{90})$		1.218
Уруудуулан хатаагчид хатаагчид авсан чийг	а		0.4
2-р үеийн хатаагчид хатаагчид авсан чийг	в		0
Тээрмийн өмнөх чийглэг	$W^{I}_{м}$		13.32
Дундаж чийглэг	$W^{ср}$		7.680
Хамгийн их чийглэгээр тодорохойлогдох хэмжигдэхүүн	К		22.76
Тооцооны хэмжигдэхүүн /хамгийн их чийглэгийн квадратаас хамаарсан/	$К^2$		518.11
Тооцооны хэмжигдэхүүн /дундаж чийглэгийн квадратаас хамаарсан/	$W^{СР2}$		58.98
Тооцооны хэмжигдэхүүн /гигроскоп чийглэгийн квадратаас хамаарсан/	$W^{ГИ2}$		25.00
Тооцооны хэмжигдэхүүн /гигроскоп чийглэгийн квадратаас хамаарсан/	WГИ2		25.00
Түлшний хамгийн их, дундаж чийг, гигроскоп чийглэгийн квадратуудын нунтаглагдах чадварын коэффициентод үзүүлэх нөлөөллийг тооцсон коэффициент	ПВЛ1		0.9649
Түлшний ажлын болон дундаж чийглэг нунтаглагдах чадварын коэффициентэд үзүүлэх нөлөөллийг тооцсон коэффициент	ПВЛ2		1.122
Тээрмийн бүтээмжид барабаны салхижуулалтын үзүүлэх нөлөөллийг тооцсон коэффициент	$К_{вент}$		1.0

Тээрмийн хуягын элэгдлийг тооцсон коэффициент	$К_{бр}$		0.9
Ашиглалтын нөхцлийг тооцсон коэффициент	$К_{экс}$		0.9
Бутлалтын зэрэг тээрмийн бүтээмжинд үзүүлэх нөөллийг тооцсон коэффициент	$П_{др}$		1.127
Тээрмийн нунтаглалтын бүтээмж	В	тн/ц	16.58
Дамжуулгын АҮК	$n_{прв}$	%	0.865
Тооцооны хэмжигдэхүүн	$D_б$		23.64
Тооцооны хэмжигдэхүүн	$f_{0.9}$		0.267
Коэффициент	$К_{тл}$		1.04
Барабаны голыг эргүүлэхэд шаардагдах чадал	$N_{д.дв}$	кВт	347.10
Тээрмийн цахилгаан хөдөлгүүрийн АҮК	$n_{эл}$		0.92
Сүлжээнээс шаардагдах чадал	$N_б$	кВт	377.28
Цахилгаан хөдөлгүүрийн чадал	$N_{эл}$	кВт	381.81
1 т нүүрсийг нунтаглахад шаардагдах ЦЭХ-ний хувийн зарцуулалт	Эраз	т/кВт ц	23.66
Тооцооны хэмжигдэхүүн	$38 \cdot V_б/(n_б \cdot D_б)$		31.80



1-р зураг Тээрмийн ган үрэлний дүүргэлтийн коэффициент тээрмийн цахилгаан хөдөлгүүрийн чадлын хамаарлын график

2-р зуухны тээрэм дунджаар $\boldsymbol{N}_{шбм}$= 286.4 кВт·ц ачаалагдаж байх үед тээрмийн шарны жинг тооцвол $\boldsymbol{G}_{ш}$ ≈ 21÷22 т байна. Энэ нь ШБМ-287/410 тээрмийн шарны дүүргэлт бүрэн биш байгааг харуулах ба шар дүүргэлтийн хэмжээ нь 70÷73% болж байна. Тээрмийн шар дүүргэлтийн хэмжээ нормт утганд хүрэхгүй байгаагаас шалтгаалан тээрмийн нунтаглалтын бүтээмж боломжит хэмжээнд хүрэхгүй байгаагийн дээр бункер дэх тоос ахилтын хэмжээ бага байна. 1 т нүүрсийг нунтаглахад зарцуулах цахилгаан эрчим хүчний хувийн зарцуулалт дунджаар $Э_р$=22.39 кВт·ц/т.т байх үед тээрэмд дүүргэсэн шарны жинг тооцвол ойролцоогоор $\boldsymbol{G}_{ш}$= 34 тн гарч байна.



2-р зураг ШБМ-287/410 тээрэмд 1 тонн нүүрсийг нунтаглахад зарцуулах цахилгаан энерги, шарны жингийн график

2-р зууханд 1 тн тоосны нунтаглалт болон тээвэрлэлтэд зарцуулах цахилгаан эрчим хүчний хэмжээ дунджаар $Э_{пп}$ = 33.11 кВт·ц/т.т байгаа нь энэ төрлийн тээрэмтэй ТБС-д байх ёстой нормт үзүүлэлт болох $Э_{пп}$= 28÷30 кВт·ц/т.т-ээс өндөр байна. Туршилтын явцад ШБМ-287/410 тээрмийн бүтээмж $\boldsymbol{B}_{м}$= 17.52÷21.7 т/ц байх боломжтой боловч зууханд түлж буй түлшний зарцуулалтаар тээрмийн нунтаглалтын бүтээмжийг гаргавал $\boldsymbol{B}_{м}$ = 12.22÷13.34 т/ц болж байна. Энэ нь тээрмийн нунтаглалтын бүтээмжийг боломжит хэмжээнд ашиглаж чадахгүй байгааг илтгэж байгаа бөгөөд үүгээрээ давхар тээрмийн салхилуурын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг мөн өсгөж байна . Зуухны бохир АҮК дунджаар 93.44 % байна. Үүнд илүүдэл агаарын хэмжээ, хүйтэн агаарын температур болон зуухнаас гарах утааны хийн температур зэрэг параметрүүд хамгийн хүчтэй нөлөөлж байна. 1 тонн уур боловсруулахад зуухны үлээлт соролтод зарцуулах цахилгаан эрчим хүчний хувийн зарцуулалт дунджаар 2.36 кВт·ц/т.у, 1 тонн тоос бэлтгэхэд зарцуулах цахилгаан эрчим хүчний хувийн зарцуулалт дунджаар 33.11 кВт·ц/т.т байгаа нь зуухны тоос бэлтгэх систем болоод утаа сорогчийн цахилгаан эрчим хүчний хувийн зарцуулалт их байгааг харуулж байна.

V. ДҮГНЭЛТ

Завсрын бункертэй тоос бэлтгэлийн системийн нэг чухал давуу тал нь зуухны ачааллын хэлбэлзлээс үл хамааран тээрмийн ажиллагааг тогтвортой горимоор явуулах боломжийг бүрдүүлдэгт оршино. Энэ нь нүүрс нунтаглах процессын тасралтгүй, найдвартай ажиллагааг хангах үндсэн нөхцөл болдог. Судалгааны үр дүнгээс харахад К-2 зууханд ажиллаж буй ШБМ-287/410 тээрмийн хувьд тээрмийн хуягийн элэгдлийн коэффициент 0.9-өөс 0.6 хүртэл 0.3 нэгжээр буурахад нунтаглалтын бүтээмж 16.58 т/ц-аас 11.61 т/ц хүртэл буурч, нийт 4.97 т/ц-ийн алдагдал үүссэн байна. Энэ нь хуягийн элэгдэл нэмэгдэх тусам тээрмийн дотоод ажлын гадаргуугийн үр ашиг буурч, нунтаглах процессын кинетик нөхцөл муудаж байгааг илтгэнэ. Мөн 1 тн Шарын голын нүүрсийг нунтаглахад

зарцуулах цахилгаан эрчим хүчний хувийн зарцуулалт 23.66 кВт·ц/тн-оос 24.99 кВт·ц/тн хүртэл өссөн буюу тонн тутамд 1.33 кВт·ц-ээр нэмэгдсэн байна. Энэ нь тээрмийн элэгдэл ихсэх үед нунтаглах үр ашиг буурч, илүү их энерги зарцуулж байгааг харуулж байна. Өөрөөр хэлбэл, нэгж бүтээгдэхүүн үйлдвэрлэхэд шаардагдах энергийн зардал нэмэгдэж, системийн эдийн засгийн үр ашиг буурч байна. Дээрх өөрчлөлтүүд нь зөвхөн тээрмийн механик элэгдлээс шалтгаалахгүйгээр ган бөмбөлгийн хэмжээ, жингийн алдагдал, дотор хуягийн гадаргуугийн барзгар байдал алдагдах зэрэг хүчин зүйлүүдтэй шууд холбоотой. Эдгээр нь нунтаглалтын процессын цохилт, үрэлтийн горимыг өөрчилж, ширхэглэлийн шаардлагатай хэмжээнд хүрэх чадварыг бууруулдаг. Иймд тээрмийн хэвийн, үр ашигтай ажиллагааг хангахын тулд:

- Тээрмийн шаар дүүргэлтийн хэмжээ, ширхэглэлийн бүрэлдэхүүнийг тогтмол хянах
- тээрмийн хуягийн элэгдлийн түвшинг тогтмол хэмжих, норматив хэмжээнээс хэтэрсэн тохиолдолд хугацаанд нь солих
- техникийн ашиглалтын горим, засвар үйлчилгээний төлөвлөгөөг мөрдөх

зэрэг арга хэмжээг авч хэрэгжүүлэх шаардлагатай байна. Эдгээр арга хэмжээг хэрэгжүүлснээр тээрмийн бүтээмжийг тогтвортой хадгалах, цахилгаан эрчим хүчний зарцуулалтыг бууруулах, улмаар тоос бэлтгэлийн системийн нийт ашигт ажиллагааг дээшлүүлэх боломж бүрдэнэ.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Д.Балдандорж “Зуухны дулааны тооцооны нормчлолын арга”.УБ хот 2019 он, Соембо хэвлэл. х306.

[2] Д.Балдандорж “Уурын генераторын ашиглалт”.УБ хот 2021 он. Соембо хэвлэл. х298

[3] Д.Балдандорж, бусад “Түлшний шаталтын онолын үндэс ба галын хотлын төхөөрөмж”.УБ хот 2024 он. Соембо хэвлэл. 301х

[4] Ж.Цэен-Ойдов “Зуухны төхөөрөмжийн туршилт, зүгшрүүлэлт”.УБ хот 2015 он

[5] Д.Мандал “Уурын генератор”.УБ 2012 он

[6] Д.Нямдаваа “Уурын зуухны байгууламж”.Дархан хот 2015 он

[7] “ЭДЦС-ТӨХК”-ны БКЗ-75-39 ФБ зуухны ашиглалтын заавар

ДАРХАНЫ ДУЛААН ДАМЖУУЛАХ МАГИСТРАЛ 800ММ-ИЙН ДИАМЕТРТЭЙ ИЛ ШУГАМЫН ДУЛААНЫ АЛДАГДЛЫГ БУУРУУЛАХ

Цогбадрахын БОЛОР-ЭРДЭНЭ[1] Пашкагийн Бямбацогт[2] Батсамбуугийн Өлзийбадрах[3]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль,Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: boogii_tso@yahoo.com[1]

Хураангуй: **Дулаан хангамж нь эрчим хүчний салбарын нэг гол хэсэг бөгөөд улс орны хөгжлийн асуудлыг дулаан хангамжаас салангид авч үзэх боломжгүй юм. Байгаль, цаг уурын эрс тэс уур амьсгалтай манай орны хувьд дулаан хангамжийн үр ашгийг дээшлүүлэх, найдвартай ажиллагааг сайжруулах, байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөллийг багасгах зэрэг асуудлуудад дулаан дамжуулах шугамын дулаалга болон дулаан алдагдал нь нөлөөлөх том хүчин зүйлийн нэг болдог. Дархан-Уул аймгийн ДЦС-аас К6 цэг хүртэлх Ø800 мм-ийн ил тавигдсан төв магистраль шугам хоолойгоор алдах дулаан алдагдлыг туршилтын болон нормт утгаар тус тус тодорхойлон харьцуулан үзэхэд нийт дулаан алдагдлын 30 гаруй хувийг эзэлж байна. Энэ нь ил тавигдсан шугам хоолойн дулаалгын хамгаалах давхарга муу, дулаалгын үндсэн материал хоолойноосоо хөндийрсөн, нар салхинд элэгдсэн, газрын гадаргаас өндөр суурилагдсан шугам хоолойн доогуур мал шургах, шөргөөх зэргээр гадны механик гэмтлээс болж дулаалгагүй болсон ба хөөсөн дулаалга бүхий шилэн сүлжмэл тасран унаснаар хотын өнгө үзэмжид нөлөөлөи байгаль орчинг бохирдуулах шалтгаан болж байна.**

Түлхүүр үг: Дулааны шугам сүлжээ, шугам хоолой, дулаалга, дулааны алдагдал,

I. УДИРТГАЛ

Манай орны хувьд дулааны шугамын дулаалгыг гол төлөв угсралтын ажлын явцад газар дээр нь үйлдвэрлэлийн бус аргаар, өөрөөр хэлбэл гараар ороох, зулах, шавах байдлаар хийж байна. Иймээс дулаалгын ажлын чанар шаардлага хангахгүй, шугамын дулаан алдагдлыг нэмэгдүүлж, өнгө үзэмж муутай болох, ихээхэн цаг хугацаа зарцуулах зэрэг хүндрэл бий болгож байна.

Өнөөдрийн байдлаар дулаалгын хамгаалах давхарга муугаас (шилэн сүлжмэлээр ороосон) дулаалгын үндсэн материал болох пенополиуретан сегментүүд нь ган хоолойноос хөндийрч, шилэн сүлжмэл нь нар салхинд элэгдэж, сэмэрч шугам хоолойн дулаалга нь үндсэн үүргээ гүйцэтгэж чадахгүй болж, дулааны алдагдлыг нэмэгдүүлэх болсон. Мөн үхэр мал шөргөөснөөс хөөсөн дулаалга ба шилэн сүлжмэл тасрап унаж хотын өнгө үзэмжид нөлөөлөхөөс гадна байгаль орчныг бохирдуулж байна.

Иймд хэрэглэгчдийг ДЭХ-ээр найдвартай хангахын тулд дулааны шугам сүлжээний байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийг бууруулах, дулааны шугамын дулааны алдагдлыг багасгах, хотын өнгө үзэмжийг сайжруулах, ДЦС-аас К6 цэг хүртэлх дулаан дамжуулах шугамын ил хэсгийн шугам хоолойн дулаалгыг сайжруулах зайлшгүй шаардлага тулгарч байна.

Тус төв магистрал Ø800 мм-ийн ил тавигдсан шугамын дулаалгын ашиглалтын байдалд шалгалт хийж үзэхэд өнөөдрийн байдлаар нийт 750 хос метр шугамын дулаалга муудсан байна.

II. ШУГАМЫН ДУЛААНЫ АЛДАГДЛЫГ ТОДОРХОЙЛОХ ШААРДЛАГА

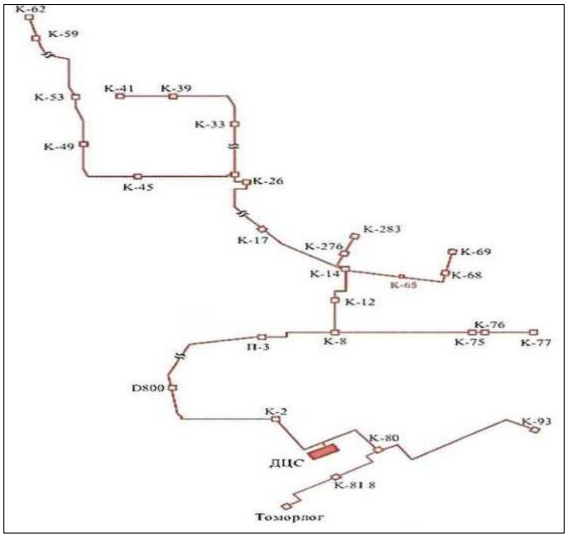
Шугамын дулааны хувийн алдагдлын оновчтой утгыг техник-эдийн засгийн харьцуулсан тооцооны үндсэн дээр тогтооно. Орчин үеийн төвлөрсөн дулаан хангамжийн системд дулааны эх үүсвэрээс хэрэглэгч хүртэл дулааныг тээвэрлэхэд дамжуулах хоолойн дулаан тусгаарлалтаар дулааны алдагдал үүсдэг.

Шугамын дулааны алдагдал нь дулааны сүлжээний ашиглалтын болон эрчим хүчний үр ашгийн үзүүлэлтүүдийн нэг бөгөөд дулааны үнэ тарифад нөлөөлөх чухал хүчин зүйл тул алдагдлыг тодорхойлох нь практикт үзүүлэх чухал ач холбогдолтой ажил юм.

Дулаан тусгаарлалтаар алдах дулааны алдагдал иь олон хүчин зүйлээс хамаардаг бөгөөд янз бүрийн диаметртэй хоолойн урт, дулаан тусгаарлагчийн хийц, температурын горим, дулааны сүлжээний хэсэг тус бүрийн дулаалгын бодит телөв байдал, түүний ашиглалтын нөхцөл, ашигласан хугацаа зэрэгээс хамаардаг тул дулааны алдагдалыг сүлжээний хэсэг тус бүрт тус тусад нь тодорхойлогдох ёстой.

Ашиглагдаж байгаа шугамын дулааны бодит алдагдлыг тооцон, дулаан түгээлтийн горимын тохируулга, дулаан тээвэрлэлтийн эдийн засгийн ба борлуулалтын тооцоог боловсронгуй болгох, техник зохион байгуулалтын болон бусад арга хэмжээг шийдвэрлэх боломж бүрдэнэ.

Тухайн дулааны шугам сүлжээний дулааны алдагдлын ашиглалтын нормыг туршилтын дүнг үндэслэн боловсруулахдаа хэсэг бүрийн алдагдлын хэмжилтийн бодит утгыг дулааны алдагдлын норматив утгатай харьцуулж үздэг. Тухайн сүлжээний норматив дулааны алдагдлыг тодорхойлохдоо “БНбД”-д заагдсан хувийн дулааны алдагдлыг үндэслэн тухайн орон нутгийн гадна агаарын болон сүлжээний усны жилийн дундаж температурын утганд шилжүүлэн бодож олов. 1 дүгээр зурагт дулаан дамжуулах шугамын байршлыг, 1, 2 дугаар хүснэгтүүдэд дулааны төв шугамны дулааны бодит, норматив дулааны алдагдлуудыг тус тус харуулав. [1,2].



1-р зураг. Дулаан дамжуулах шугамын байршлын схем

ДУЛААНЫ ТӨВ ШУГАМЫН ХЭСГҮҮДИЙН ӨГӨХ БУЦАХ ШУГАМЫН ТУРШИЛТЫН ҮЕИЙН ДУЛААНЫ БОДИТ АЛДАГДЛЫГ СҮЛЖЭЭНИЙ АЖИЛЛАГААНЫ ЖИЛИЙН ДУНДАЖ НӨХЦӨЛД (ГАДНА АГААРЫН БОЛОН ӨГӨХ, БУЦАХ УСНЫ ТЕМПЕРАТУР) ШИЛЖҮҮЛЭН ТООЦСОН ДУЛААНЫ БОДИТ АЛДАГДАЛ

1-Р ХҮСНЭГТ

Угсралтын төрөл	**Шугамын урт**	**Жилийн дундаж нөхцөлд тооцсон дулааны алдагдал**	
	L(м)	Qп.н.и	Qо.н.и
Ил	4519.5	859609.6	1305733.3
Далд	14568.9	3106085.7	1325034.0
Нийт	19088.4	3965695.3	2630767.3
Нийлбэр дулааны алдагал, Гкал/ц		6.6	

Qп.н.и-Өгөх шугамын дулааны бодит алдагдал
Qо.н.и-Буцах шугамын дулааны бодит алдагдал

ГАДНА АГААРЫН БОЛОН СҮЛЖЭЭНИЙ УСНЫ ЖИЛИЙН ДУНДАЖ ТЕМПЕРАТУРЫН УТГАНД ШИЛЖҮҮЛЭН ТООЦСОН СҮЛЖЭЭНИЙ НОРМАТИВ ДУЛААНЫ АЛДАГДАЛ

2-Р ХҮСНЭГТ

Угсралтын төрөл	**Шугамын урт**	**Жилийн дундаж нөхцөлд тооцсон дулааны алдагдал**	
	L(м)	Qп.н.и	Qо.н.и
Ил	4519.5	859609.6	919862.8
Далд	14568.9	3106085.7	1676972.8
Нийт	19088.4	3965695.3	2596835.5
Нийлбэр дулааны алдагал, Гкал/ц		4.5	

Qп.н.и-Өгөх шугамын дулааны норматив алдагдал
Qо.н.и-Буцах шугамын дулааны норматив алдагдал

ДЦС-аас К6 цэг хүртэлх Ø800 мм-ийн ил тавигдсан төв магистрал шугам хоолойгоор алдах дулаан алдагдлыг туршилтын болон нормт утгаар тус тус тодорхойлон харьцуулан үзэхэд нийт дулаан алдагдлын 31.1%-ийг эзэлж байна. Энэ нь ил тавигдсан шугам хоолойн дулаалгын хамгаалах давхарга муу, дулаалгын үндсэн материал хоолойноосоо хөндийрсөн, нар салхинд элэгдсэн, газрын гадаргаас өндөр суурилагдсан шугам хоолойн доогуур мал шургах, шөргөөх зэргээр гадны механик гэмтлээс болж дулаалгагүй болсон ба хөөсөн дулаалга бүхий шилэн сүлжмэл тасран унаснаар хотын өнгө үзэмжид нөлөөлөн байгаль орчинг бохирдуулж байгаа нь дулаалгыг сайжруулах үндэслэл болж байна [3, 4].

III. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ТООЦООЛОЛ

Ашиглагдаж байгаа шугамын дулаан алдагдлыг дулаалгын үеийн эсэргүүцлийн утгаар дараах байдлаар тодорхойлно.

Тооцоонд туршилтын үеийн гадна агаарын температур, туршилтаар тодорхойлсон сүлжээний усны зарцуулалт, температурын дундаж утгаас гадна тооцоонд шаардагдах бусад өгөгдлүүдийг дараах байдлаар тооцож авав. Үүнд:

- Халаалтын улирлын температурын график T1/T2 = 130/70°C
- Халааллтын улирлын гадна агаарын тооцоот температур $t'_{\text{х,га}}$ = - 38°C
- Халааллтын улирлын дундаж гадна агаарыи тооцоот температур $t'_{\text{х.га}}$=~8^{0}C
- Хөрсний жилийн дундаж температур $t_{\text{хөрс}}^{\text{жил.дун}}$=3.6°C
- Сүлжээний өгөх шугамын усны жилиин дундаж температур $\tau_1^{\text{жил.дун}}$= 77 C
- Сүлжээний буцах шугамын усны жилийн дундаж температур $\tau_2^{\text{жил.дун}}$= 48.2°C (Сүлжээний өгөх усны температурыг халаалтын улиралд сар бүрийн гадна агаарын дундаж температурт харгалзах 130/70°C-ын температурын графикийн утгаар, халаалтын бус улиралд сүлжээний өгөх усны температурыг 77°C-аар авч дунджилсан утга).
- Туршилтын үеийн хөрсний дундаж температур (11-р сарын дундаж) $t_{\text{хөрс}}^{\text{сар.дун}}$=3.9°C

Ø800мм-ийн 1 м шугамын пенополиуретан болон чулуун хөвөнтэй дулаалгаар алдах дулааны алдагдлын хэмжээг харьцуулж үзье.

ПЕНОПОЛИУРЕТАН БОЛОН ЧУЛУУН ХӨВӨН ДУЛААЛГЫН ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

3-Р ХҮСНЭГТ

Дулаалгын материалын нэр	**Дулаан дамжуулалтын коэффициент Вт/м^{0}С**	**Эзэлхүүний нягт кг/м^3**	**Шаталтын ангилал**
Чулуун хөвөн	0.032	40-80	Шатдаггүй
Пенополиуретан	0.045	40-80	Ш3 дунд зэрэг

Шугам хоолойн ханаар дамжих дулааны хэмжээг дараах томъёогоор тодорхойлно [5]:

$$Q = \frac{Tx1 - Tx2}{\frac{\delta}{\lambda x \cdot Fx}} \qquad (1)$$

Энд: Тх1, Тх2- Хоолойн ханын дотор болон гадна гадаргуугын температур, ºС

δ- Хоолойн ханын зузаан, м

λ-Дулаан нэвтрүүлэлтийн коэффициент, ккал/мºС

F-Дулаан дамжуулах гадаргуугийн талбай, м2
Дундаж гадаргууг дараах томъёогоор тодорхойлно:

$$F_1 = \pi \cdot D_{д1} \cdot L_1$$
$$D_{д1} = (D_1 + D_2)/2 \quad (3) \qquad (2)$$

Энд: Дд1, Дд2- Ган хоолой болон дулаалгын зузааны дунджаар тооцсон диаметр

L1,L2- Хоолойн уртын хэмжээ, м

D1,D2,D3-Хоолойн ханын дотор, гадна ба дулаалгын диаметр, м

Бодолт:

1. 1м урттай пенополиуретан болон чулуун хөвөн дулаалгатай Ø800мм-ийн шугамаар алдах дулааны хэмжээг олъё.

$F=\pi \cdot Дд1 \cdot L2=3.14 \cdot 0.88 \cdot 1=2.7632$ м² (4)

λпенополиуретан=0.045 ккал/м·ц°С [1]

λчулуун хөвөн=0.032 ккал/м·ц°С

δ=0.06м

$Qпенополиуретан=\frac{77-(-8)}{\frac{0.06}{0.045*2.7632}}=175.98$ккал/ц·м=0.000175Гкал/ц·м

$Qчулуунхөвөн=\frac{77-(-8)}{\frac{0.06}{0.032*2.7632}}=125$ккал/ц·м=0.000125 Гкал/ц·м

2. Пенополиуретан болон чулуун хөвөнгийн дулаан алдагдлыг зөрүүг олъё.

Qалд=Qпенополиуретан-Qчулуунхөвөн= 0.000175-0.000125=0.00005Гкал/ц·м

3. 800мм-ийн 4.8 хос км шугамаар алдагдах нийт дулаан алдагдал

$Qнийт=Qалд \cdot Ln \cdot T' \cdot tw'_e t_{хал}^{үргэлж}=0.00005 \cdot 9600 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 8=2764.8$ Гкал (5)

4. Халаалтын улирлын хугацаанд алдах дулааны алдагдлыг мөнгөн дүнгээр илэрхийлбэл

Sнийт=Qнийт·6994төг=2764.8·6994=19337011 (6) төгрөг

5. Түлшний хэмжээг тооцвол

$b\frac{М}{Г}=\frac{143}{\mu}=159\frac{кг}{Гкал} \cdot 2764.8=439$ тн (7)

6. Жилд хэмнэгдэх нүүрс хүчлийн хэмжээ

439·1.16=510тн (8)

БОДОЛТЫН ҮР ДҮН

4-Р ХҮСНЭГТ

№	Дулаалгын материалын нэр	Чулуун хөвөн	Пенополиуретан
1	Дулааны алдагдал, Гкал/ц·м	0.000125	0.000175
2	Дулаан алдагдлын зөрүү, Гкал/ц·м	0.00005	
3	Шугамаар алдагдах нийт дулаан, Гкал	2764.8	
4	Дулааны алдагдлыг мөнгөн дүнгээр илэрхийлбэл, Төгрөг	19,337,011	
5	Түлшний хэмжээг тооцвол, тн	439	
6	Жилд хэмнэгдэх нүүрс хүчлийн хэмжээ, тн	510	

IV. ЦААШИД АВАХ АРГА ХЭМЖЭЭ

Дарханы дулаан дамжуулах Ø800 мм голчтой төв магистрал шугамуудын дулааны алдагдал сүлжээний нийт алдагдлын 31.1%-ийг эзэлж байгаа нь дулаалгыг сайжруулах үндэслэл болж байна.

Иймд шинээр сайжруулах дулаалгын материалаар дулаан алдагдалын коэффициент багатай чулуун хөвөн дулаалгыг сонгох нь тохиромжтой бөгөөд сүүлийн үед чулуун хөвөн дулаалгыг инженерийн шугам сүлжээнд өргөн хэрэглэж байна.

Чулуун хөвөнгийн давуу тал нь:

1. Дулаан тусгаарлах өндөр чадвар
2. Дулаалагдаж буй хийцүүдийг галын аюулаас хамгаалах чанар, материалын шатдаггүй чанар
3. Дуу тусгаарлах өндөр чадвар
4. Гажилтад бага ордог чанар болон хийцүүд дэх материалын хэлбэр тогтвортой байх чадвар
5. Ус бага нэвтрүүлэх чадвар
6. Уур сайн нэвтрүүлэх чадвар

Ашиглахад хялбар чадвар зэрэг чулуун хөвөн дулаан тусгаарлагч материалын шинж чанар нь бусад дулаан тусгаарлагч материалаас давуу үзүүлэлттэй байна.

ДҮГНЭЛТ

Ийнхүү дулаан дамжуулах Ø800мм-ийн төв магистрал ил шугамын дулаалгын чанарыг сайжруулах төслийг хэрэгжүүлснээр жилд

1. “ДДС”ТӨХК-д 2764.8 Гкал дулааны эрчим хүч буюу 19.3 сая төгрөгийн хэмнэлт гарна.
2. “ДДЦС”-д 439 тн нүүрс буюу 70 сая төгрөгийн хэмнэлт гарна.
3. Байгаль орчинд алдагдах CO2-ыг 51 тн -оор бууруулах боломж бүрдэнэ.
4. Шилэн даавуун доторлогоотой учраас механик цохилтонд урагдаж гэмтэхгүй. Нар салхи, бороонд бат бөх, шатдаггүй учир ашиглалтын хугацаа 30 жил олон удаа ашиглах боломжтой.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Б.Намхайням “Дулаан хангамжийн систем” Улаанбаатар, 2015 он

[2] “Дарханы дулааны сүлжээний дулааны алдагдлын туршилт” судалгааны ажлын эцсийн тайлан, Улаанбаатар, 2019 он

[3] Тоног төхөөрөмж ба дамжуулах хоолойн дулаан тусгаарлалт БНбД 41-04-13 УБ 2013он

[4] “НОМАДИК НЬЮ ЭНЕРЖИ” ХХК “Дарханы дулааны сүлжээний дулааны алдагдлын туршилт’, 2019он.

[5] Е.Я.Соколов “Теплофикация и тепловые сети” /учебник/, МЭИ 2006 г.

МОНГОЛ ОРНЫ ХҮЙТЭН СЭРҮҮН УУР АМЬСГАЛД CIGS БОЛОН ЦАХИУРЫН ТӨРЛИЙН НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРИЙН ТУРШИЛТЫН ГҮЙЦЭТГЭЛИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

Доржжаргалын БАТДОРЖ[1], Эрдэнэбатын МӨНХТУЯА[2], Мажигийн ГАНХҮЛЭГ[3]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Шинэ, Сэргээгдэх эрчим хүчний тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: batdorjdorjjargal@gmail.com[1]

Хураангуй: **Монгол орны эрс тэс эх газрын уур амьсгал нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн системийн ажиллагаанд нөлөө үзүүлдэг. Иймээс нөхцөлд ашиглах нарны цахилгаан үүсгүүрийн технологийн сонголт нь системийн бодит үйлдвэрлэл болон бүтээмжийн үзүүлэлтэд чухал ач холбогдолтой юм. Энэхүү судалгаанд нимгэн үеийн CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) болон нэг талст цахиурын (N-type crystalline silicon) нарны цахилгаан үүсгүүрүүдийн ажиллагааг Монгол орны хүйтэн уур амьсгалын нөхцөлд харьцуулан судалсан. Туршилтын системийг Улаанбаатар хотод суурилуулж, 2026 оны 2 дугаар сарын 10–23-ны өдрүүдэд бодит хэмжилтийн өгөгдөл цуглуулсан. Хэмжилтийн явцад нарны цахилгаан үүсгүүрийн гаралтын хүчдэл, гүйдэл, үйлдвэрлэсэн энерги болон орчны температур, чийгшил зэрэг параметрүүдийг бүртгэн авч системийн гүйцэтгэлийг үнэлэв. Судалгааны үр дүнгээс харахад нийт үйлдвэрлэлийн хэмжээгээр цахиурын төрлийн модуль илүү өндөр чадлын гарцтай байсан боловч нэгж талбайд ногдох үйлдвэрлэл болон бүтээмжийн харьцааны үзүүлэлтээр CIGS технологи илүү сайн гүйцэтгэл үзүүлсэн. Энэ нь бага гэрэл болон сарнисан нарны цацраг давамгайлсан нөхцөлд CIGS технологи илүү үр ашигтай ажиллах боломжтойг харуулж байна. Иймээс Монгол орны өвлийн уур амьсгалтай төстэй бүс нутагт фотоцахилгаан системийн технологийн сонголтыг хийхдээ зөвхөн нэрлэсэн чадалд тулгуурлах бус, бодит гүйцэтгэл болон нэгж талбайн үйлдвэрлэлийн үзүүлэлтийг хамтатган үнэлэх шаардлагатай болохыг энэхүү судалгааны үр дүн харуулж байна.**

Түлхүүр үг: CIGS, цахиур, нарны цахилгаан үүсгүүр, АУК, цаг уурын нөхцөл, гаралтын чадал

I. УДИРТГАЛ

Дэлхийн дулаарал, уур амьсгалын өөрчлөлт, мөн эрчим хүчний хэрэглээний тасралтгүй өсөлтөөс шалтгаалан уламжлалт эрчим хүчний эх үүсгүүрээс сэргээгдэх эрчим хүч рүү шилжих нь дэлхий нийтийн хөгжлийн чухал чиг хандлага болоод байна. Сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийн дундаас нарны эрчим хүч нь цэвэр, тогтвортой, өргөн хүртээмжтэй байдгаараа хамгийн хурдацтай хөгжиж буй технологийн нэг юм [1], [2]. Гэсэн хэдий ч нарны цахилгаан үүсгүүрийн гүйцэтгэл нь тухайн бүс нутгийн уур амьсгал, орчны нөхцөлөөс ихээхэн хамааралтай байдаг.

Ялангуяа хүйтэн уур амьсгалтай бүс нутагт, тухайлбал Монгол Улс, Канад, Скандинавын орнууд, Сибирийн бүс нутаг зэрэг газруудад нарны цахилгаан үүсгүүрийн техник эдийн засгийн үзүүлэлтийг сайжруулах асуудал чухал ач холбогдолтой болж байна. Олон улсын эрчим хүчний агентлагийн (IEA) мэдээлснээр 2022 онд дэлхий даяар суурилагдсан нийт нарны цахилгаан хүчин чадлын ойролцоогоор 95% нь цахиурын төрлийн (crystalline silicon) технологи байсан байна [3]. Энэ нь цахиурын төрлийн технологи дэлхийн зах зээлд давамгай байр суурь эзэлж байгааг харуулж байна.

Гэсэн хэдий ч хүйтэн уур амьсгалын нөхцөлд нарны панелийн технологийн сонголттой холбоотой судалгаа харьцангуй хомс байдаг. Одоогийн ихэнх судалгаанууд нь Европ, АНУ, Хятад зэрэг харьцангуй дулаан уур амьсгалтай бүс нутагт хийгдсэн байдаг [4]. Харин Монгол зэрэг маш хүйтэн, хуурай уур амьсгалтай бүс нутагт нарны панелийн технологийн гүйцэтгэлийг харьцуулсан системтэй судалгаа маш хомс байна.

Нөгөө талаас зах зээлд өргөн хэрэглэгддэггүй, бага хүчин чадлын нарны панелүүд (жишээлбэл MECARO VIEWLIGHT 55 Вт) болон өндөр үр ашигтай шинэ үеийн N-type монокристалл технологийн панелүүдийн гүйцэтгэлийг хүйтэн уур амьсгалын нөхцөлд харьцуулсан судалгаа ховор байгаа нь энэхүү судалгааны ач холбогдлыг улам нэмэгдүүлж байна.

Монгол Улс нь нарны эрчим хүчний нөөц ихтэй орнуудын нэг бөгөөд жилдээ дунджаар 2200–3000 цаг нарны тусгалтай байдаг [5]. Гэвч өвлийн улиралд агаарын температур –40 °C хүртэл буурч, цасан бүрхүүл 3 аас 6 сар үргэлжилдэг, нарны тусгалын өнцөг багасах, өдрийн үргэлжлэх хугацаа богиносох зэрэг онцлогтой. Иймээс хүнд нөхцөлд нарны цахилгаан үүсгүүрийн технологийн сонголт нь системийн үр ашиг, найдвартай ажиллагаа болон эдийн засгийн үр өгөөжид шууд нөлөөлөх хүчин зүйл болдог [6].

Иймээс энэхүү судалгааны зорилго нь хүйтэн уур амьсгалын нөхцөлд ашиглагдах боломжтой хоёр төрлийн нарны панелийн технологи болох CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) нимгэн давхаргат технологи болон N-type монокристалл цахиур технологийн техник эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг харьцуулан судлах, мөн Улаанбаатар хотод хийгдсэн бодит туршилтын өгөгдөлд үндэслэн тэдгээрийн гүйцэтгэлийн ялгааг тодорхойлох явдал юм.

II. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ, АРГА ЗҮЙ

1. Туршилтын систем

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд Улаанбаатар хотод байрлах ШУТИС-ийн Т байрны дээвэр дээр CIGS төрлийн нимгэн үеийн бүтэцтэй нарны цахилгаан үүсгүүр болон цахиурын төрлийн N-type монокристалл нарны цахилгаан үүсгүүрийг тус тус зориулалтын метал сууринд 90° ийн босоо байрлалаар суурилуулан судалсан. 1-р зурагт CIGS нарны цахилгаан үүсгүүрийг суурилуулсан хэлбэр харагдаж байна.



1-р зураг. CIGS нимгэн үеийн нарны цахилгаан үүсгүүрийн харагдах байдал

2. Хэмжилтийн үзүүлэлтүүд

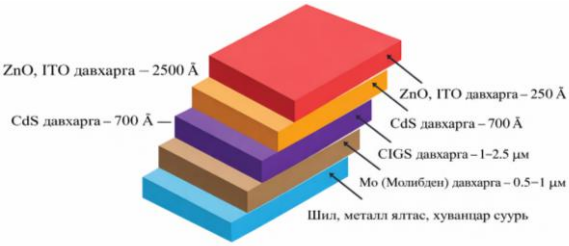
Туршилтын хэмжилтийг Шинжлэх Ухаан Технологийн Их Сургуулийн Т байрны дээвэрт суурилуулсан Mecaro MVL1-55A01 маркийн, CIGS 55 Вт хүчин чадалтай нимгэн үеийн технологи болон Jinko Solar JMK-605N-78HL4-BDV маркийн, 605 Вт чадалтай 2 ширхэг нарны цахилгаан үүсгүүрийг 90° буюу босоо байрлуулж ашигласан. Туршилтад ашигласан нарны цахилгаан үүсгүүрүүдийн ажиллагааны горим, эрчим хүчний үйлдвэрлэл болон орчны нөхцөлийн нөлөөллийн хамаарлыг тодорхойлох зорилгоор 2026 оны 02 дугаар сарын 10-наас 22-ны өдрүүдэд туршилтын хэмжилтүүдийг хийж гүйцэтгэсэн. Хэмжилтийг өдөр бүр 08:00–17:00 цагийн хооронд тогтмол давтамжтайгаар авч, нарны цахилгаан үүсгүүрийн ажиллагаанд нөлөөлөх үндсэн параметрүүдийг тэмдэглэж авсан. Үүнд нарны цахилгаан үүсгүүрийн гаралтын хүчдэл болон гүйдэл, үйлдвэрлэсэн цахилгаан эрчим хүчний хэмжээ зэрэг шаардлагатай техникийн үзүүлэлтүүдийг хэмжиж тэмдэглэсэн.

Мөн туршилтын үр дүнг бодит орчны нөхцөлтэй уялдуулан үнэлэх зорилгоор Улаанбаатар хотын уур амьсгалын орчны үзүүлэлтүүдийг хамтатган судалсан. Үүнд хоногийн температурын өөрчлөлт, өдрийн нарны гийгүүлэлтийн өөрчлөлт, агаарын харьцангуй чийгшил, салхины хурд болон чиглэл, агаарын бохирдлын түвшин зэрэг мэдээллийг сургуулийн дээвэрт суурилуулсан хэмжилтийн станцын жилийн бодит өгөгдөлд тулгуурлан боловсруулсан. Энэхүү өгөгдлийг ашигласнаар системийн гүйцэтгэлд орчны олон хүчин зүйлийн зэрэгцээ нөлөөллийг илүү бодитой үнэлэх боломж бүрдсэн.

Ийнхүү туршилтын хэмжилтийн өгөгдөл болон орчны нөхцөлийн мэдээллийг нэгтгэн боловсруулснаар хүйтэн уур амьсгалын нөхцөлд ажиллаж буй нарны цахилгаан үүсгүүрийн гүйцэтгэлд нөлөөлөх үндсэн хүчин зүйлсийг тодорхойлох, улмаар системийн ажиллагааны онцлогийг үнэлэх боломж бүрдсэн.

III. CIGS БОЛОН ЦАХИУРЫН ТӨРЛИЙН НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРҮҮДИЙН ГОЛ ЯЛГАА

CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) технологи нь нимгэн хальсан үеийн (thin-film) технологид хамаарна. Үүний үндсэн материал болох $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$ нь хувьсах бандаазын хагас дамжуулагч (variable bandgap semiconductor) бөгөөд In/Ga харьцааг өөрчлөх замаар бандаазын зайг 1.0 eV-ээс 1.7 eV хүртэл тохируулж болдог [7]. Энэ нь нарны спектрийн өөр өөр долгионы уртын гэрлийг илүү үр дүнтэй шингээх боломж олгодог.



2-р зураг. Тунгалаг шилэн CIGS төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүрийн ерөнхий бүтэц

Цахиурын технологи нь кристалл бүтэцтэй (crystalline structure) хагас дамжуулагч бөгөөд бандаазын зай нь тогтмол 1.12 eV. N-type монокристалл цахиур нь фосфор (P) хольцтой, электрон агууламж өндөртэй, цэвэр кристалл бүтэцтэй байдаг [8].



3-р зураг. Цахиурын төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүрийн ерөнхий бүтэц

ПАРАМЕТРҮҮДИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

Параметр	CIGS нарны цахилгаан үүсгүүр	Цахиурын төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүр
Vmp (B)	61.2	45.42
Voc (B)	80	50
Imp (A)	0.9	13.32
Isc (A)	1.15	14
АҮК(%)	15	21

МЕХАНИК ШИНЖ ЧАНАРЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ

Шинж чанар	**CIGS нарны цахилгаан үүсгүүр**	**Цахиурын төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүр**
Материал	Зэс, Инди, Галли, Селен ($CuInGaSe_2$)	Цахиур (Si)
Бүтэц	Нимгэн хальсан	Зузаан кристалл
Төрөл	Хөнгөн хольцон плёнк	Кристалл (N-type эсвэл P-type)
Жин [кг/м²]	4	16

CIGS төрлийн нарны хавтан нь бага гэрлийн нөхцөлд харьцангуй өндөр гүйцэтгэлтэй ажилладаг [9] .CIGS технологи нь цасан бүрхүүлийг харьцангуй хурдан хайлуулах чадвартай бөгөөд хажуугийн болон цаснаас ойсон сарнисан гэрлийг илүү үр ашигтай ашиглаж чаддаг [10]. Иймээс үүлэрхэг, гэрэлтэлт багатай орчинд ч гүйцэтгэлээ тогтвортой хадгалдаг онцлогтой.

Харин цахиурын төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүр нь цасан бүрхүүлийг удаан хайлуулж, ихэвчлэн шууд нарны тусгалаас илүү хамааралтай ажилладаг. Гэсэн хэдий ч цасан бүрхүүлгүй, цэлмэг өдөрт цахиурын технологи нь илүү өндөр чадлын гарц үзүүлэх боломжтой байдаг [11].

IV. НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРҮҮДИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ БА ҮР ДҮН

Тухайн туршилт хийгдсэн өдрүүдийн гадна орчны температурын дундаж -9.5° C, орчны чийгшил 55%, нарны цацрагийн эрчим 241.4 Вт/м^2 ба UVI буюу хэт ягаан туяаны хэмжээ 2 байна. Туршилт хийхээр сонгож авсан нарны цахилгаан үүсгүүрүүд нь 90° аар босоо байрласан учир BIPV буюу барилгын хийцэд нэгтгэх нарны цахилгаан үүсгүүрийн тооцооллыг сонгож ашиглалаа. BIPV хавтангийн эрчим хүчний үйлдвэрлэл нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн технологийн төрөл, суурилуулалсан байршил, нарны тусгалын өнцөг, модулийн ажлын температур, сүлжээний холболтын горим, нарны цацрагийн хэмжээ, системийн алдагдал зэрэг олон хүчин зүйлээс хамааран өөрчлөгддөг. Энэхүү бүлэгт BIPV хавтангийн үйлдвэрлэлийг үнэлэхэд түгээмэл хэрэглэгддэг үндсэн үзүүлэлтүүд болон тооцооны томьёонуудыг [12], [13] харуулаа.

A. Энергийн үйлдвэрлэл (Energy Yield)

Нарны цахилгаан үүсгүүрээс тодорхой хугацаанд гаргаж буй гүйдлийн энергийн хэмжээг илэрхийлнэ.

$$E_{PV}=V \cdot I \cdot t \quad (1)$$

Энд: E_{PV} – үйлдвэрлэх энерги, V - хүчдэл, I - гүйдэл, t- хугацаа

B. Стандарт гаралт (Reference Yield, Y_R)

Стандарт гаралт нь PV төхөөрөмж дээр ирж буй нарны нийлбэр цацрагийг стандарт нөхцөл дэх (AM1.5, 1000 Вт/м², 25°C) нарны цацрагт харьцуулсан үзүүлэлт юм.

$$Y_R=G/G_{STC} \quad (2)$$

Энд: G- PV модуль дээр туссан нийлбэр цацраг, G_{STC}- стандарт нөхцөл дэхь цацраг.

C. Гаралтын фактор (Yield Factor, Y_F)

Гаралтын фактор нь системийн AC талын бодит үйлдвэрлэсэн энерги болон STC нөхцөл дэх суурилагдсан хүчин чадлын харьцаа юм.

$$Y_F=E_{PV,AC}/P_{PV,STC} \quad (3)$$

Энд: $P_{PV,STC}$- системийн суурилагдсан хүчин чадал

D. Бүтээмжийн харьцаа (Performance Ratio, PR)

Бүтээмжийн харьцаа (PR) нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн системийн бодит гүйцэтгэлийг стандарт нөхцөлтэй харьцуулан үнэлэх үзүүлэлт бөгөөд IEC 61724 стандартад заасан аргачлалын дагуу тооцогддог. Энэхүү үзүүлэлт нь системийн элэгдэл, дотоод алдагдал, хэт халалт, сүүдэрлэлтийн нөлөө зэрэг хүчин зүйлсийг үнэлэхэд чухал ач холбогдолтой юм.

$$PR=Y_F/Y_R=(E_{PV,AC} \cdot G_{STC})/(P_{max} \cdot G) \times 100 \quad (4)$$

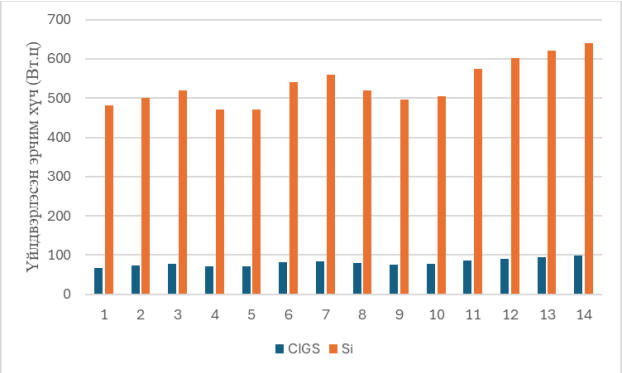
Энд: P_{max}- PV модулийн суурилагдсан хамгийн их чадал, G_{STC}- стандарт нөхцөл дэхь цацраг.

НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРИЙН ХЭМЖИЛТИЙН УТГА

3-Р ХҮСНЭГТ

Огноо	**E_{CIGS} (Вт.ц)**	**E_{Si} (Вт.ц)**	**Гадна агаарын дундаж температур (°C)**	**Гадна орчны чийгшил (%)**
2026.02.10	68.2	483.5	-11.9	67.5
2026.02.11	73.4	523.7	-10.2	59.5
2026.02.12	77.2	530.3	-6.9	58
2026.02.13	71	486.8	-4.5	68
2026.02.14	71.9	484.2	-14.4	52
2026.02.15	82.4	540.6	-10.1	53
2026.02.16	85.1	558.4	-13.5	50
2026.02.17	80.6	521.1	-15.3	46.5
2026.02.18	76.5	496.7	-18	47.5
2026.02.19	78	505.6	-17.2	52
2026.02.20	87.3	572.3	-12.6	58
2026.02.21	91.1	609.8	-9.8	54.5
2026.02.22	95.5	620.2	–1.3	58
2026.02.23	98.7	642.9	–1.4	58

Өдрийн дундаж эрчим хүч үйлдвэрлэлийн хэмжээ CIGS нарны цахилгаан үүсгүүрийн хувьд 95.3 Вт байгаа бол цахиурын төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүрийн хувьд 571.1 Вт байна.



4-р зураг. Нарны цахилгаан үүсгүүрийн эрчим хүчний үйлдвэрлэл

Туршилтын хугацаанд хэмжигдсэн өгөгдлөөс харахад цахиурын төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүр нь өндөр нэрлэсэн чадлын улмаас нийт үйлдвэрлэлийн хэмжээгээр илүү их энерги гаргасан байна. Харин нэгж талбайд ногдох үйлдвэрлэлийн хэмжээгээр харьцуулахад CIGS модуль илүү өндөр үзүүлэлттэй байв.

Судалгааны дүнгээр CIGS модуль нь өдөрт дунджаар 244 Вт.ц/м² орчим энерги үйлдвэрлэсэн бол цахиурын төрлийн модуль 204 Вт.ц/м² орчим үйлдвэрлэсэн байна. Энэ нь сарнисан нарны цацраг давамгайлсан нөхцөлд CIGS технологи илүү үр ашигтай ажиллаж байгааг харуулж байна.

Мөн системийн гүйцэтгэлийг илэрхийлэх бүтээмжийн харьцаагаар CIGS модуль ойролцоогоор 72–74% PR үзүүлсэн бол цахиурын төрлийн модуль 65% орчим PR үзүүлсэн байна.

Хэдийгээр цахиурын төрлийн хавтан нь өндөр нэрлэсэн чадлын улмаас нийт үйлдвэрллээр давуу үзүүлэлттэй боловч нэгж талбайд ногдох үйлдвэрлэлийг харьцуулахад CIGS хавтан өндөр буюу 20 хувиар илүү үзүүлэлттэй байна. Энэ нь CIGS технологи нь бага гэрэл, сарнисан цацраг давамгайлсан өвлийн нөхцөлд илүү үр ашигтай ажилладгийг баталж байна.

CIGS БОЛОН ЦАХИУРЫН ТӨРЛИЙН ХАВТАНГИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ҮЙЛДВЭРЛЭЛИЙН ГҮЙЦЭТГЭЛ

4-Р ХҮСНЭГТ

Огноо	CIGS	PV_{Si}	Y_R	CIGS	PV_{Si}
	Y_F			PR	
2026.02.10	1.24	1.18	1.73	71.7	68.2
2026.02.11	1.33	1.26	1.86	71.5	67.8
2026.02.12	1.4	1.32	1.95	71.8	67.7
2026.02.13	1.29	1.17	1.8	71.7	65
2026.02.14	1.29	1.17	1.8	71.7	65
2026.02.15	1.49	1.36	2.04	73	66.7
2026.02.16	1.55	1.41	2.12	73.1	66.5
2026.02.17	1.45	1.32	2	72.5	66
2026.02.18	1.38	1.26	1.89	73	66.7
2026.02.19	1.42	1.29	1.96	72.5	65.8
2026.02.20	1.58	1.44	2.19	72.1	65.8
2026.02.21	1.65	1.5	2.29	72.1	65.5
2026.02.22	1.73	1.57	2.4	72.1	65.4
2026.02.23	1.78	1.62	2.48	71.8	65.3

Тус харьцуулалтаас хархад бүтээмжийн харьцаагаар CIGS модуль нь бага гэрэл, хүйтэн нөхцөлд илүү өндөр PR үзүүлж, бодит гүйцэтгэлээр цахиурын төрлийн хавтангаас давуу байгааг харуулж байна.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаанд Монгол орны өвлийн улирлын уур амьсгалын нөхцөлд CIGS нимгэн хальсан болон нэг талст цахиурын фотоцахилгаан модулиудын ажиллагааг туршилтын хэмжилтийн өгөгдөлд тулгуурлан харьцуулан үнэлэв. Хэмжилтийн үр дүнгээс харахад нэг талст цахиурын модуль нь нийт үйлдвэрлэсэн цахилгаан энергийн хэмжээгээр илүү өндөр үзүүлэлттэй байсан боловч системийн бодит ажиллагааг илэрхийлэх гүйцэтгэлийн зарим үзүүлэлтүүдийн хувьд CIGS технологи илүү тогтвортой болон харьцангуй давуу шинж чанар илэрхийлсэн байна. Ялангуяа нэгж талбайд ногдох энергийн үйлдвэрлэл болон системийн бүтээмжийн коэффициентийн хувьд CIGS модуль илүү өндөр үзүүлэлт үзүүлсэн нь бага гэрэлтүүлэг болон сарнисан нарны цацраг давамгайлсан нөхцөлд нимгэн хальсан технологи үр ашигтай ажиллах боломжтойг харуулж байна. Монгол орны өвлийн улиралд нарны өндрийн өнцөг бага, атмосферийн сарнил их, мөн температурын нөхцөл эрс ялгаатай байдаг нь фотоцахилгаан системийн бодит гүйцэтгэлд шууд нөлөөлдөг. Иймээс хүйтэн уур амьсгалтай бүс нутагт фотоцахилгаан системийн технологийг сонгохдоо зөвхөн модулийн нэрлэсэн чадалд тулгуурлах нь хангалтгүй бөгөөд тухайн орчны бодит нөхцөлд хэмжигдсэн гүйцэтгэлийн үзүүлэлтүүд, нэгж талбайд ногдох энергийн үйлдвэрлэл болон системийн бүтээмжийн коэффициентийг хамтад нь авч үзэх шаардлагатай байна. Судалгааны үр дүн нь бага нарны цацраг болон сарнисан гэрэл давамгайлсан нөхцөлд CIGS технологи тодорхой давуу тал үзүүлэх боломжтойг харуулж байна.

Цаашдын судалгаанд улирлын болон жилийн турш дахь ажиллагааны өөрчлөлтийг илүү нарийвчлалтай үнэлэхийн тулд урт хугацааны хэмжилтийн өгөгдөлд суурилсан шинжилгээ хийх, мөн температур, цасны тусгал, сарнисан болон шууд цацрагийн харьцаа зэрэг орчны хүчин зүйлсийн нөлөөллийг илүү гүнзгий судлах шаардлагатай байна. Ийм төрлийн судалгаа нь хүйтэн уур амьсгалтай бүс нутгуудад фотоцахилгаан системийн

технологийн сонголт болон системийн оновчтой төлөвлөлтийг шинжлэх ухааны үндэслэлтэйгээр тодорхойлоход чухал ач холбогдолтой юм. Эцэст нь дүгнэхэд, бага гэрэл давамгайлсан, хүйтэн бүс нутагт CIGS технологи нь илүү тохиромжтой сонголт болох боломжтой бөгөөд харин жилийн нийт эрчим хүчний үйлдвэрлэлийг нэмэгдүүлэх зорилготой системд цахиурын төрлийн нарны цахилгаан үүсгүүрийг ашиглах нь илүү үр ашигтай байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] "International Energy Agency (IEA)," 2023. https://www.iea.org/.

[2] "National Renewable Energy Laboratory (NREL)NREL," Photovoltaic Research Overview, 201.Available: https://www.bing.com/

[3] "International Energy Agency," Renewables , 2023. Available: https://www.bing.com.

[4] H. W. Y. &. L. X. Liu, Performance evaluation of solar PV systems under cold climate conditions, 2021.

[5] Батболд, Энхбаяр, Эрдэнэбаяр. Монголын нарны эрчим хүчний нөөц, газарзүйн болон цаг уурын нөхцөлүүдийг үнэлсэн судалгаа, 2020.

[6] Kazem, Performance analysis of PV systems under different climatic conditions. Energy Conversion and Management, 2014.

[7] Repins, 19.9% efficient ZnO/CdS/CuInGaSe$_2$ solar cell with 81.2% fill factor. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2008.

[8] M. A. Green, Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications (3rd ed.). Prentice Hall., 2022.

[9] Green, Performance characteristics of thin-film CIGS solar cells under low irradiance. Progress in Photovoltaics: Research and Applications,, 2015.

[10] Y. K. J. &. L. H. Choi, Performance analysis of CIGS solar panels under snowy conditions. Solar Energy,, 2019.

[11] A. S. T. &. O. M. Skoczek, Photovoltaic module performance in cold and snowy climates. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2010.

[12] https://www.devex.com/.

[13] Sopian, Solar photovoltaic performance in cold and snowy climates: Review and analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.

[14] "International Energy Agency (IEA)," 2023. https://www.iea.org/.

K-MEANS++ БҮЛЭГЛЭЛ БА EELM АЛГОРИТМД СУУРИЛСАН НАРНЫ ЦАХИЛГААН СТАНЦЫН ГАРАЛТЫН ЧАДЛЫН УРЬДЧИЛСАН ТААМАГЛАЛЫН АРГА

Мөнхтогтохын ВАНЧИН[1], Баянмөнхийн БУЛГАНМАА[2], Пүрэвжавын ЭРХЭМТӨР[3]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны инженерийн тэнхим
*(*ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль , Цахилгааны инженерийн тэнхим , Цахилгааны инженер)

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: erkhemtur@must.edu.mn[3]

Хураангуй: ***Сэргээгдэх эрчим хүчний хөгжлийн хүрээнд фотоволтайк цахилгаан үйлдвэрлэл нь ногоон эрчим хүчний чухал эх үүсвэр болж байгаа боловч цаг агаарын тодорхой бус байдлаас шалтгаалан чадлын гарц ихээхэн хэлбэлздэг. Энэхүү судалгаанд бодит цаг уурын болон фотоволтайк чадлын өгөгдөлд тулгуурлан онцлог шинжийн сонголт, K-means++ бүлэглэл болон машин сургалтыг хослуулсан таамаглалын арга боловсруулсан. Пирсон корреляцийн коэффициентыг ашиглан гол нөлөөлөгч хүчин зүйлсийг тодорхойлж, улмаар нэг далд давхаргатай хэт сургалтын машин (EELM)-д суурилсан загварыг байгуулан сургалт, туршилтыг хийсэн. Туршилтын үр дүн нь санал болгосон арга нь фотоволтайк чадлын таамаглалын нарийвчлалыг үр дүнтэй сайжруулж байгааг харуулсан.***

Түлхүүр үг: фотоволтайк цахилгаан үйлдвэрлэл, Пирсоны корреляцийн коэффициент, K-means++ бүлэглэл, чадлын урьдчилсан таамаглал

I. ОРШИЛ

Монгол Улс 2030 он гэхэд цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний 30 хувийг сэргээгдэх эх үүсвэрээс хангах зорилт тавьсан. Нарны эрчим хүч нь өндөр нарны цацраг болон өргөн газар нутгийн нөөцөөс шалтгаалан Монгол орны хувьд чухал хөгжлийн боломжтой эх үүсвэр юм. Гэвч цаг агаарын хэлбэлзэл нь фотоволтайк (PV) системийн гаралтыг тогтворгүй болгодог тул өндөр нарийвчлалтай чадлын таамаглал шаардлагатай. Иймээс энэхүү судалгаанд *Alice Springs DKA Solar Centre*-ийн өгөгдлийг ашиглан **K-means++** бүлэглэл болон Extreme Learning Machine (ELM) алгоритмд суурилсан PV чадлын хөнгөн жинтэй таамаглалын загвар боловсруулж, түүний гүйцэтгэлийг үнэлэн Монгол орны нөхцөлд ашиглах боломжийг авч үзэв.

II. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ, ӨГӨГДӨЛ

1. Судалгааны объект

Энэхүү судалгааны объект нь Австрали улсын Alice Springs хотод байрлах DKA Solar Centre-ийн 15 кВт суурилагдсан хүчин чадалтай фотоволтайк (PV) систем болно. Тус төв нь PV системийн ажиллагаа болон цаг уурын үзүүлэлтүүдийг бодит цагийн горимоор олон жилийн турш өндөр давтамжтай бүртгэн нийтэлдэг, олон улсын судалгаанд өргөн ашиглагддаг нээлттэй мэдээллийн сан бүхий туршилтын бааз юм. Судалгаанд 2025 оны 1 дүгээр сарын 1-нээс 12 дугаар сарын 31 хүртэлх нэг жилийн хугацааны өгөгдлийг ашигласан. PV системийн ажиллагааны болон цаг уурын хэмжилтүүд 5 минут тутмын интервалтайгаар бүртгэгдсэн бөгөөд энэхүү өндөр давтамж нь нарны эрчим хүчний богино хугацааны динамик өөрчлөлтийг нарийвчлалтай тусгах боломжийг бүрдүүлдэг.

Системийн үндсэн техникийн үзүүлэлтүүд:

- Суурилагдсан хүчин чадал: 15 (кВт)
- Модуль төрөл**:** Олон кристалл цахиурт PV модуль
- Суурилуулалтын хэлбэр: Нэг чиглэлийн тогтмол өнцөгтэй, газар дээр суурилуулсан бүтэц
- Нэрлэсэн чадлын хэлбэлзэл: 12.8–13.2 (кВт)
- Хэмжилтийн интервал: 5 минут
- Судалгааны хугацаа: 2025.01.01 – 2025.12.31.

Тус PV систем нь идэвхтэй чадлын гаралтыг (кВт) бодит цагт бүртгэж, цаг уурын хэмжилтийн төхөөрөмжтэй синхрон холбоотойгоор ажилладаг. Энэ нь PV гаралт болон орчны хүчин зүйлсийн хоорондын хамаарлыг нэгэн зэрэг судлах боломжийг олгодог.

2. Ашигласан өгөгдлийн бүтэц

Судалгаанд хоёр төрлийн өгөгдлийн багц ашигласан.

1. PV системийн гаралтын өгөгдөл

15 кВт хүчин чадалтай нарны массивын идэвхтэй чадлын гаралтын хэмжилтүүд багтсан. Эдгээр өгөгдөл нь 5 минут тутам бүртгэгдсэн бөгөөд богино хугацаанд үүсэх хэлбэлзлийг баримтжуулахад хангалттай нарийвчлалтай.

2. Цаг уурын өгөгдөл

PV гаралтад нөлөөлөх үндсэн орчны хувьсагчид: Орчны температур (°C), Харьцангуй чийгшил (%), Нийт хэвтээ цацраг (GHI, W/m²), Сарнисан хэвтээ цацраг (DHI, W/m²). Эдгээр хэмжигдэхүүнүүд нь PV системийн гаралтын динамик өөрчлөлтийг

тодорхойлогч суурь хүчин зүйлс бөгөөд таамаглалын загварт ашиглагдах үндсэн оролтын хувьсагчдыг бүрдүүлдэг. Судалгаанд ашигласан бүх цаг уурын өгөгдөл нь тухайн бүсийн албан ёсны цаг уурын станцын хэмжилттэй нийцсэн, найдвартай эх сурвалжаас авсан болно.

III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Энэхүү судалгаанд нарны цахилгаан станцын гаралтын чадлыг өндөр нарийвчлалтай таамаглах зорилгоор өгөгдөл боловсруулалт, онцлог хувьсагчийн сонголт, бүлэглэх болон машин сургалтын аргуудыг үе шаттайгаар хэрэгжүүлсэн. Судалгааны ерөнхий бүтэц нь дараах дөрвөн үндсэн үе шатаас бүрдэнэ: (1) өгөгдлийн урьдчилсан боловсруулалт, (2) корреляцийн шинжилгээ ба онцлог сонголт, (3) K-means++бүлэглэл, (4) ансамбль ELM таамаглалын загвар.

1. Урьдчилсан боловсруулалт

Өгөгдөлд агуулагдах дутуу утга, сөрөг чадлын утга болон гэнэтийн огцом хэлбэлзлийг илрүүлж, дараах аргаар цөөрүүлж эмхэтгэсэн: Хэт утгуудыг физикийн боломжит хязгаараар шалган хасав, Дутуу утгыг ижил цагийн өмнөх ба дараах өдрүүдийн дунджаар нөхөв. Бүх хувьсагчийг Z-score стандартчиллаар хэмжээсгүй болгосон

Стандартчиллын томьёо:

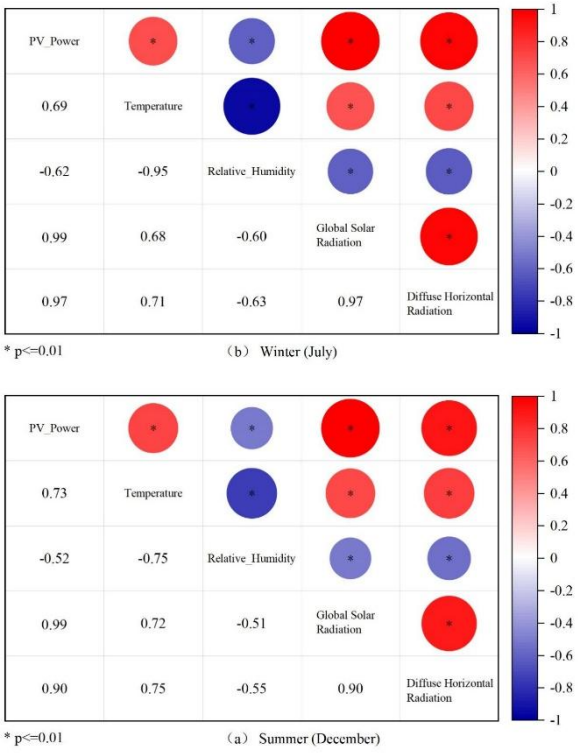
$$Z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \tag{1}$$

2. Онцлог хувьсагчийн сонголт (Пирсоны корреляцийн шинжилгээ)

Цаг уурын хувьсагч бүрийн нарны чадалтай хамаарлыг Пирсоны корреляцийн коэффициентоор үнэлэв. Корреляцийн коэффициентыг дараах байдлаар тооцоолно:

$$P_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})\cdot(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{2}$$

Ерөнхийдөө Пирсоны корреляцийн коэффициентын абсолют утга |P_xy|-ийн хэмжээнээс хамааран дараах байдлаар ангилна: $|P_{xy}| \geq 0.8$ бол хоёр хувьсагч өндөр хамааралтай гэж үзнэ; $0.5 \leq |P_{xy}| < 0.8$ бол дунд зэргийн хамааралтай. 2025 оны 7 болон 12 дугаар сарын цаг уурын өгөгдөл (агаарын температур, харьцангуй чийгшил, дэлхийн нийт хэвтээ нарны цацраг – GHI, сарнисан хэвтээ нарны цацраг – DHI) болон фотоцахилгаан (PV) эрчим хүчний үйлдвэрлэлийн чадлын өгөгдлийн хооронд Пирсоны хамаарлын коэффициент ашиглан корреляцийн шинжилгээ хийсэн. 1 дүгээр зургаас харахад, зуны улирал (12-р сар) болон өвлийн улирал (7-р сар)-д харьцангуй чийгшил нь фотоцахилгаан чадалтай сөрөг хамааралтай байна. Харин температур, дэлхийн нийт хэвтээ цацраг (GHI) болон сарнисан хэвтээ цацраг (DHI) нь фотоцахилгаан чадалтай эерэг хамааралтай байна. Үүнээс GHI болон DHI-ийн Пирсоны хамаарлын коэффициентын абсолют утга 0.9-өөс их байгаа нь маш хүчтэй хамааралтайг илтгэнэ. Харин харьцангуй чийгшил болон температур нь дунд зэргийн хамааралд хамаарч байна.



1- р зураг. Фотоцахилгаан гаралтад нөлөөлөх цаг уурын үндсэн хүчин зүйлсийн Pearson корреляцийн коэффициент

1-р хүснэгтээс харахад фотоцахилгаан системийн цахилгаан үйлдвэрлэл нь олон төрлийн цаг уурын хүчин зүйлсийн хам нөлөөн дор явагддаг бөгөөд цаг агаарын өөр өөр нөхцөлд тухайн хүчин зүйлсийн нөлөөллийн зэрэг харилцан адилгүй байна. Нарлаг, бага зэргийн бороотой болон аадар бороотой өдрүүдэд дэлхийн нийт хэвтээ нарны цацраг (GHI) нь фотоцахилгаан гаралттай маш хүчтэй эерэг хамааралтай (хамаарлын коэффициент 0.99) байгаа нь фотоцахилгаан үйлдвэрлэлийн үндсэн нөлөөлөгч хүчин зүйл болохыг харуулж байна. Сарнисан хэвтээ нарны цацраг (DHI) нь нарлаг болон бага зэргийн бороотой өдрүүдэд мөн хүчтэй эерэг хамааралтай (0.96 ба 0.95) боловч аадар бороотой үед харьцангуй буурч (0.69), сарнисан цацраг цаг агаарын нөхцөлд илүү мэдрэмтгий байгааг илэрхийлж байна. Агаарын температур болон харьцангуй чийгшлийн хамаарал нь боройны хэмжээ нэмэгдэх тусам буурах хандлагатай бөгөөд энэ нь цаг агаарын таагүй нөхцөлд температур болон чийгшлийн фотоцахилгаан гаралтад үзүүлэх нөлөө сулрахыг илтгэнэ.

3. K-means++ алгоритмыг ашиглан фотоцахилгаан "(PV)" чадлын муруйг кластерчлах шинжилгээ

PV чадал нь цаг уурын параметрүүд болон тухайн үеийн цаг агаарын төлөвөөс ихээхэн хамаардаг. Уламжлалт цаг агаарын ангилал нь PV чадлын бодит өөрчлөлтийг бүрэн илэрхийлж чаддаггүй тул энэхүү судалгаанд чадлын хугацааны дараалллын онцлогт тулгуурласан K-means++ бүлэглэлийн аргыг санал болгож байна. Судалгаанд төлөөлөх статистик үзүүлэлтүүдийг (хамгийн их утга, дундаж, дисперс, хазайлт гэх мэт) онцлог вектор болгон сонгож, Z-score стандартчиллаар хэмжээсний ялгааг арилгасан. Дараа нь стандартчилсан өгөгдөл дээр K-means++ алгоритмыг ашиглан хамгийн оновчтой кластер бүтцийг тодорхойлж, үр дүнг цаг уурын байгууллагын ерөнхий ангилалтай харьцуулан баталгаажуулсан. Өгөгдлийн хувьд 2025 оны 7-р сарын 15–18 (өвөл) болон 12-р сарын 20–23 (зун)-ны нийт 8 хоногийн PV станцын бодит ажиллагааны мэдээллийг ашигласан. PV чадал болон нарны цацрагийн өгөгдлийг 5 минут тутамд түүвэрлэн авсан.

K-means++ бүлэглэх зарчим

K-means++ бүлэглэх алгоритм нь уламжлалт K-means алгоритмын сайжруулсан хувилбар бөгөөд хяналтгүй сургалтын аргын нэг төрөл юм. Уламжлалт K-means алгоритм нь хэрэгжүүлэхэд энгийн, тооцооллын үр ашигтай боловч эхний кластерын төвийг санамсаргүй сонгодог тул үр дүн тогтворгүй, локал минимумд гацах магадлалтай. K-means++ нь энэ асуудлыг шийдэхийн тулд эхний төвүүдийг сонгох шатанд магадлалд суурилсан стратеги нэвтрүүлсэн. Ингэснээр эхний төвүүдийн тархалт сайжирч, бүлэглэлийн чанар болон хурд нэмэгддэг. Анхны төвүүд тодорхойлогдсоны дараа алгоритм нь уламжлалт K-means-ийн адил "өгөгдөл хуваарилах – төв шинэчлэх" давталтыг төвүүд тогтворжих хүртэл гүйцэтгэнэ. Үр дүнд нь гарсан бүлэглэх нь нягтрал, ялгаралтын хувьд уламжлалт аргаар гарсан үр дүнгээс илүү сайн бөгөөд өндөр хэмжээсний болон жигд бус тархалттай өгөгдөлд илүү тохиромжтой. Иймээс K-means++ алгоритм нь фотоцахилгаан чадлын горимын таних болон цаг агаарын ангиллын судалгаанд найдвартай арга зүйн үндэс болдог.

K-means++ бүлэглэлийн хэрэгжилтийн явц

Энэхүү судалгаанд тухайн өдрийн цахилгаан үйлдвэрлэлийн чадлын онцлогийг бүрэн илэрхийлэхийн тулд хугацааны дараалллын өгөгдлийн статистик шинжилгээнд үндэслэн гурван төрлийн нийт найман статистик үзүүлэлтийг K-means++ алгоритмын оролтын онцлог болгон ашигласан. Тухайн үзүүлэлтүүдийг дараах байдлаар тодорхойлно:

P_{max} (хамгийн их утга):

$$P_{\max} = \max\{P_i, i \in N\} \tag{3}$$

Энд i нь тухайн өдрийн хугацааны индексийг илэрхийлнэ. K-means++ алгоритм нь өгөгдлийг нийт K кластер болгон хуваана. Энэ нь N=5 гэж үзвэл нийт 5 бүлэг (кластер) үүсгэнэ гэсэн үг юм.

P_{sum} (нийт чадал):

$$P_{sum} = \sum_{i=1}^{N} P_i \tag{4}$$

P_{avg} (дундаж чадал):

$$P_{avg} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} P_i \tag{5}$$

a^2 (дисперс):

$$a^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - P_{avg}\right)^2 \tag{6}$$

a (стандарт хазайлт):

$$a = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - P_{avg}\right)^2} \tag{7}$$

cv (хувьсах коэффициент):

$$cv = \frac{a}{P_{avg}} \tag{8}$$

Sk (хазайлт):

$$Sk = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\left(\frac{P_i - P_{avg}}{a}\right)^3\right] \tag{9}$$

Kur (хазайлт):

$$Kur = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\left(\frac{P_i - P_{avg}}{a}\right)^4\right] \tag{10}$$

Бүлэглэлийн тоо K-ийг тодорхойлох ба үнэлэх

Хамгийн оновчтой кластер бүтцийг тодорхойлохын тулд Силуэттын коэффициент болон CH индекс гэсэн хоёр шалгуурыг ашиглан K=2-оос 9 хүртэл үнэлсэн. Силуэттын коэффициент нь −1-ээс 1-ийн хооронд хэлбэлзэх ба утга өндөр байх тусам бүлэглэлийн үр дүн сайн гэж үзнэ. CH индексийн хувьд утга өндөр байх тусам кластеруудын ялгаа тод, кластер доторх өгөгдөл илүү нягт төвлөрсөн байгааг илэрхийлнэ. Үр дүнг 2, 3-р зургуудад харуулав.

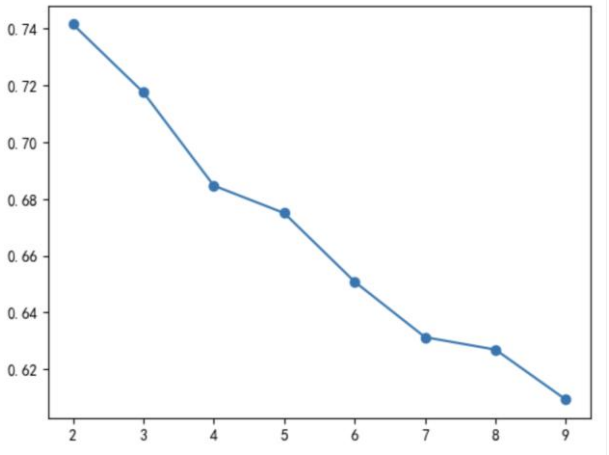
Оновчтой кластерын тоог тодорхойлох

Силуэттын коэффициент болон CH индексийг ашиглан өөр өөр K утгад кластерын үр дүнг үнэлсэн. 2-р зургаас харахад K=2 үед Силуэттын

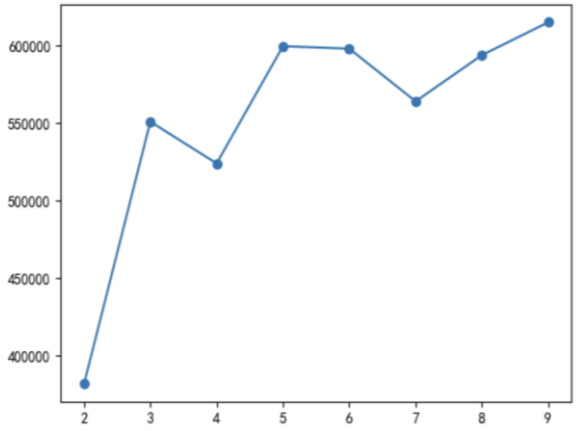
коэффициент хамгийн их (ойролцоогоор 0.74) утгад хүрч, кластер доторх төстэй байдал өндөр, кластер хоорондын ялгарал тодорхой байгааг илтгэнэ. 3-р зургаас харахад CH индекс K=5, 6, 9 үед харьцангуй өндөр гарсан ба K=6 үед локал максимумд хүрсэн.

(3) Бүлэглэх хэлбэр ба улирал, цаг уурын хамаарал

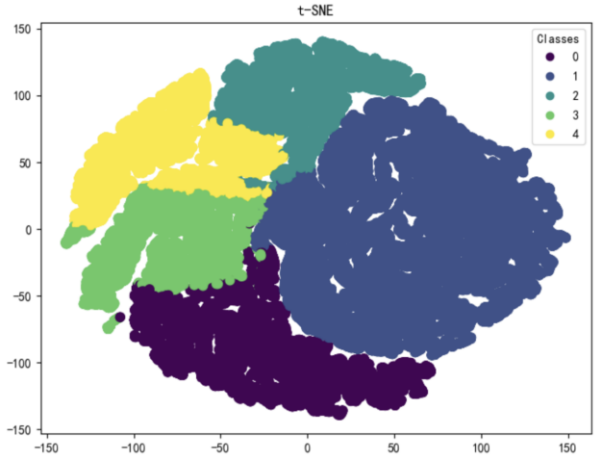
Шинжилгээний үр дүнгээс бүлэглэх нь улирал болон цаг уурын нөхцөлтэй нягт уялдаатай болох нь тогтоогдсон. Зуны улиралд (12 сар) GHI өндөр, өдрийн хугацаа урт тул чадлын муруй өндөр оргилтой, өргөн хонх хэлбэртэй, гаралт тогтвортой байна. Харин өвлийн улиралд (7 сар) GHI бага, сарнисан цацрагийн эзлэх хувь их, өдрийн хугацаа богино тул чадлын муруй нам, агшсан хэлбэртэй болж, өглөө оройн бага цацраг мэдрэмтгий болдог. Чийгшил болон сарнисан цацрагийн хэлбэлзэл ихсэх үед чадлын муруй олон оргилтой, тогтворгүй хэлбэртэй болдог. Иймээс K-means++ бүлэглэлийн үр дүнг дараах цаг уурын төлөвтэй уялдуулж болно: 1-р ангилал – цэлмэг, тогтвортой өдөр, 2–3-р ангилал – үүлэрхэг, үүлний өөрчлөлт ихтэй өдөр, 4–5-р ангилал – бороотой эсвэл өвлийн бага цацрагтай өдөр. Судалгааны үр дүнд K=2 болон K=6 кластер бүтцийг цаашдын загварчлал, таамаглалын судалгаанд ашиглах нь PV чадлын таамаглалын нарийвчлал, хэрэглээний ач холбогдлыг нэмэгдүүлэх боломжтой гэж үзэв.



2-р зураг Бүлэглэлийн тооноос хамаарах Силуэттын коэффициентын өөрчлөлтийн график



3-р зураг Бүлэглэлийн тооноос хамаарах Calinski–Harabasz (CH) индексийн өөрчлөлтийн график



4-р зураг X. t-SNE-д суурилсан K-means++ бүлэглэлийн 2D дүрслэл

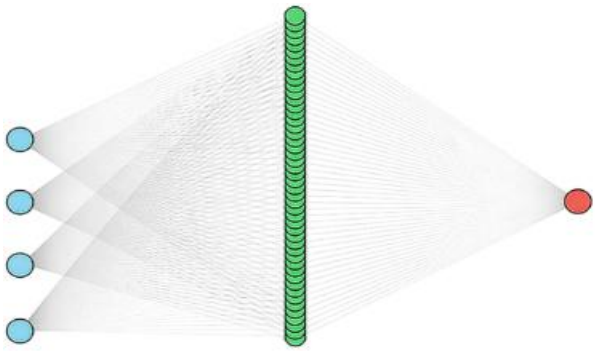
АНСАМБЛЬ ХЭТ СУРГАЛТЫН МАШИНД (EELM) СУУРИЛСАН ЧАДЛЫН ТААМАГЛАЛЫН ЗАГВАР

Түргэвчилсэн сургалтын алгоритм (ELM)-ийн үндсэн онол

Түргэвчилсэн сургалтын алгоритм (Extreme Learning Machine, ELM) нь нэг далд давхаргатай урсгалт мэдрэлийн сүлжээний тусгай хэлбэр бөгөөд энгийн бүтэцтэй, сургалтын хурд өндөр, шугаман бус хамаарлыг сайн илэрхийлэх чадвартай тул хугацааны дарааллын таамаглалын судалгаанд өргөн хэрэглэгддэг. ELM нь уламжлалт (BP) алгоритмаас ялгаатай нь сүлжээний жинг тооцоолоход back propagation шаардлагагүй тул тооцооллын ачаалал мэдэгдэхүйц багасдаг. BP алгоритм нь удаан хурдаар нийлэх, локал минимумд гацах магадлалтай, хэт сургалт үүсэх эрсдэлтэй. ELM алгоритмд оролтын жингийн матриц болон далд давхаргын хазайлтын утгууд санамсаргүй байдлаар үүсгэгдэж өөрчлөгддөггүй бөгөөд зөвхөн гаралтын жингийн матрицыг тооцоолох шаардлагатай. Иймээс ELM нь сургалтын хурд өндөр, тохируулах

гиперпараметрийн тоо цөөн тул илүү оновчтой загварыг хурдан байгуулах боломжтой.

Загвар байгуулах ба бүтцийн зохион байгуулалт



5-р зураг ELM загварын бүтцийн зохион байгуулалтын бүдүүвч."

Фотоцахилгаан системийн бодит чадлын гаралтыг нарийвчлалтай таамаглах зорилгоор энэхүү судалгаанд түргэвчилсэн сургалтын алгоритм (ELM)-ийг суурь таамаглалын загвар болгон ашигласан. Эцсийн таамаглалын утгыг эдгээр 10 дэд загварын гаралтыг дундажлан нэгтгэх замаар гарган авсан. Энэхүү арга нь ансамбль сургалтын давуу талыг ашиглаж, загварын таамаглалын **тогтвортой байдал** болон дуу чимээнд тэсвэртэй байдлыг сайжруулж, хэт сургалтын эрсдэлийг бууруулдаг. Олон загварын үр дүнг нэгтгэснээр илүү өндөр нарийвчлалтай, илүү сайн нэгтгэх чадвартай фотоцахилгаан чадлын таамаглалын үр дүнд хүрсэн бөгөөд энэ нь цаашдын бодит хэрэглээнд найдвартай өгөгдөл болон онолын үндэслэл болж өгнө.

IV. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаанд фотоцахилгаан (PV) цахилгаан үйлдвэрлэлийн бодит чадлын өгөгдөл болон олон төрлийн цаг уурын хүчин зүйлсэд тулгуурлан хамаарлын шинжилгээ (Пирсоны коэффициент), кластер шинжилгээ (K-means++) болон машин сургалтын арга (EELM)-ыг хослуулан, янз бүрийн цаг агаарын нөхцөлд дасан зохицох чадвартай PV чадлын таамаглалын загвар боловсруулсан. Пирсоны хамаарлын коэффициент ашиглан хийсэн шинжилгээний үр дүнгээс GHI нь PV чадалтай хамгийн хүчтэй эерэг хамааралтай (коэффициент ≈0.99) бөгөөд хамгийн гол нөлөөлөх хүчин зүйл болох нь тогтоогдсон. K-means++ алгоритмыг ашиглан PV чадлын муруйд хяналтгүй кластер шинжилгээ хийж, өөр өөр цаг агаарын нөхцөлд илэрдэг чадлын өөрчлөлтийн хэв маягийг таван ангилалд хуваасан. EELM загвар нь бүтэц ижил боловч параметр өөр 10 ELM дэд загварын гаралтыг нэгтгэснээр тест өгөгдөл дээрх R^2=0.9997, RMSE=0.0432 байгаа нь маш өндөр нарийвчлалтай таамаглал гаргаж байгааг харуулж байна. Эдгээр аргууд харилцан бие биеэ нөхөж, инженерийн практикт хэрэглэх боломжтой PV чадлын таамаглалын арга зүйн хүрээг бүрдүүлж байна. Монгол Улсад нарны цахилгаан станцын хүчин чадал жилээс жилд нэмэгдэж байгаа нөхцөлд энэхүү судалгааны арга зүй нь орон нутгийн цаг уурын хувилбар ихтэй бүсүүдэд PV системийн найдвартай ажиллагаа, эрчим хүчний аюулгүй байдлыг хангахад шууд хэрэгцээтэй бөгөөд салбарын төлөвлөлт, үйл ажиллагааны оновчлолд чухал хувь нэмэр оруулах боломжтой. Цаашдын судалгаанд гүн сургалтын арга, бодит цагийн урьдчилсан мэдээ болон оновчлолын хяналтын стратегийг хослуулснаар загварын хэрэглээний хүрээ болон нарийвчлалыг нэмэгдүүлэх боломжтой.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] https://dkasolarcentre.com.au/download?location=yulara.

[2] "Developing Solar Energy to Solve Environmental Problems: About 40 Million Households and 150 Million People Benefiting," Available: https://www.gov.cn/jrzg/2007-04/26/content_596769.html, Apr. 2, 2007.

[3] M. J. B. Kabeyi and O. Olanrewaju, "Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply," Frontiers in Energy Research, Mar. 24, 2022.

[4] O. A. Adelekan, B. S. Ilugbusi, et al., "Energy Transition Policies: A Global Review of Shifts Towards Renewable Sources," Engineering Science & Technology Journal, Feb. 2, 2024.

[5] "Clean Energy Is Reshaping the Global Energy Structure," Available: https://finance.sina.cn/2024-10-22/detail-inctkkxp8230151.d.html, Oct. 22, 2024.

[6] 2024 Global Solar-Storage Energy Transition White Paper: The Golden Engine Toward Net-Zero Carbon Emissions, Available: https://www.vzkoo.com/read/20250521a11a75fc9600007a35c037c6.html, May 21, 2025.

[7] "Principles and Technologies of Photovoltaic Power Generation," Available: https://www.hazygf.com/guanwangxinwen/gongsidongtai/791.html, Mar. 26, 2025.

[8] "Advantages of Photovoltaic Technology Development for the Energy Industry," Available: https://zonliv.com/2024/07/08/hello-world-2/, Jul. 8, 2024.

[9] "Principles and Technologies of Photovoltaic Power Generation," Available: https://www.ljoy0511.com/post/46120.html, Mar. 26, 2025.

[10] J. Song, Research on Quantitative Evaluation Model and Case Application of Renewable Energy Utilization in Green Buildings. Tianjin, China: Tianjin University, 2014.

[11] Chen Siyu, Jiang Junxia, Li Shuaibing. A review of photovoltaic power generation prediction methods under extreme climate conditions [J]. Journal of Electrical Engineering, 281-290,2025.

[12] Photovoltaic power generation principles and technologies https://www.ljoy0511.com/post/46120.html, 2025.

[13] Song Jian. Research on Quantitative Evaluation Model and Case Application of Renewable Energy Utilization in Green Buildings [D] Tianjin University, 2014

ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ СИСТЕМИЙН ТӨЛӨВ БАЙДЛЫН ҮНЭЛГЭЭ, ШИНЖИЛГЭЭ

Дэлгэрийн ГАН-ОТГОН[1,2], Баясгалангийн ЗАГДХОРОЛ[1]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим

Монгол улс, Улаанбаатар, Сэргээгдэх Эрчим Хүчний Үндэсний Төв

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг:ganotgon95@gmail.com[1], zagdkhorol@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Энэхүү өгүүлэл нь эрчим хүчний системийн төлөв байдлын үнэлгээний уламжлалт болон шинэ үеийн аргуудыг олон улсын судалгааны өгүүлэл, тайлан, нээлттэй практик кейс дээр тулгуурлан харьцуулан шинжилсэн. Судалгааны зорилго нь СКАДА-д суурилсан статик үнэлгээ, синхрофазорын ФХН оролцсон хосолмол үнэлгээ, түгээх сүлжээний төлөв байдлын үнэлгээ, тархмал болон параллель тооцоолол, кибер аюулгүй байдлын шийдлүүдийн онол-аргазүй, практик хэрэглээ, хязгаарлалтыг нэгтгэн үнэлэхэд оршино. Аргазүйн хувьд сонгосон олон улсын тойм өгүүллүүд болон төлөөлөх туршилт, хэрэгжилтийн судалгаануудыг хэмжилтийн төрөл, сүлжээний түвшин, тооцооллын схем, ажиглагдах байдал, алдаанд тэсвэртэй байдал, бодит цагийн хэрэгжих чадвар гэсэн шалгууруар ангилан шинжиллээ. Харьцуулсан үр дүнгээс дамжуулах сүлжээнд жинлэсэн хамгийн бага квадратын арга үйлдвэрлэлийн үндсэн шийдэл хэвээр боловч ФХН-тэй хосолсон үнэлгээ нь ажиглагдах байдал, хугацааны нарийвчлал, динамик процессын мэдрэмжийг мэдэгдэхүйц сайжруулж байгааг тогтоов. Харин түгээх сүлжээнд хэмжилтийн сийрэг байдал, фазын тэнцвэргүй горим, ТЭҮ-ийн хэлбэлзэл, хуурамч-өгөгдлийн тодорхойгүй байдал зэргээс шалтгаалан уламжлалт арга дангаараа хангалтгүй болж, өгөгдөл нэгтгэх болон дата-драйвен аргуудын хэрэгцээ өсөн нэмэгдэж байна. Мөн хуурамч өгөгдлийн халдлага, топологийн алдаа, холбооны саатал нь үнэлгээний найдвартай байдлын гол эрсдэл хэвээр байна. Эцэст нь Монголын эрчим хүчний системд ФХН-ийн үе шаттай нэвтрүүлэлт, СКАДА/ФХН/УТС өгөгдлийн давхар интеграц, дэд станцын түвшний тархмал үнэлгээ, кибер хамгаалалттай өгөгдлийн баталгаажуулалтын архитектур хэрэгжүүлэх санал дэвшүүлэв. Энэхүү судалгаа нь бодит цагийн горимын шинжилгээ, найдвартай ажиллагааны үнэлгээ, дижитал сүлжээний шилжилтийн онол-практикийн суурь чиглэлийг тодорхойлж буйгаараа ач холбогдолтой.**

Түлхүүр үг: Синхрофазор, Ажиглагдах байдал,Ххуурамч-өгөгдөл, Кибер тэсвэржилт, Бодит цагийн мониторинг

I. УДИРТГАЛ

Эрчим хүчний системийн төлөв байдлын үнэлгээ нь удирдлагын төвд ирж буй хэмжилт, сүлжээний топологи, тоноглолын параметрүүдийг нэгтгэн тухайн агшны хүчдэл, өнцөг, урсгалын хамгийн магадлалтай төлөвийг тодорхойлох үндсэн тооцоолол юм. Энэхүү функц нь эрчим хүчний менежментийн системийн суурь модуль бөгөөд бодит цагийн загвар байгуулах, алдаатай хэмжилт шүүх, аюулгүй ажиллагааны дүн шинжилгээ хийх, алдааны шинжилгээ болон оновчлолын функцуудыг тэжээх зориулалттай [1]-[3].

Сүүлийн арван жилд цахилгаан эрчим хүчний салбарын бүтэц өөрчлөгдөж, сэргээгдэх эх үүсвэр, ухаалаг тоолуур, ФХН буюу фазор хэмжилтийн нэгж гэсэн утгатай. Энэ нь цахилгаан эрчим хүчний системийн хүчдэл болон гүйдлийн фазор (их хэмжээ + фазын өнцөг)-ийг маш өндөр нарийвчлалтай, синхрончлогдсон байдлаар хэмждэг төхөөрөмж юм. цахилгаан сүлжээний хүчдэл болон гүйдлийн фазор утгуудыг хэмжиж, тэдгээрийг цагийн синхрончлолын системтэй уялдуулан бодит цагт илгээдэг. Ингэснээр сүлжээний өөр өөр цэгүүдийн хэмжилтүүд нэг цагийн агшинд авсан мэт харьцуулах боломжтой болдог. УЭТ (ухаалаг электрон төхөөрөмж) гэсэн утгатай. Энэ нь цахилгаан эрчим хүчний системд хэмжилт хийх, хамгаалалт хэрэгжүүлэх, удирдлага гүйцэтгэх, мэдээлэл дамжуулах зэрэг олон функцийг нэг дор гүйцэтгэдэг дижитал төхөөрөмж юм. Ирмэгтэй УЭТ нь дэд станц болон цахилгаан сүлжээний тоног төхөөрөмжийг ухаалаг удирдах, хамгаалах, хянах зориулалттай микропроцессорт суурилсан төхөөрөмж юм. Тооцооллын төхөөрөмжийн хэрэглээ огцом өссөнөөр төлөв байдлын үнэлгээний асуудал нь зөвхөн дамжуулах сүлжээний тогтсон асуудал биш, харин олон төрлийн өгөгдлийг нэгтгэх, бодит цагийн хурдтай боловсруулалт хийх, кибер эрсдэлийг хянах шаардлагатай нийлмэл системийн асуудал болж хувирсан [4], [5]. Үүний зэрэгцээ түгээх сүлжээ идэвхтэй болж, ТЭҮ (цахилгаан эрчим хүчийг түгээх сүлжээний түвшинд тархмал байдлаар үйлдвэрлэх, хадгалах, удирдах эх үүсвэрүүдийн цогц систем) болон цахилгаан тээврийн хэрэгслийн нөлөөгөөр ачааллын хэв шинж хувьсамтгай болсон нь уламжлалт статик үнэлгээний хязгаарлалыг илүү тод харуулж байна [6], [7].

Энэ өгүүллийн зорилго нь олон улсын судалгааны хөгжлийн чиг хандлагыг ангилан нэгтгэж, уламжлалт ЖКА буюу жинлэсэн хамгийн бага квадратын арга гэсэн утгатай. Энэ нь цахилгаан эрчим хүчний системийн төлөв байдлын үнэлгээ (Системийн төлөвийн үнэлгээ хийхэд хамгийн өргөн хэрэглэгддэг математик арга юм) суурьт үнэлгээ, СКАДА-ФХН хосолмол үнэлгээ, түгээх сүлжээний үнэлгээ, тархмал болон параллель тооцоолол, кибер-тэсвэртэй аналитикийн чиглэлүүдийг харьцуулан дүгнэхэд оршино. Мөн Монголын эрчим хүчний системд дижитал мониторингийн архитектур үе шаттай нэвтрүүлэх талаар инженерийн түвшний санал боловсруулсан.

II. ТӨЛӨВ БАЙДЛЫН ҮНЭЛГЭЭНИЙ ОНОЛ, АРГА ЗҮЙ

1. Математик суурь ба ажиглагдах байдал

Төлөв байдлын үнэлгээний сонгодог загвар нь хэмжилтийн вектор, төлөвийн вектор, санамсаргүй алдааны хоорондын дараах хамаарлаар илэрхийлэгдэнэ [2], [3], [5]:

$$z = h(x) + e \qquad (1)$$

Энд z нь хэмжилтийн вектор, x нь автобусны хүчдэл ба өнцгийн төлөвийн вектор, h(x) нь шугаман бус хэмжилтийн функц, e нь хэмжилтийн алдааны вектор болно. Аж үйлдвэрийн хэрэгжилтэд хамгийн түгээмэл ашиглагддаг жинлэсэн хамгийн бага квадратын арга нь дараах зорилтот функцийг багасган шийддэг [2], [3]:

$$x^* = \arg\min\{(z - h(x))^T R^{-1}(z - h(x))\} \qquad (2)$$

Энд R нь хэмжилтийн ковариацын матриц бөгөөд хэмжилтийн найдвартай байдал өндөр байх тусам тухайн өгөгдөл үнэлгээний үр дүнд илүү жинтэй нөлөөлнө. Практикт топологи процессор, ажиглагдах чадварын анализатор, урьдчилсан шүүлтүүр, буруу өгөгдөл илрүүлэгч зэрэг дэд функцууд үнэлгээний үндсэн шийдвэрийг дэмжиж ажилладаг. Иймээс төлөв байдлын үнэлгээ нь ганц тооцооны алгоритм биш, харин өгөгдөл шүүх, топологи баталгаажуулах, үлдэгдэл шинжилгээ хийх олон шатлалт инженерийн процесс юм [5], [10].

2. Сонгодог ба шинэ үеийн аргууд

Уламжлалт дамжуулах сүлжээний удирдлагын төвүүдэд ЖКА нь тооцооллын хөнгөн ачаалал, тогтсон программ хангамжийн хэрэгжилт, үлдэгдлийн статистикт суурилсан алдаатай өгөгдөл боловсруулахтай хосолдог тул одоо ч үндсэн арга хэвээр байна [1], [2], [5]. Гэхдээ томоохон алдаа, параметрийн алдаа, топологийн алдаа, буруу жинлэлтийн үед ЖКА хангалттай бат бөх биш тул жинлэсэн абсолют арга, Абсолют арга, Хьюберийн арга зэрэг нөлөөлөлд тэсвэртэй үнэлгээний арга хөгжсөн. Эдгээр аргууд нь алдаатай хэмжилтийн нөлөөг сааруулдаг боловч тооцооллын үнэ өртөг болон хэрэгжилтийн төвөгшил өндөр байдаг [5], [7].

ФХН өргөн хэрэглээнд нэвтэрснээр хүчдэлийн фазын өнцгийг синхрон хэмжих боломж нээгдэж, хосолсон системийн төлөвийн үнэлгээ хэмээх шинэ чиглэл үүссэн. Энэхүү арга нь СКАДА-ийн уламжлалт идэвхтэй болон реактив чадлын хэмжилтүүдийг ФХН-ийн фазор өгөгдөлтэй хослуулснаар ажиглагдах байдлыг нэмэгдүүлж, хугацааны нарийвчлалыг сайжруулж, динамик процессын өөрчлөлтийг илүү мэдрэмтгий илрүүлэх боломж олгодог [4], [5], [10]. Гэвч бүрэн ФХН сүлжээ байгуулах нь эдийн засгийн хувьд үр ашиггүй хэвээр тул ойрын ирээдүйд хосолмол архитектур давамгайлах нь түгээмэл дүгнэлт болж байна [4], [5].

Олон эх үүсвэрт өгөгдөл ашиглах үед мэдрэгчийг хамтран байрлуулах, асинхрон таймстамп, өөр өөр тайлангийн давтамж, хэмжилтийн төрөл, тодорхойгүй байдал, хоцорсон эсвэл дутуу өгөгдөл зэрэг асуудал нэгэн зэрэг үүсдэг. Cheng нарын тойм судалгаанд СКАДА нь ихэвчлэн 2-5 секундийн интервалтай, ФХН нь секундэд 60 хүртэлх дээж өгөх боломжтой, УТС нь 15 минут эсвэл түүнээс удаан давтамжтай байдгийг онцолж, эдгээрийг нэг агшин зуурын болгон уялдуулах нь цэвэр алгоритмын бус, өгөгдлийн инженерчлэлийн асуудал гэдгийг тодорхойлсон [4].



1-р зураг. Төлөв байдлын үнэлгээний олон улсын хөгжлийн түгээмэл чиг хандлагын нэгтгэсэн схем

III. ОЛОН УЛСЫН СУДАЛГААНЫ ХАРЬЦУУЛСАН ШИНЖИЛГЭЭ

A. Дамжуулах сүлжээний үйлдвэрлэлийн практик

NASPI-ийн тайланд уламжлалт системийн төлөв үнэлэгч нь хязгаарлагдмал ажиглагдах орчныг нөхөх, хэмжилтийн өгөгдлийн үнэн зөвийг баталгаажуулах, мөн сүлжээний системийн загварыг ФХН өгөгдлөөр калибровк хийхэд ашиглагдаж байгааг тодорхой тэмдэглэсэн [10]. Энэ нь СКАДА суурьтай системийн төлөвийн үнэлгээний хүрээнд өндөр нарийвчлалтай фазор өгөгдлийг ашиглан системийн динамик төлөвийг бодит цагт илүү нарийвчлалтай тодорхойлж, буруу болон алдаатай өгөгдлийг илрүүлэх боломжийг бий болгодог. Мөн сүлжээний оператор, Калифорнийн бие даасан системийн оператор, Бонневиллийн эрчим хүчний захиргаа, Техасын цахилгаан найдвартай байдлын зөвлөл зэрэг томоохон операторууд ФХН өгөгдлийг төлөв үнэлгээний загварын баталгаажуулалт болон Тархмал төлөв үнэлгээний туршилт зэрэгт ашигласан туршлагаа нийтэлсэн нь сонирхолтой.

Эдгээр туршлагууд нь уламжлалт ЭХУС (Эрчим хүчний удирдлагын систем) логикийг шууд орлуулахгүй боловч, ФХН-ийн өндөр хурд, синхрон фазор хэмжилтээр системийн төлөв үнэлэх нарийвчлалыг сайжруулж, системийн ажиглагдах чадварыг өргөжүүлж байгааг харуулж байна. Иймээс орчин үеийн цахилгаан системд СКАДА–ФХН хосолсон төлөв үнэлгээ болон тархмал төлөв үнэлгээ аргачлалуудыг хөгжүүлэх шаардлага улам бүр нэмэгдэж байгаа нь олон улсын операторуудын туршлагад илт харагдаж байна. Энэхүү чиглэл нь бодит цагийн динамик хяналт, кибер-тэсвэртэй аналитик, тархмал эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг (ТЭҮ) интеграцлах чухал ач холбогдолтой.

B. СКАДА-ФХН хосолмол үнэлгээ

СКАДА–ФХН хосолмол системийн төлөв үнэлгээ нь уламжлалт ЭХУС логикийг орлуулах бус, харин нарийвчлал, ажиглагдах чадвар, динамик хяналтыг сайжруулах чиглэлд практик ач холбогдолтой бөгөөд олон улсын операторуудын туршлагад илэрч байна. Энэхүү аргачлал нь ухаалаг цахилгаан сүлжээ,

Тархмал эрчим хүч үйлдвэрлэл, бодит цагийн хяналт зэрэг орчин үеийн цахилгаан системийн хөгжлийн гол суурь болж байна. Гэвч ФХН-ийн өртөг өндөр, суурилуулалтын байршил оновчгүй тохиолдолд өгөгдлийн ашиглалт буурч, бүрэн ФХН-д суурилсан архитектур нь бодит системд нийтлэг хэрэгжээгүй хэвээр байгааг мөн онцолсон [5].

C. Түгээх сүлжээ, ТЭҮ ба шинэ сорилтууд

Түгээх сүлжээний төлөв байдлын үнэлгээ нь дамжуулах сүлжээнээс хэд хэдэн үндсэн ялгаатай. Yadav нарын дүгнэснээр түгээх сүлжээ нь хангалтгүй хэмжилттэй, x/r харьцаа бага, фазын тэнцвэргүй горимтой байдаг тул дамжуулах сүлжээнд боловсруулсан алгоритмыг шууд хэрэглэх боломж хязгаарлагдмал [7]. Vijaychandra нарын тойм судалгаа мөн тархмал эрчим хүчний нөөцүүд, ухаалаг тоолуур, хуурамч хэмжилтүүд, олон фазын томьёолол, мэдрэгчийн байршуулалт зэрэг асуудлыг ТСТҮ (түгээх сүлжээний төлөвийн үнэлгээ)-ний гол зангилаа гэж тодорхойлсон [6]. Ийм орчинд хуурамч-өгөгдлийн чанар, ачааллын таамаглал, дутуу хэмжилт нөхөх арга нь үнэлгээний чанарыг шийдвэрлэх хэмжээнд нөлөөлнө.

Нидерландын цахилгаан түгээх компанийн 50 kV цагариг сүлжээнд хийсэн ФХН-суурилсан бодит-цагийн ТСТҮ платформын туршилт нь түгээх сүлжээнд фазор өгөгдөл ашиглан хэвийн бус байдлыг илрүүлэх, ялгах, тодорхойлохтой хосолсон бодит цагийн архитектур хэрэгжих боломжтойг харуулсан [8]. Veerakumar нар өргөтгөсөн Калман шүүлтүүр болон сигма цэгт Калман шүүлтүүрийг харьцуулж, ФХН-ийн өндөр давтамжийг ашиглан хурдан шүүлтүүр болон шуурхай хэвийн бус байдлыг илрүүлэх боломжийг бодит цагийн дижитал симулятор орчинд баталгаажуулсан нь судалгааны ажлаас инженерийн хэрэгжилт рүү ойртсон чухал жишээ юм [8].

D. Тархмал тооцоолол ба кибер-тэсвэржилт

Сүлжээний хэмжээ томрох тусам төвлөрсөн алгоритм нь процессорын ачаалал, хоцролт, захын хэмжилтийн удирдлагын хувьд хүндрэлтэй болдог. Yilmaz ба Abur нарын санал болгосон олон зэрэгцээ тархсан хүрээ зончилол болон нэмэлт хуулбар дээр суурилсан хуваалт ашиглан 12 500-аас дээш автобус бүхий том сүлжээнд системийн төлөв үнэлгээний хугацааг бараг системийн хэмжээнээс үл хамаарах түвшинд ойртуулах зорилготой [9]. Энэ чиглэл нь улсын хэмжээний үндсэн сүлжээ болон том хотын түгээлтийн удирдлагын системд онцгой ач холбогдолтой.

Нөгөө талаас кибер-физик сүлжээний орчинд системийн төлөв үнэлгээ нь хуурамч өгөгдөл шахах халдлагын үндсэн бай болдог. Chen нарын 2023 оны судалгаанд эрчим хүчний системд ашиглагддаг хяналт, холбооны сүлжээний платформ загвар ашиглан цахилгаан системийн туршилтын стандарт загварууд (IEEE 14, 30, 118 bus) системд хуурамч өгөгдөл шахах халдлага илрүүлэлт хийж, топологид мэдрэмтгий граф загвар нь товгор нейрон сүлжээ, гүн нейрон сүлжээ, дэмжих векторын машинаас илүү үр дүнтэй байгааг харуулсан [11]. Chang нарын 2024 оны тоймд системийн төлөв үнэлгээ, машин сургалт, блокийн гинжин технологи, дамжуулах үеийн хамгаалалт зэрэг олон түвшний хамгаалалт шаардлагатай гэж дүгнэсэн бөгөөд энэ нь цэвэр үнэлгээ хөгжүүлэхээс гадна өгөгдлийн бүрэн бүтэн байдал, цагийн синхрончлол, сүлжээний хяналтыг хамарсан илүү өргөн аюулгүй байдлын архитектур шаардаж байгааг батална [12].

ОЛОН УЛСЫН ТӨЛӨӨЛӨХ СУДАЛГААНУУДЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ.

Судалгааны зохиогч (он)	Тухайн өгөгдөл / чиглэл	Гол хувь нэмэр	Хязгаарлалт / Сул тал
Wu (1990), Monticelli (2000)	SCADA, дамжуулж сургалт	Сонгодог PSE-ийн онол, observability, bad data логик	Динамик процесс, олон эх үүсвэрт өгөгдөл, кибер халдлагыг тусгаагүй
Cheng et al. (2024)	PMU, SCADA, AMI, multi-source	Data fusion, sensor placement, time alignment, uncertainty management	Томоохон хэмжээнд өргөжүүлэхэд төвөгтэй
Kamyabi et al. (2024)	Hybrid SE (SCADA + PMU)	Static/dynamic, centralized/decentralized загварыг нэгтгэсэн	Бүрэн PMU сүлжээ шаардлагатай, практик хэрэгжилт хязгаарлагдмал
Vijayachandran (2023), Yadav (2023)	DSSE, DER, pseudo-data	Multiphase formulation, sensor placement, судалгааны хандлага	Observability, imbalance, low XF, pseudo-data-ийн тодорхойгүй байдал
Veeraraman et al. (2023)	PMU-based real-time DSSE	50 kV системд EKF/UKF ашигласан, proof-of-concept	Real-time хэрэгжилт, PMU coverage-ийн хязгаарлалт
Yilmaz and Abur (2024)	Large-scale parallel DSSE	Scalability, robustness, partitioning framework	Boundary measurements-ийн нарийвчлал, zone design
Chen (2023), Chang (2024)	FDIA detection, graph ML, security	ML-д суурилсан хамгаалалт, network security-д интеграцчилсан	Өгөгдлийн хамаарал, халдлагын нарийн хэлбэрийг бүрэн илрүүлэхэд бэрх

IV. ЗАГВАР АШИГЛАХ НЬ

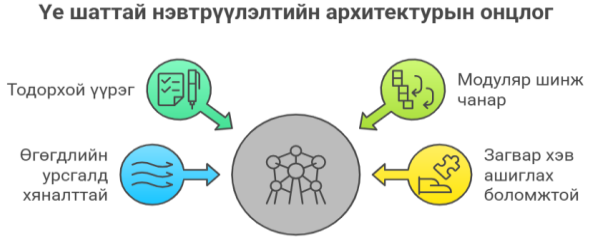
1. Үе шаттай нэвтрүүлэлтийн архитектур

Цахилгаан дамжуулах үндэсний сүлжээ ТӨХК-н Улаанбаатар салбарын хувьд 2022 оноос бие даасан СКАДА буюу алсын хяналт удирдлагын системийг нэвтрүүлэх ажил хийгдэж эхэлсэн байдаг. Дотоод

хяналт удирдлагын системд ээлж дараатайгаар систем рүү оруулах ажил хийгдэж 2024 онд мэдээлэл дамжуулах шилэн кабелийн тойрог сүлжээг бүрэн оруулан 26 дэд станцыг “Зенон” СКАДА системд холбох ажил хийгдсэн. Энэ ажлын үр дүнд таслуурын ***төлөвийн*** мэдээлэл, фаз тус бүрийн гүйдэл, хүчдэл, шин дээрх давтамжийн утга, хамгаалалт ажилласан мэдээллийг бодит-цагийн агшинд цаг алдалгүй богино хугацаанд алсын зайнаас авах ачааллын мэдээллийг цаг тутам өгөгдлийн санд хадгалах, хэмжүүрийн мэдээллийн үнэн зөвийг баталгаажуулах, станцуудын мэдээлэл нэгдсэн хяналт удирдлагын төвд шуурхай дамжуулах нөхцөл бүрдсэн үр дүнтэй ажил хийгдсэн.

Монголын эрчим хүчний системд Системийн төлөвийг үнэлгээг шууд өндөр түвшний холимог болон тархсан шийдлээр солихоос илүүтэй өгөгдөл, загвар, хэмжилтийн чанарын шаталсан шинэчлэл шаардлагатай. Эхлээд удирдлагын төвийн СКАДА мэдээллийн сан, сүлжээний загвар, салгуур ба зангилааны топологи, шугам ба трансформаторын параметрүүд, мөн тэг ачаалалтай зангилааны логикийг цэвэрлэж, системийн төлөв үнэлгээ жин тогтоолт болон алдаатай өгөгдөл илрүүлэх дүрмийг тохируулах хэрэгтэй. Энэ ажлыг хийснээр ФХН суурилуулахаас өмнө ч төлөв үнэлгээний тогтвортой байдал болон яаралтай нөхцөл байдлын шинжилгээний чанарыг сайжруулж чадна. [2], [3].

Хоёрдугаар шатанд 220 кВ болон 110 кВ гол шугам сүлжээний стратегийн зангилаа, генерацийн төв, муж хооронд ачаалал ихтэй шугам, хэлбэлзэл болон өнцгийн зөрүү илрүүлэх боломжтой зурвасд ФХН-ийг үе шаттай байршуулах нь зүйтэй. Ийм байршил нь бүрэн ФХН хамрах хүрээ шаардахгүйгээр холимог төлөвийн үнэлгээ хамгийн өндөр өгөөжтэй цэгүүдийг сонгох боломж олгоно [4], [5], [10]. Гуравдугаар шатанд хотын түгээх сүлжээнд ухаалаг тоолуур, тэжээлийн шугамын терминалын төхөөрөмж, жижиг ФХН-ийг ашигласан туршилтын түгээх сүлжээний төлөвийн үнэлгээний төслүүд эхлүүлж, ТЭҮ болон цахилгаан тээврийн хэрэгслийн нэвтрэлтийн түвшин ихсэхээс өмнө хяналтын чадвар бэхжүүлэх шаардлагатай [6]-[8].



2-р зураг. Үе шаттай нэвтрүүлэлтийн архитектурын онцлог

2. Судалгааны цаашдын чиглэл

Ойрын ирээдүйн судалгаанд физикт суурилсан машин сургалт, топологи мэдрэмжтэй гажиг илрүүлэлт, цаг агаарын мэдээллээр сайжруулсан хуурамч хэмжилтүүд, асинхрон өгөгдөл нэгтгэл, тархмал төлөвийн үнэлгээ, кибер хамгаалалттай өгөгдлийн архив зэрэг чиглэлүүд Монголын нөхцөлд шууд ач холбогдолтой. Ялангуяа салхин болон нарны үүсгүүрийн хэлбэлзэлтэй бүсүүдэд цахилгаан хэмжилтийг цаг уурын өгөгдөлтэй хослуулах, түгээх сүлжээний ажиглагдах байдлыг УТС ба микро-ФХН-ээр нөхөх, нэгдсэн системийн төвөөс дэд станц руу тооцооллын ачааллыг тараах судалгаа нэн шаардлагатай [4], [7], [9].

Түүнчлэн үнэлгээний найдвартай байдал зөвхөн алгоритмаас шалтгаалахгүй бөгөөд цагийн синхрончлол, холбооны хоцролт, пакетийн алдагдал, хандалтын хяналт, өгөгдлийн бүрэн бүтэн байдал, аудитын мөр зэрэг мэдээллийн дэд бүтцийн чанартай шууд хамааралтай. Иймээс Монголын нөхцөлд “Төлөв үнэлгээний төсөл” бус, харин “Аюулгүй байдлын нөхцөл байдлын мэдлэгийн хөтөлбөр” гэсэн илүү өргөн хүрээтэй хөтөлбөр байдлаар хэрэгжүүлэх нь оновчтой. Энэ хандлага нь судалгаа, тоноглол, мэдээллийн технологи, хамгаалалтын инженерчлэл, операторын сургалтыг нэг архитектурт уялдуулах давуу талтай.



3-р зураг. Монголын эрчим хүчний системийн судалгааны чиглэл

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү өгүүлэлд эрчим хүчний системийн төлөв байдлын үнэлгээний олон улсын хөгжлийг уламжлалт СКАДА-д суурилсан статик үнэлгээнээс хосолсон СКАДА-ФХН, ТСТҮ, тархмал тооцоолол, кибер-тэсвэртэй аналитик руу шилжиж буй чиг хандлагаар нь харьцуулан авч үзлээ. Шинжилгээний дүнгээс ЖКА суурьт классик үнэлгээ дамжуулах сүлжээнд үйлдвэрлэлийн гол шийдэл хэвээр байгаа ч бодит цагийн илүү нарийн ажиглалт, ТЭҮ ихтэй түгээх сүлжээ, мэдээллийн аюулгүй байдлын шаардлага өсөхийн хэрээр хосолсон, тархсан, аюулгүй байдлыг харгалзсан архитектур зайлшгүй болж байна. Монголд хэрэгжүүлэх аргачлал нь зөвхөн технологи суурилуулах төдийгүй инженерийн, мэдээллийн, аюулгүй байдлын, операторын сургалттай уялдсан өргөн хүрээтэй нөхцөл байдлыг таамаглах програм байх ёстой. Шаталсан хэрэгжилт**:** СКАДА өгөгдөл цэвэршүүлэлт → хосолсон төлөвийн үнэлгээ → туршилтын түгээлттэй төлөвийн үнэлгээ → бүрэн хэмжээний → аюулгүй байдлыг харгалзсан удирдлага Монголын эрчим хүчний системд найдвартай, уян хатан, бодит цагийн, кибер-тэсвэртэй ситемийн төлөвийн үнэлгээ

архитектур хэрэгжүүлэх нь онолын үндэслэлтэй, практик хувьд хэрэгжих боломжтой бөгөөд ТЭҮ нэмэгдсэн түгээх сүлжээ, бодит цагийн мониторинг, мэдээллийн аюулгүй байдал зэрэг өнөөгийн гол сорилтуудыг шийдэх чухал замнал болно.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] F. F. Wu, “Power system state estimation: a survey,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 12, no. 2, pp. 80-87, Apr. 1990.

[2] A. Monticelli, “Electric power system state estimation,” Proc. IEEE, vol. 88, no. 2, pp. 262-282, Feb. 2000.

[3] A. Abur and A. Gomez-Exposito, Power System State Estimation: Theory and Implementation. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.

[4] G. Cheng, Y. Lin, A. Abur, A. Gomez-Exposito, and W. Wu, “A Survey of Power System State Estimation Using Multiple Data Sources: PMUs, SCADA, AMI, and Beyond,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 15, no. 1, pp. 1129-1151, Jan. 2024.

[5] L. Kamyabi, T. T. Lie, S. Madanian, and S. Marshall, “A Comprehensive Review of Hybrid State Estimation in Power Systems: Challenges, Opportunities and Prospects,” Energies, vol. 17, no. 19, Art. no. 4806, 2024.

[6] J. Vijaychandra, B. R. V. Prasad, V. K. Darapureddi, B. V. Rao, and L. Knypinski, “A Review of Distribution System State Estimation Methods and Their Applications in Power Systems,” Electronics, vol. 12, no. 3, Art. no. 603, 2023.

[7] A. P. Yadav et al., “Review of Emerging Concepts in Distribution System State Estimation: Opportunities and Challenges,” IEEE Access, vol. 11, pp. 70503-70515, 2023.

[8] N. Veerakumar, D. Cetenovic, K. Kongurai, M. Popov, A. Jongepier, and V. Terzija, “PMU-based Real-time Distribution System State Estimation Considering Anomaly Detection, Discrimination and Identification,” Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 148, Art. no. 108916, 2023.

[9] U. C. Yilmaz and A. Abur, “A Robust Parallel Distributed State Estimation for Large Scale Distribution Systems,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 39, no. 2, pp. 4437-4445, 2024.

[10] North American SynchroPhasor Initiative, “Model Validation with Synchrophasors,” NASPI Technical Report, Mar. 2015.

[11] B. Chen, Q. H. Wu, M. Li, and K. Xiahou, “Detection of false data injection attacks on power systems using graph edge-conditioned convolutional networks,” Prot. Control Mod. Power Syst., vol. 8, Art. no. 16, 2023.

[12] Z. Chang et al., “A Review of Power System False Data Attack Detection Technology Based on Big Data,” Information, vol. 15, no. 8, Art. no. 439, 2024.

УЛААНБААТАР ХОТЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН СИСТЕМИЙН СҮЛЖЭЭНИЙ УСНЫ ТЕМПЕРАТУРЫН ГРАФИКИЙН СУДАЛГАА

Эрдэнэбатын БУМБАЯР[1,2], Пашка БЯМБАЦОГТ[2], Чогсомжав МӨНХЖАРГАЛ[1], Өлзийхутаг Энх-Амар[2]

[1]Улаанбаатар дулааны сүлжээ ТӨХК, Горим тохируулгын алба

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Дулааны хангамж автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: e.bumbayar14@gmail.com

Хураангуй: **Сүлжээний усны температурын тооцоот горимын утгаас хамааран сүлжээний усны зарцуулалт, шугам хоолойгоор алдагдах дулааны алдагдлын хэмжээ, орон сууцны дотор агаарын температур, мөн цахилгаан эрчим хүчний зарцуулалт зэрэг үндсэн үзүүлэлтүүд харилцан хамааралтайгаар тодорхойлогддог. Энэхүү судалгаанд сүлжээний усны температур болон зарцуулалтын бодит хэмжилт, барилгын дотор агаарын температур, халаах хэрэгслийн хүчин чадлын тооцоот болон бодит утгуудыг хэмжилтийн үр дүнд тулгуурлан харьцуулж, дүн шинжилгээ хийсэн. Үүний үндсэн дээр сүлжээний усны температурын оновчтой утгыг тодорхойлохыг зорилоо.**

Түлхүүр үг: Гадна агаарын температур, сүлжээний усны бодит болон тооцоот температур, харьцангуй чийгшил, дулааны алдагдал

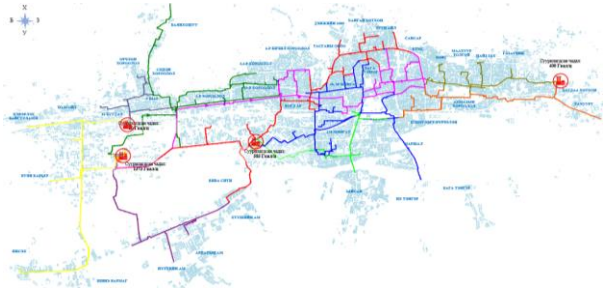
I. УДИРТГАЛ

Монгол Улсын хувьд өвлийн улирал урт, хүйтэн уур амьсгалтай тул дулаан хангамжийн систем нь хот суурин газрын амьдралын зайлшгүй чухал хэсэг юм. Ялангуяа Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн сүлжээ нь олон мянган айл өрх, байгууллагыг дулаанаар хангаж байгаа томоохон инженерийн байгууламж билээ. Иймээс дулаан хангамжийн системийн оновчтой төлөвлөлт, найдвартай ажиллагаа, температурын зөв горим нь системийн хэвийн ажиллагаанд чухал ач холбогдолтой юм.

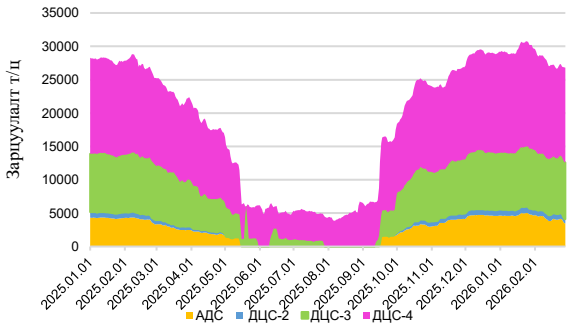
Энэхүү судалгааны ажилд дулаан хангамжийн системийн гидравлик горим ажиллагаа, Улаанбаатар хотын дулааны сүлжээний онцлог, орон сууцны дотор агаарын температурын бодит утгыг хэмжилтээр тогтоож, халаах хэрэгслийн хүчин чадлын тооцоо судалгааг хийж, температурын графикийн тооцоот болон бодит температурын утгатай харьцуулалт хийж үр дүнд нь сүлжээний усны тохиромжтой температурын утгыг тогтоохыг судлан авч үзсэн.

II. УЛААНБААТАР ХОТЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН СИСТЕМИЙН 1,2-Р ХЭЛХЭЭНИЙ ТООЦООТ БОЛОН БОДИТ ТЕМПЕРАТУР

Дулаан түгээлтийн температурын график нь тухайн газар орны онцлогоос хамаарч янз бүр бөгөөд түүнийг дулаан хангамжийн системийн техник эдийн засгийн тооцоог үндэслэн хот суурин газрын гадна агаарын температурын тооцоот утгаар сонгосон температурын графикт нийцүүлэн сүлжээний өгөх, буцах усны температурыг тодорхойлж болно [1]. Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн хувьд ДЦС-2, ДЦС-3, ДЦС-4, АДС гэх 4 эх үүсгүүрээс хэрэглэгчдийг дулааны эрчим хүчээр хангадаг бөгөөд 1 дүгээр хэлхээнд 150/70, 2 дугаар хэлхээнд 105/65, 95/65-ын температурын графикийг тус тус мөрдөж ажиллаж байна.



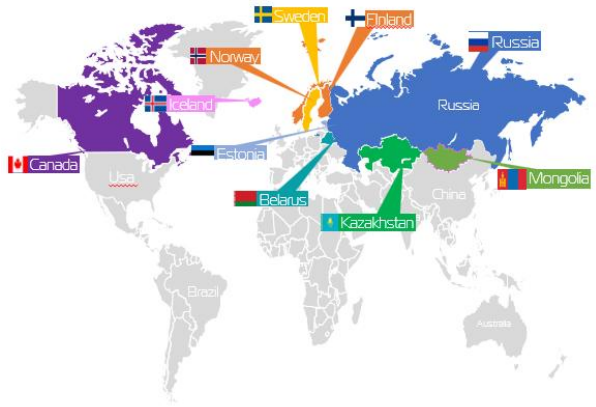
1-р зураг. Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн горим ажиллагааны схем



2-р зураг. Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн 2025оны сүлжээний усны зарцуулалт т/ц

2025-2026 оны халаалтын улиралд эх үүсгүүрүүдийн сүлжээний усны хамгийн их хоногийн дундаж зарцуулалт нь 1-р сард авч ажилласан бөгөөд үед гадна агаарын температурын бууралт болон хэрэглэгчдийн дулааны хэрэглээ нэмэгдсэнтэй холбоотойгоор уг үзүүлэлт нь өмнөх онтой харьцуулахад 1992 т/ц-аар өссөн байна. Мөн эх үүсгүүрүүдийн боломжит хүчин чадал нь цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний хязгаарлалтаас шалтгаалан тооцоот горимд бүрэн хүрч ажиллах боломж хангалтгүй байгаа нь ажиглагдсан. Үүний улмаас сүлжээний усны температурыг тооцоот горимын түвшинд барих боломж хязгаарлагдаж байна. Жилийн гадна агаарын дундаж температур хамгийн хүйтэн улс орнуудын туршлагаас үзэхэд

дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг хангахын тулд температурын горимыг уян хатан тохируулах, эх үүсгүүрийн хүчин чадлыг оновчтой ашиглах, мөн бага температурын горимд шилжих шийдлүүдийг хэрэгжүүлэх хандлага ажиглагдаж байна.

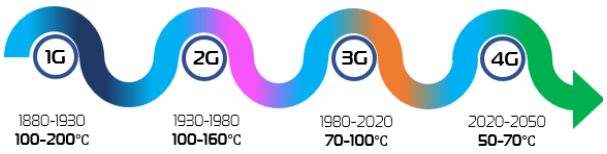


3-р зураг Жилийн дундаж температур хамгийн хүйтэн уур амьсгалтай улс орнууд

ХАМГИЙН ХҮЙТЭН 10 ОРНЫ ГАДНА АГААР, 2-Р ХЭЛХЭЭНИЙ ТЕМПЕРАТУР

1-Р ХҮСНЭГТ

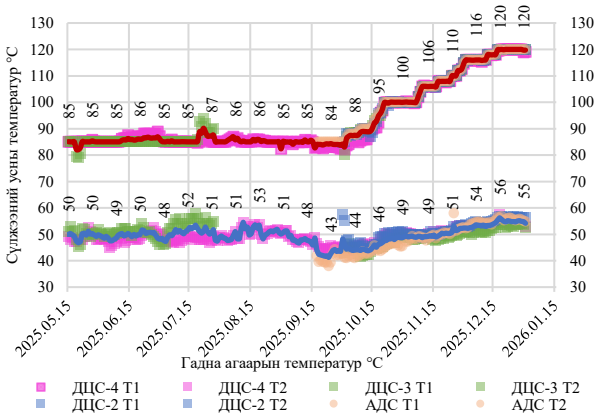
№	Улс	Жилийн avg temp (°C)	1-р хэлхээ (Supply/ Return) °C	2-р хэлхээ (Supply/ Return) °C
1	Канад	-5.35	120 / 60	95 / 70
2	Орос	-5.10	150 / 70	95 / 70
3	Монгол	-0.70	150 / 70	95 / 65
4	Норвеги	1.50	90 / 50	90 / 65
5	Финланд	1.75	90 / 50	90 / 65
6	Исланд	1.75	80 / 40	85 / 60
7	Швед	2.10	80–100/40–50	85 / 60
8	Казахстан	5.50	130 / 70	85 / 60
9	Беларус	5.50	120 / 70	85 / 60
10	Эстони	5.80	90 / 50	80 / 55



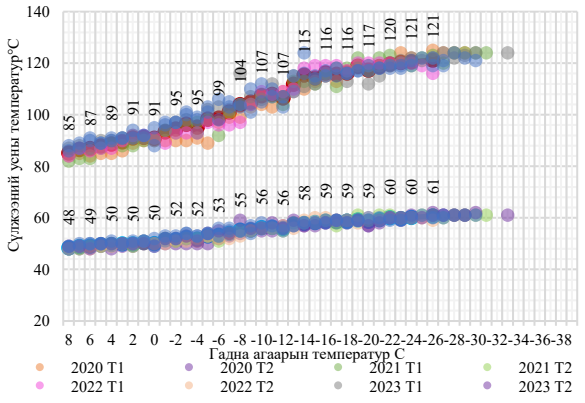
4-р зураг Дулаан хангамжийн системийн температурын түвшин болон технологийн хөгжил

Дулаан хангамжийн системийг температурын түвшин болон технологийн хөгжлөөр нь 4 үе шат (generation) гэж ангилдаг. Үүнийг “District Heating Generations” гэж нэрлэдэг бөгөөд Европын дулаан хангамжийн судалгаанд өргөн хэрэглэгддэг [9]. Сүүлийн жилүүдэд дэлхийн улс орнууд сүлжээний усны температурыг буурууллах, шугамын дулаан алдагдлыг багасгах насосны цахилгаан зарцуулалтыг багсгах, сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг нэвтрүүлэхийг зорьж бага температурт суурилсан дулаан хангамжийн систем буюу дөрөвдүгээр үеийн дулаан хангамжийн систем рүү чиглэж өөрчлөлт оруулж байна.

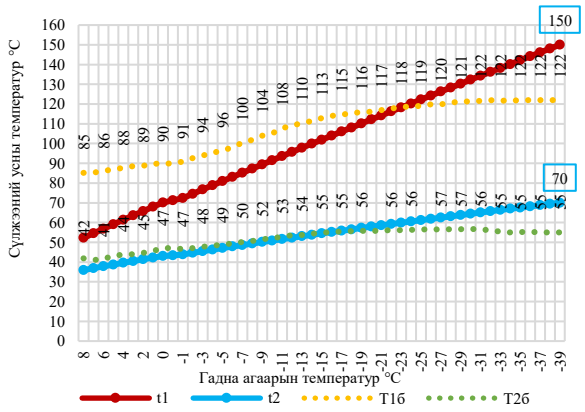
Улаанбаатар хотын хувьд горим ажиллагааны өнөөгийн байдлыг авч үзвэл:



5-р зураг 2025-2026-оны халаалтын улиралд Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системд эх үүсгүүрүүдийн барьж ажилласан сүлжээний усны температур, °C

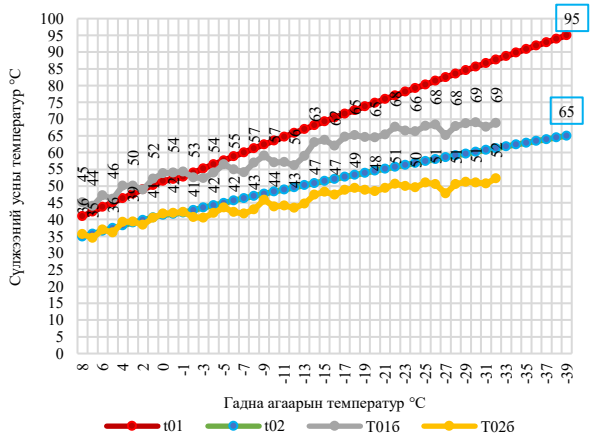


6-р зураг Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системд эх үүсгүүрүүдийн барьж ажилласан сүүлийн 5 жилийн сүлжээний усны температур, °C



7-р зураг 1-р хэлхээний температурын тооцоот график сүлжээний бодит температурын харьцуулалт, °C

2025-2026 оны халаалтын улиралд эх үүсгүүрийн боломжит хүчин чадлаас хамааран 1-р хэлхээний температурыг тооцоот утгаас 28℃-ээр доогуур буцах усны температурыг 10-15 ℃ -ээр доогуур барьж ажиллаж байгаа нь харагдаж байна.



8-р зураг 2-р хэлхээний температурын тооцоот график сүлжээний бодит температурын харьцуулалт, °C

Халаах хэрэгслийн талбай болон сүлжээний усны зарцуулалт тооцоот утгаас зөрүүтэй үеийн тооцооны аргачлал. Хамааралгүй схемтэй хэрэглэгчийн сүлжээний усны өгөх буцах температурыг $G_0^{'} \neq G_0; F_0^{'} \neq F_0$ үед томьёо (1,2) тодорхойлно.

$$\tau_{02} = t_{вр} + \square t_0^{'} \cdot \left(\frac{\overline{Q}_0}{\overline{\overline{F}}_0} \right)^{0.8} - \theta^{'} \cdot \frac{\overline{Q}_0^{'}}{\overline{\overline{G}}_0} \qquad (1)$$

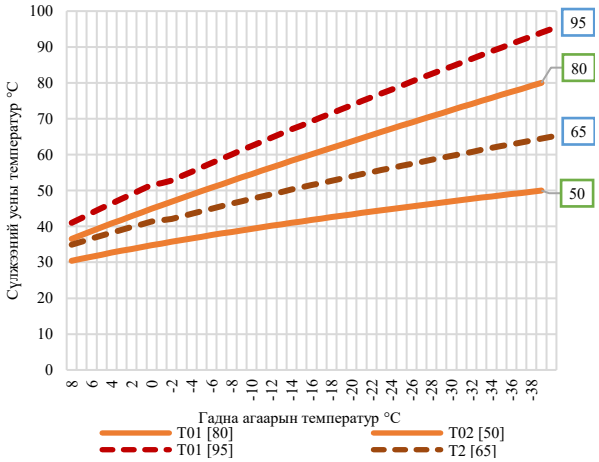
$$\tau_{01} = t_{вр} + \square t_0^{'} \cdot \left(\frac{\overline{Q}_0}{\overline{\overline{F}}_0} \right)^{0.8} + (\delta\tau_0 - \theta^{'}) \cdot \frac{\overline{Q}_0}{\overline{\overline{G}}_0} \qquad (2)$$

2-Р ХЭЛХЭЭНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫН ГРАФИК

2-Р ХҮСНЭГТ

2-р хэлхээ							
tr	**Qx**	**τ 01**	**τ 02**	**tr**	**Qx**	**τ 01**	**τ 02**
8	0.2	36	31	-16	0.6	58	42
7	0.2	37	31	-17	0.6	59	43
6	0.2	38	32	-18	0.6	60	43
5	0.3	39	32	-19	0.7	61	44
4	0.3	40	33	-20	0.7	62	44
3	0.3	41	33	-21	0.7	63	44
2	0.3	42	34	-22	0.7	63	45
1	0.3	43	34	-23	0.7	64	45
0	0.3	44	35	-24	0.7	65	46
-1	0.4	45	36	-25	0.8	66	46
-2	0.4	46	36	-26	0.8	67	46
-3	0.4	47	37	-27	0.8	68	47
-4	0.4	48	37	-28	0.8	68	47
-5	0.4	49	37	-29	0.8	69	47
-6	0.4	49	38	-30	0.8	70	48
-7	0.5	50	38	-31	0.9	71	48
-8	0.5	51	39	-32	0.9	72	49
-9	0.5	52	39	-33	0.9	72	49
-10	0.5	53	40	-34	0.9	73	49
-11	0.5	54	40	-35	0.9	74	50
-12	0.5	55	41	-36	0.9	75	50
-13	0.6	56	41	-37	1.0	76	50
-14	0.6	57	42	-38	1.0	76	51
-15	0.6	57	42	-39	1.0	77	51

Дээрх тооцооллын дагуу 2-р хэлхээний температурын утгыг 95/65°C-аас 80/50°C графикаар тодорхойлох нь тохиромжтой харагдаж байгаа бөгөөд 2-р хэлхээний бодит утгатай ойролцоо гарч байна.



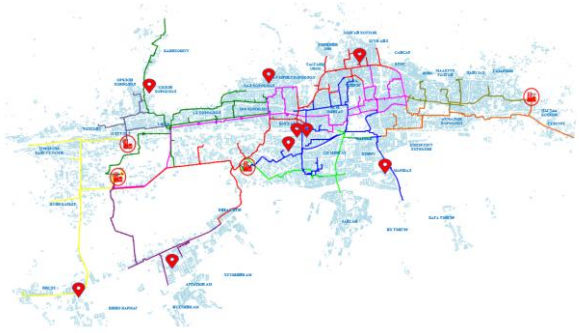
9-р зураг 95/65 80/50-ын температурын графикийн харьцуулалт, °C

Сүлжээний усны зарцуулалт болон барилгын халаах хэрэгслийн талбайн хэмжээ нь тооцоот утгаас тодорхой хэмжээгээр зөрүүтэй байгааг харгалзан температурын графикийн тооцооллыг тухайн нөхцөлд тохирох томьёоны гаргалгааны дагуу дахин тооцооллоо. Тооцооллын үр дүнд 2-р хэлхээний сүлжээний усны температурын утга 77/51 °C гарсан бөгөөд үүнтэй ойролцоо, практикт хэрэглэхэд тохиромжтой температурын график нь 80/50 °C гэж үзэж байна. Иймд 2-р хэлхээний температурын горимыг 80/50 °C-ийн температурын графикаар тооцох нь илүү үндэслэлтэй гэж дүгнэв.

III. ОРОН СУУЦНЫ ДОТОР АГААРЫН ТЕМПЕРАТУРЫН БОДИТ УТГЫН СУДАЛГАА

Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системд эрчим хүчний үр ашиггүй хэрэглээг багасгах, горим ажиллагааны тогтворжилтын түвшнийг нэмэгдүүлэхийн тулд барилгын дотор агаарын температурыг зохистой түвшинд тохируулах, дулааны илүүдэл хэрэглээг бууруулах нь айл өрхийн зардлыг хэмнэхээс гадна нийт эрчим хүчний системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх стратегийн чухал ач холбогдолтой.

Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулаан хангамжид холбогдсон орон сууцны дотор агаарын температур, харьцангуй чийглэгийн бодит утгыг хэмжилтээр тодорхойлж, тэдгээрийг олон улсын болон үндэсний стандарттай харьцуулах, улмаар дотор орчны температурыг зохистой түвшинд тохируулах нь дулааны эрчим хүчний хэмнэлт болон эрчим хүчний системийн үр ашигт ямар нөлөө үзүүлэхийг үнэлэхийг тодорхойлно. Судалгааны үр дүн нь хэрэглэгч, хангагч байгууллага болон бодлого боловсруулагчдад дотор орчны температурыг удирдах, дулааны эрчим хүчийг үр ашигтай ашиглах чиглэлээр бодитой санал, зөвлөмж боловсруулах суурь болох юм.



10-р зураг Хэмжилт хийсэн байршил, Харьцангуй чийглэгийн тохиромжтой утга:

Судалгааны явцад дотор агаарын температураас гадна харьцангуй чийглэгийн утга бага байгаа нь ажиглагдсан. Бидний мөрдөж буй “Барилгын норм ба дүрэм”-д дараах байдлаар дурдсан байна [3].

БАРИЛГЫН ӨРӨӨ ТАСАЛГААНЫ ЧИЙГЛЭГИЙН ГОРИМ

3-Р ХҮСНЭГТ

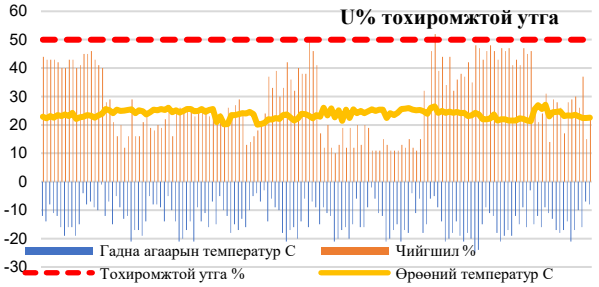
Горим	**Температурт харгалзах дотор агаарын чийглэг**		
	12 хүртэл	**12-24**	**24-өөс дээш**
Хуурай	60 хүртэл	50хүртэл	40 хүртэл
Ердийн	60-75	50-60	40-50
Чийгтэй	75-аас дээш	60-75	50-60
Нойтон	-	75-аас дээш	60-аас дээш

Дийлэнх эх сурвалжуудад 40-60% байвал тохиромжтойг зөвлөдөг. Бид хуурай орчинд богино хугацаанд байж болох ч урт хугацаанд нүд, хамар, хоолой, арьс хуурайших эсвэл цочрох зэрэг эмгэгүүд, тэр ч байтугай толгой өвдөх, амьсгалын замын болон арьсны өвчин, харшил нэмэгдэх зэрэгт хүргэж болзошгүй юм. Харин халааltын улиралд өрөө тасалгааны харьцангуй чийглэг багасдаг нь 4 улиралтай бүх орнуудад асуудал болдог[5].

ХЭМЖИЛТИЙН ОГНОО, ХАРГАЛЗАХ УТГУУД, ГАДНА ОРЧНЫ ТЕМПЕРАТУР

4-Р ХҮСНЭГТ.

№	**Байршил**	**Гадна агаарын температур ℃**	**Чийгшил %**	**Өрөөний температур ℃**	**Дотор агаарын чийглэг**
1	СБД 10-р хороо 46-р байр	-11.6	42.5	23.1	Хуурай
2	Арвай вилла	-11.9	19.7	24.9	Хуурай
3	21-р хороолол	-12.8	23.0	25.1	Хуурай
4	УБДС ТӨХК	-9.6	19.2	20.1	Хуурай
5	3.4-р хороолол	-13.1	38.3	22.8	Хуурай
6	Нисэхийн тойрог	-14.5	15.6	24.2	Хуурай
7	Дөрвөн улирал хотхон	-13.0	11.8	24.5	Хуурай
8	River stone	-16.6	40.0	24.4	Хуурай
9	King tower	-13.7	25.1	24.0	Хуурай
10	100 айл	-14.0	44.9	22.0	Хуурай
	Дундаж	**-13.1**	**28.0**	**23.5**	Хуурай



11-р зураг Харьцангуй чийглэгийн тохиромжтой болон бодит утгын харьцуулалт

IV. УЛААНБААТАР ХОТЫН ТӨВЛӨРСӨН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН СИСТЕМИЙГ 150/55 °С, 135/55, 80/50°С-ИЙН ГРАФИКТ ШИЛЖҮҮЛСНЭЭР ГАРАХ ҮР ДҮН

150/55ºС графикт нэгж дулаан түгээхэд шаардагдах сүлжээний усны хувийн зарцуулалтыг томьёо (3) тодорхойлно.

$$g_A = \frac{1\cdot 10^3}{1.005\cdot(150-55)} = 10.52\frac{m}{Гкал} \qquad (3)$$

150/70ºС графикт нэгж дулаан түгээхэд шаардагдах сүлжээний усны хувийн зарцуулалтыг томьёо (4) тодорхойлно.

$$g_Б = \frac{1\cdot 10^3}{1.005\cdot(150-70)} = 12.5\frac{m}{Гкал} \qquad (4)$$

$\frac{G_A}{G_Б} = \frac{10.52}{12.5} = 0.84$ зарцуулалт өмнөхөөс 16%-аар буурна.

$$\frac{g_A}{g_Б} = \sqrt{\frac{\Delta H_A}{\Delta H_Б}} \Rightarrow \frac{\Delta H_A}{\Delta H_Б} = \left(\frac{g_A}{g_Б}\right)^2 = \left(\frac{37899}{44894}\right)^2 = 0.71$$

Сүлжээний даралтын уналт нь **29%**-аар буурч байна.

$$\frac{g_A}{g_Б} = \sqrt{\frac{\Delta H_A}{\Delta H_Б}} = \sqrt[3]{\frac{\Delta N_A}{\Delta N_Б}} \Rightarrow \frac{\Delta N_A}{\Delta N_Б} = \left(\frac{g_A}{g_Б}\right)^3 = \left(\frac{37899}{44894}\right)^3 = 0.6$$

Дээрх тооцооны дагуу сүлжээний насосонд шаардагдах цахилгааны зардал 40%-аар буурахаар байна.

Шугам хоолойгоор алдах дулаан нь сүлжээний усны температураас шууд хамаарна. Дулааны алдагдлын хэмжээг томьёо (5) тодорхойлно.

$$Q_{д.а} = \left(1 - \left(\frac{\tau_A - t_Г^{дун}}{\tau_Б - t_Г^{дун}}\right)\right)\cdot 100 \qquad (5)$$

ДУЛААН АЛДАГДАЛ БУУРАЛТЫН ХҮЧНЭГТ

5-Р ХҮСНЭГТ

Гадна агаарын температур	1-р хэлхээ (150/55)		2-р хэлхээ (80/50)		1-р хэлхээ (135/55)	
	Өгөх шугамын дулаан алдагдлын бууралт	Буцах шугамын дулаан алдагдлын бууралт	Өгөх шугамын дулаан алдагдлын бууралт	Буцах шугамын дулаан алдагдлын бууралт	Өгөх шугамын дулаан алдагдлын бууралт	Буцах шугамын дулаан алдагдлын бууралт
8	2.3	9.8	8.8	10.0	7.2	9.8
7	2.3	10.2	9.1	10.4	7.4	10.2
6	2.2	10.5	9.4	10.8	7.5	10.5
5	2.2	10.9	9.6	11.2	7.7	10.9
4	2.1	11.2	9.9	11.5	7.8	11.2
3	2.1	11.6	10.1	11.9	7.9	11.6
2	2.0	11.9	10.3	12.2	8.0	11.9
1	2.0	12.2	10.5	12.5	8.1	12.2
0	1.9	12.4	10.7	12.8	8.2	12.4
-1	1.8	12.7	10.9	13.1	8.3	12.7
-2	1.8	13.0	11.1	13.4	8.4	13.0
-3	1.7	13.2	11.2	13.7	8.5	13.2
-4	1.7	13.5	11.4	14.0	8.5	13.5
-5	1.6	13.7	11.6	14.2	8.6	13.7
-6	1.6	13.9	11.7	14.5	8.7	13.9
-7	1.5	14.1	11.8	14.7	8.7	14.1
-8	1.4	14.3	12.0	14.9	8.8	14.3
-9	1.4	14.5	12.1	15.2	8.8	14.5
-10	1.3	14.7	12.2	15.4	8.8	14.7
-11	1.3	14.9	12.3	15.6	8.9	14.9
-12	1.2	15.1	12.4	15.8	8.9	15.1
-13	1.2	15.3	12.5	16.0	9.0	15.3
-14	1.1	15.5	12.6	16.2	9.0	15.5
-15	1.1	15.6	12.7	16.4	9.0	15.6
-16	1.0	15.8	12.8	16.6	9.0	15.8
-17	1.0	16.0	12.9	16.8	9.1	16.0
-18	0.9	16.1	13.0	16.9	9.1	16.1
-19	0.9	16.3	13.1	17.1	9.1	16.3
-20	0.8	16.4	13.2	17.3	9.1	16.4
-21	0.8	16.6	13.2	17.5	9.2	16.6
-22	0.7	16.7	13.3	17.6	9.2	16.7
-23	0.7	16.9	13.4	17.8	9.2	16.9
-24	0.6	17.0	13.4	17.9	9.2	17.0
-25	0.6	17.1	13.5	18.1	9.2	17.1
-26	0.5	17.3	13.6	18.2	9.2	17.3
-27	0.5	17.4	13.6	18.4	9.3	17.4
-28	0.5	17.5	13.7	18.5	9.3	17.5
-29	0.4	17.6	13.8	18.7	9.3	17.6
-30	0.4	17.7	13.8	18.8	9.3	17.7
-31	0.3	17.9	13.9	19.0	9.3	17.9
-32	0.3	18.0	13.9	19.1	9.3	18.0
-33	0.2	18.1	14.0	19.2	9.3	18.1
-34	0.2	18.2	14.0	19.4	9.3	18.2
-35	0.2	18.3	14.1	19.5	9.3	18.3
-36	0.1	18.4	14.1	19.6	9.3	18.4
-37	0.1	18.5	14.2	19.7	9.4	18.5
-38	0.0	18.6	14.2	19.9	9.4	18.6
-39	0.0	18.7	14.3	20.0	9.4	18.7
Д	**1.1**	**15.2**	**12.4**	**16.0**	**8.8**	**15.2**

Шугам хоолойгоор алдагдах дулааны хэмжээ нь сүлжээний усны температураас шууд хамааралтай байдаг. 1-р хэлхээний температурын графикийг 150/70 ºС-аас 150/55 ºС-ын графикт шилжүүлэхэд дулааны алдагдал 16.3%-иар буурах боломжтой. Харин 135/55 ºС-ын графикт шилжүүлснээр дулааны алдагдал 24%-иар буурна. Мөн 2-р хэлхээний температурын графикийг 95/70 ºС-аас 80/50 ºС болгон бууруулахад шугам сүлжээний дулааны алдагдал 28.4%-иар буурах боломжтой байна.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажил нь сүлжээний усны бодит температурын утгыг тооцоот температурын графиктай харьцуулах замаар сүлжээний усны температурын тохиромжтой утгыг тодорхойлох зорилготой. Судалгааны хүрээнд Улаанбаатар хотын дулаан хангамжийн системийн сүлжээний усны температурын бодит утгыг сүүлийн 5 жилийн горим ажиллагааны бодит параметрүүдтэй харьцуулан шинжилгээ хийж дүгнэлт гаргасан.

Судалгааны үр дүнгээс харахад сүлжээний усны бодит температур нь эх үүсгүүрийн боломжит хүчин чадал, 2-р хэлхээний гидравлик тогтворжилт, барилгын хаших хийц болон халаах хэрэгслийн техникийн байдлаас хамаарч тооцоот температурын утгаас 19–27%-иар бага байгааг тогтоосон. Иймд сүлжээний усны тооцоот температурын утгыг боломжит түвшин хүртэл бууруулах тохиолдолд шугам хоолойгоор алдагдах дулааны алдагдлыг 16–28%-иар, сүлжээний усны зарцуулалтыг 16%-иар, мөн сүлжээний насосонд шаардагдах цахилгаан эрчим хүчний зардлыг 40 хүртэлх хувиар бууруулах боломжтой гэсэн тооцооны үр дүн гарсан.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Б.Намхайням. Дулаан хангамжийн систем. Улаанбаатар хот. 2019он

[2] Барилгын дулаан хамгаалалт БНбД 25-01-20 Улаанбаатар хот 2020он

[3] Ирээдүйн эрчим хүчний манлайлагчид хөтөлбөр - Орон сууцны дотор агаарын температурын бодит утгын судалгаа Улаанбаатар хот 2026 он

[4] Дулааны эрчим хүчний алдагдлыг бууруулах компанийн эдийн засгийн үзүүлэлт дээшлүүлэх Улаанбаатар хот 2022он

[5] “EN 16798-1 | Energy performance of buildings – Ventilation for buildings,” CEN, 2019.

[6] Experimental study of energy performance in low-temperature hydronic heating systems

[7] Heat emission from thermal skirting boards Build. Environ.(2010)

[8] Thermo-economic optimization of secondary distribution network of low temperature district heating network under local conditions of South Korea

[9] 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems

[10] The Status of 4th Generation District Heating: Research and Results

[11] Annex TS1 Low Temperature District Heating for Future Energy System

[12] Study on the Indoor Thermal Environment of Traditional Residences in Southern Jiangsu—A Case Study of Xue Fucheng’s Former Residence, Wuxi City

НАР, САЛХИ, БАТАРЕЙ ХОСОЛМОЛ СИСТЕМИЙН ОНОВЧЛОЛ

Энхбаатар ЖАВХЛАНТӨГС[1], Гансүх МӨНГӨНШАГАЙ[1]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Шинэ, Сэргээгдэх эрчим хүчний тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: mungunshagai@must.edu.mn[1]

Хураангуй: **Дэлхий даяар эрчим хүчний хэрэглээ өсөн нэмэгдэж, уур амьсгалын өөрчлөлт болон нүүрстөрөгчийн ялгарлыг бууруулах шаардлага нэмэгдэж байгаатай холбоотойгоор сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг ашиглах хэрэгцээ эрчимтэй өсөж байна. Нар болон салхины эрчим хүч нь байгальд ээлтэй, бараг шавхагдашгүй нөөцтэй боловч цаг агаар, улирлын нөхцөлөөс хамааран үйлдвэрлэл нь хэлбэлздэг сул талтай байдаг. Иймээс эрчим хүчний найдвартай хангалтыг сайжруулахын тулд эдгээр эх үүсвэрүүдийг батарейн хуримтлуурын системтэй хослуулсан хосолмол сэргээгдэх эрчим хүчний системийг ашиглах нь үр дүнтэй шийдэл болдог. Энэхүү судалгааны зорилго нь нарны цахилгаан үүсгүүр, салхины турбин болон батарейн хуримтлуурын системээс бүрдэх хосолмол системийн оновчтой хүчин чадлыг тодорхойлох явдал юм. Судалгаанд симуляцад суурилсан оновчлолын арга (Simulation-based Optimization) ашиглаж, System Advisor Model (SAM) программыг хэрэглэн системийн ажиллагааг загварчилсан. Судалгаанд Говь-Алтай аймгийн Есөнбулаг сумын Хан-Алтай ордын бүс нутгийн нарны тусгал болон салхины хурдны бодит хэмжилтийн өгөгдлийг ашигласан. Нарны цахилгаан станц болон салхины цахилгаан станцын хүчин чадлыг тус бүр 1–10 МВт-ын хооронд авч нийт 100 өөр хувилбарын симуляцын тооцооллыг хийж харьцуулсан. Оновчлолын зорилтот функцэд эрчим хүчний тэгшитгэсэн өртөг (LCOE), системийн нийт зардал (NPC), эрчим хүчний балансыг харгалзан үзсэн. Симуляцын үр дүнгээс үйлдвэрийн жилийн 24.4 сая кВт.ц цахилгаан хэрэглээг хангах боломжтой гурван оновчтой системийн хувилбар тодорхойлогдсон. Үүнээс 8 МВт нарны цахилгаан станц болон 4 МВт салхины цахилгаан станцын хослол нь хамгийн бага эргэн төлөгдөх хугацаатай буюу 5.76 жил бол 6 МВт нарны цахилгаан станц болон 6 МВт салхины цахилгаан станцын хослол нь хамгийн их эргэн төлөгдөх хугацаатай буюу 8.08 жил байна. Судалгааны үр дүн нь нар–салхи–батарей хосолмол системийг оновчтой төлөвлөх замаар эрчим хүчний найдвартай байдлыг нэмэгдүүлэх, сэргээгдэх эрчим хүчний ашиглалтыг өсгөх, мөн системийн эдийн засгийн үр ашгийг дээшлүүлэх боломжтойг харуулж байна.**

Түлхүүр үг: Сэргээгдэх эрчим хүч, Симуляц, Эдийн засгийн үнэлгээ, Эрчим хүчний баланс

I. ОРШИЛ

Дэлхий даяар эрчим хүчний хэрэглээ эрчимтэй өсөж, уур амьсгалын өөрчлөлт, нүүрстөрөгчийн ялгарлын асуудал нэмэгдэж байгаатай холбоотойгоор сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг өргөнөөр ашиглах шаардлага улам бүр нэмэгдэж байна. Нарны болон салхины эрчим хүч нь хамгийн өргөн ашиглагддаг сэргээгдэх эх үүсвэрүүдийн нэг бөгөөд байгальд ээлтэй, бараг шавхагдашгүй нөөцтэй давуу талтай. Гэвч эдгээр эх үүсвэрүүд нь тасралттай бус (intermittent) шинж чанартай бөгөөд цаг агаар, улирал болон газарзүйн нөхцөлөөс ихээхэн хамааралтай байдаг. Иймээс зөвхөн нэг төрлийн сэргээгдэх эх үүсвэр ашиглах нь эрчим хүчний тасралтгүй, найдвартай хангалтыг хангахад хүндрэл үүсгэдэг [1].

Энэхүү асуудлыг шийдвэрлэх нэг үр дүнтэй арга бол хосолмол сэргээгдэх эрчим хүчний систем (Hybrid Renewable Energy System – HRES) юм. Хосолмол систем нь хоёр ба түүнээс олон төрлийн эрчим хүчний эх үүсвэрийг (жишээлбэл нарны PV, салхины турбин) энерги хадгалах төхөөрөмжтэй (батарей, устөрөгчийн систем гэх мэт) хослуулан ашиглах замаар эрчим хүчний үйлдвэрлэлийн тогтвортой байдлыг сайжруулдаг. Ийм систем нь эх үүсвэрүүдийн үйлдвэрлэлийн хэлбэлзлийг бууруулж, эрчим хүчний нийлүүлэлтийн найдвартай байдлыг нэмэгдүүлдэг [2].

Нар болон салхины эх үүсвэрүүдийг хослуулах нь энергийн үйлдвэрлэлийн хэлбэлзлийг тодорхой хэмжээнд нөхөх боломжтой. Жишээлбэл, нарны эрчим хүч ихэвчлэн өдрийн цагаар үйлдвэрлэгддэг бол салхины хурд шөнө болон улирлын зарим үед илүү өндөр байдаг. Энэ хоёр эх үүсвэрийг батарейн хуримтлуурын системтэй хослуулах нь илүүдэл энергийг хадгалж, үйлдвэрлэл багатай үед хэрэглээнд нийлүүлэх боломжийг бүрдүүлдэг. Ингэснээр эрчим хүчний системийн найдвартай байдал болон ашиглалтын үр ашиг нэмэгддэг [3].

Гэсэн хэдий ч хосолмол системийг төлөвлөхөд хэд хэдэн хүндрэлтэй асуудлууд гардаг [4] [5]. Үүнд:

- системийн бүрэлдэхүүн хэсгүүдийн оновчтой хүчин чадлыг тодорхойлох,
- системийн нийт зардлыг бууруулах,
- эрчим хүчний найдвартай байдлыг хангах,
- сэргээгдэх эх үүсвэрийн хувь хэмжээг нэмэгдүүлэх зэрэг асуудлууд багтана.

Иймээс нар–салхи–батарей хосолмол системийн оновчлол нь техникийн, эдийн засгийн болон хүрээлэн буй орчны шалгуур үзүүлэлтүүдийг нэгэн зэрэг харгалзан үзэх шаардлагатай судалгааны чухал чиглэл болж байна. Орчин үеийн судалгаанд генетик алгоритм (GA), particle swarm optimization (PSO), grey wolf optimizer (GWO) зэрэг мета-эвристик алгоритмуудыг ашиглан системийн оновчтой бүтцийг тодорхойлох арга өргөн хэрэглэгдэж байна [6] [7] [8]. Сэргээгдэх эрчим хүчний систем нь цаг агаарын тодорхойгүй хүчин зүйлс болон техникийн нарийн хамааралуудаас шалтгаалан шууд математик аналитик аргаар бодоход төвөгтэй байдаг. Иймд системийн бодит ажиллагааг цаг тутам (8760 цаг)

загварчлах чадвартай System Advisor Model (SAM) программыг ашиглан симуляц хийж, гарсан үр дүнг үндэслэн оновчлол хийх нь илүү бодит бөгөөд нарийвчлалтай үр дүн өгдөг. Энэхүү судалгаанд сэргээгдэх эрчим хүчний хосолсон системийн хүчин чадлыг оновчлохын тулд симуляцад суурилсан оновчлол (Simulation-based Optimization - SBO) аргыг ашигласан [9].

Иймээс энэхүү судалгааны нь нарны цахилгаан үүсгүүр, салхины турбин болон батарейн хуримтлуурын системээс бүрдэх хосолмол системийн оновчтой параметрүүдийг тодорхойлох, улмаар хамгийн бага өртөгтэй, эрчим хүчний найдвартай байдлыг хангах системийг гаргахад оршино.

II. СИМУЛЯЦАД СУУРИЛСАН ОНОВЧЛОЛЫН АРГА (SIMULATION-BASED OPTIMIZATION - SBO)

1. Оновчлолын үйл явц (Optimization Process)

Оновчлолын үйл явц нь дараах үндсэн гурван үе шаттай:

Симуляцын загварчлал: Тухайн байршлын нарны тусгал, салхины хурдны өгөгдөл болон системийн техникийн үзүүлэлтүүдийг (Нарны цахилгаан станц (НЦС): 1–10МВт, Салхин цахилгаан станц (СЦС): 1–10МВт) SAM программд оруулж, системийн симуляц хийнэ.

Зорилтот функц: Оновчлолын гол зорилго нь системийн LCOE (Levelized Cost of Energy) буюу эрчим хүчний өртгийг хамгийн бага (Minimize) байлгах, LPSP (Loss of Power Supply Probability) буюу эрчим хүчний тасалдал үүсэх магадлалыг бага байлгах, Эргэн төлөгдөх хугацаа (Payback period) хамгийн бага байлгахад чиглэнэ.

Параметрийн шинжилгээ ба хайлт: Симуляцын үр дүнгүүдийг боловсруулж, боломжит бүх хувилбаруудаас зорилтот функцийг хангаж буй "Оновчтой цэг"-ийг (Optimal Point) тодорхойлно.

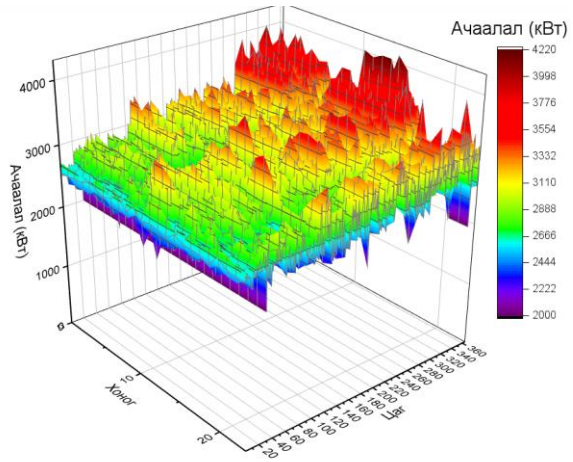
III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

1. Өгөгдөл цуглуулах

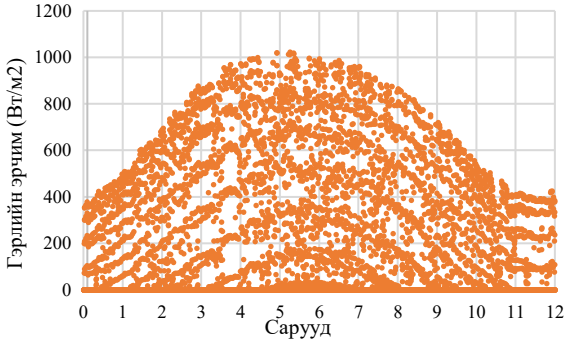
А. Ачааллын болон нар, салхины нөөц

Цахилгаан ачаалал: Говь-Алтай аймгийн Есөнбулаг сумын нутаг орших уурхайн үндсэн орд нь Говь-Алтай аймгийн төвөөс 95 км-т, Бигэр сумаас баруун хойш 50 км-т, Улаанбаатар хотоос баруун тийш 1000 км зайд 6793.28 га талбайг хамран байрладаг бөгөөд солбицол нь 46°04, 96°52 юм. Уурхайн жилийн цахилгаан ачаалал 24,419.984 мян.кВт.цаг (1-р хүснэгт). Хамгийн их хоногийн хэрэглээ 4220 кВт (1-р зураг).

Нарны нөөц: SAM нь НЦҮ, салхи, батарейны системийг загварчлахад ашигласан. National Solar Radiation Database (NSRDB) ID:3010279 (өргөрөг: 46°04, уртраг: 96°52) дугаартай станцын цаг агаарын мэдээллийг ашигласан. Хэвтээ гадаргууд тусах нарны гэрлийн эрчимийн графикийг 2-р зураг үзүүлэв.

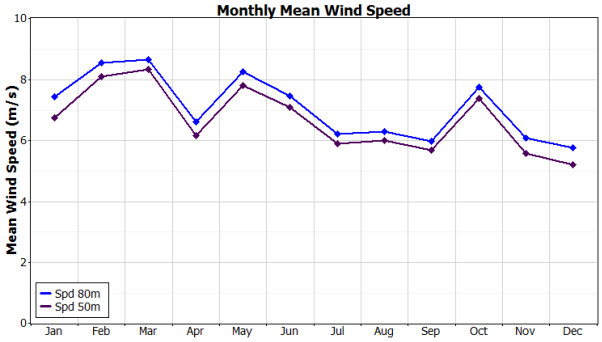


1-р зураг. Жилийн дундаж хоногийн график цагаар.



2-р зураг. Хэвтээ гадаргууд тусах гэрлийн эрчим (Вт/м2).

Салхины нөөц: Судалгааны газрын салхины нөөцийн үнэлгээг хийхдээ тус бүс нутагт суурилуулсан цаг уурын станцын 48м өндөрт 2020 оны 3-р сарын 28-наас 2021 оны 7-р сарын 21-ны өдөр хүртэлх, 10 минут тутамд дунджилж хэмжсэн салхины хурд, салхины чиглэлийн 69264 мөр өгөгдлийг цуглуулж, нөөцийн үнэлгээний тооцоонд ашигласан. Хэмжилтийн анхны өгөгдөлд математик боловсруулалт хийж SAM программын салхины өгөгдлийн файл руу хөрвүүлсэн. 50 м ба 80 м тооцсон салхины сарын дундаж хурдны графикийг 3-р зураг үзүүлэв. 50 м өндөрт салхины нөөц 4.7 м/с-ээс 8.6 м/с хүртэл, дундаж утга нь 6.65 м/с байна.



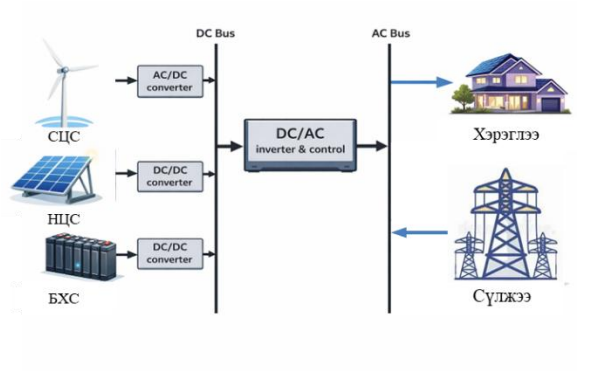
3-р зураг. Жилийн дундаж салхины хурдны муруй.

ЦАХИЛГААН ХЭРЭГЛЭЭ

1-Р ХҮСНЭГТ.

№	Үйлдвэрийн цахилгааны ачаалал (мян.кВт.цаг)
1	1,939.715
2	1,804.590
3	1,959.612
4	1,927.363
5	1,941.911
6	1,966.842
7	2,045.016
8	2,127.671
9	2,028.199
10	2,206.231
11	2,217.500
12	2,255.334
Жилийн хэрэглээ, мян.кВт.цаг	24,419.984

В. Төхөөрөмжийн параметрүүд



4-р зураг. Хосолмол системийн загвар схем

Хосолмол системийн угсарч суурилуулах өртөг харилцан адилгүй байдаг. Судалгаанд ашигласан өртгийн хэмжээ нь НЦС-ын өртөг 0.29 $/Вт, СЦС-ын өртөг 1.7843 $/Вт, БХС-ын өртөг 0.67 $/Вт байна.

Хосолмол системийн НЦС-ын хэсэгт 600Wp Half Cell нарны зайтай N-төрөл TOPCon хоёр талт GSM-MT4/144-BTDG600 НЦУ модулийг ашиглана. Энэхүү модулийн үндсэн үзүүлэлтүүдийг доор үзүүлэв.

- N-төрлийн хоёр талт (Bi-facial)
- Модулийн АҮК: 23. 23 %
- Бүтээгдэхүүний баталгаа: 15 жил
- Ашигт үйлийн коэффициент нь огцом буурахгүй, 30 жилийн турш шугаман бууралттай
- 25 жилээс цааших жилийн бууралт: ≤0.4%
- Холболтын хайрцгийн хамгаалалтын зэрэглэл: IP 68
- Хэмжээ: 2278×1134×30 мм

ИНВЕРТЕРИЙН ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

2-Р ХҮСНЭГТ.

№	Үзүүлэлт	Нэгж	Техникийн үзүүлэлт
1	Хамгийн их тогтмол хүчдэлийн оролт	В	1500
2	Хамгийн бага ажиллаж эхлэх хүчдэл	В	550
3	ХИЧД-ын богино холболтын гүйдэл	А	60
4	Хувьсах гүйдлийн гаралтын чадал	кВА	352 (30℃), 320 (40℃), 295 (50℃)
5	Нэрлэсэн гаралтын гүйдэл	А	231
6	Хувьсах гүйдлийн нэрлэсэн хүчдэл	В	800
7	АҮК	%	99.02

САЛХИН ТУРБИНЫ ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

3-Р ХҮСНЭГТ.

№	Үзүүлэлт	Нэгж	Техникийн үзүүлэлт
1	Турбины төрөл		Хэвтээ тэнхлэгтэй, салхины урдаас чиглэлтэй, гурван сэнстэй
2	Нэрлэсэн хүч	кВт	500
3	Тохируулах системийн хүрээ	кВт	0–500
4	Ажиллаж эхлэх салхины хурд	м/с	3.0
5	Зогсох салхины хурд	м/с	25
6	Нэрлэсэн чадлаа гаргах салхины хурд	м/с	10.5
7	Ажиллах орчны температур	℃	-40 – +35
8	Ашиглалтын хугацаа	жил	25
9	Цамхгийн өндөр	м	45

БАТАРЕЙНЫ КОНТЕЙНЕРИЙН ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

4-Р ХҮСНЭГТ.

№	БХС төрөл	LFP 5.0MWH
	Батарейны контейнер	
1	Тогмол гүйдлийн нэрлэсэн хүчдэл	1200 В
2	Тогтмол гүйдлийн хамгийн их хүчдэл	1500 В
3	Нэрлэсэн эрчим хүчний багтаамж	5015 кВт.цаг
4	Контейнерын хэмжээ (Өргөн Өндөр Урт)	6 × 2.4 × 2.9 м
5	Контейнерын жин	≤ 35 тн
6	Ашиглалтын температурын муж	-30°C ~ 50°C
7	Хамгаалалтын зэрэг	IP54
8	АҮК	85-90%

2. Оновчлолын зорилтот функц

Эрчим хүчний балансын функц- Хосолмол системийн ажиллагааг үнэлэхэд энергийн балансын нөхцөлийг ашигласан бөгөөд тухайн хугацаанд үүсгэгдсэн болон хуримтлагдсан нийт энерги нь хэрэглэгчийн ачааллаас их буюу тэнцүү байх ёстой гэж үзсэн.

LPSP (Loss of Power Supply Probability): Эрчим хүчний тасалдах магадлал хамгийн бага байлгах.

LCOE (Levelized Cost of Energy): Үйлдвэрлэсэн нэгж эрчим хүчний өртгийг хамгийн бага байлгах.

Эргэн төлөгдөх хугацаа хамгийн бага байх.

3. SAM программын тооцоолол

1) Энгийн эргэн төлөгдөх хугацаа [10]:

$$PP = \frac{C_{initial}}{C_{annual\ savings}} \quad (1)$$

$C_{initial}$ — анхны хөрөнгө оруулалт ($)

$C_{annual\ savings}$ — жилд хэмнэх зардал ($/жил)

2) Эрчим хүчний тасалдах магадлал [11]:

$$P = \frac{\sum_{t=1}^{T} P_{deficit}(t)}{\sum_{t=1}^{T} P_{Load}(t)} \quad (2)$$

$P_{deficit}(t)$— тухайн хугацаанд дутагдсан чадал

$P_{Load}(t)$— тухайн хугацааны ачааллын чадал

T— нийт хугацааны алхмууд

3) Эрчим хүчний тэгшитгэсэн өртөг [12]:

$$LCOE = TLCC \div \left\{\sum_{n=1}^{N}[Q_n \div (1+d)^n]\right\} \quad (3)$$

LCOE- Эрчим хүчний тэгшитгэсэн өртөг

TLCC- Нийт ашиглалтын хугацааны зардал

Q_n- n дахь жилийн эрчим хүчний хэмнэлт

d- Хөнгөлөлтийн хувь

N- Шинжилгээний хугацаа

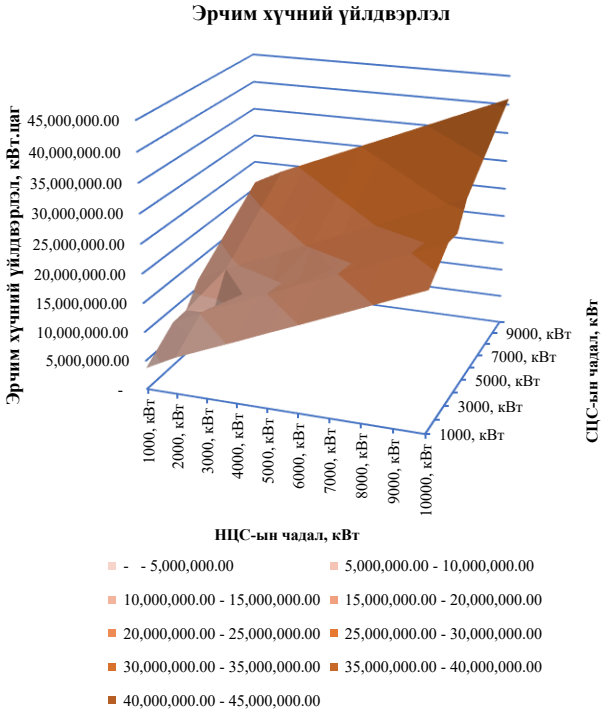
IV. ҮР ДҮН

Судалгааны симуляцын тооцооллыг System Advisor Model (SAM) программ ашиглан гүйцэтгэсэн. Судалгаанд үйлдвэрийн цахилгаан хэрэглээний жилийн нийт хэмжээ 24,419,984 кВт.цаг болохыг ачааллын өгөгдлөөс тодорхойлсон. Хосолмол системийн найдвартай ажиллагааг хангахын тулд батарейн хуримтлуурын системийн хүчин чадлыг үйлдвэрийн оргил ачааллыг 4 цагийн хугацаанд хангах боломжтой байхаар сонгож, нийт 5 МВт чадалтай байхаар авч үзсэн.

Симуляцын тооцоололд нарны цахилгаан станц (НЦС)-ын хүчин чадлыг 1–10 МВт, салхины цахилгаан станц (СЦС)-ын хүчин чадлыг 1–10 МВт-ын хооронд өөрчлөн нийт 100 өөр хувилбар гарган харьцуулсан. Эдгээр хувилбаруудын хувьд эрчим хүчний балансын нөхцөл буюу жилийн нийт үйлдвэрлэсэн цахилгаан энерги нь үйлдвэрийн хэрэглээнээс их байх шаардлагыг үндсэн шалгуур болгон авч үзсэн.

Симуляцын үр дүнгээс үйлдвэрийн жилийн 24,419,984 кВт.цаг хэрэглээг хангах боломжтой хэд хэдэн хувилбар тодорхойлогдсон (5-р зураг). Эдгээрээс хэрэглээг давсан хамгийн бага үйлдвэрлэлтэй гурван оновчтой хувилбарыг сонгон эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг харьцуулсан (5-р хүснэгт). Үүнд:

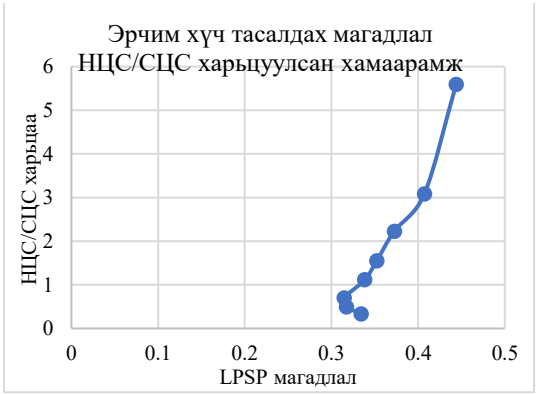
8 МВт НЦС + 4 МВт СЦС хослолын хувьд жилийн нийт эрчим хүчний үйлдвэрлэл 25,022,100 кВт.цаг, 7 МВт НЦС + 5 МВт СЦС хослолын хувьд жилийн үйлдвэрлэл 24,792,100 кВт.цаг, 6 МВт НЦС + 6 МВт СЦС хослолын хувьд жилийн үйлдвэрлэл 24,564,300 кВт.цаг байна.



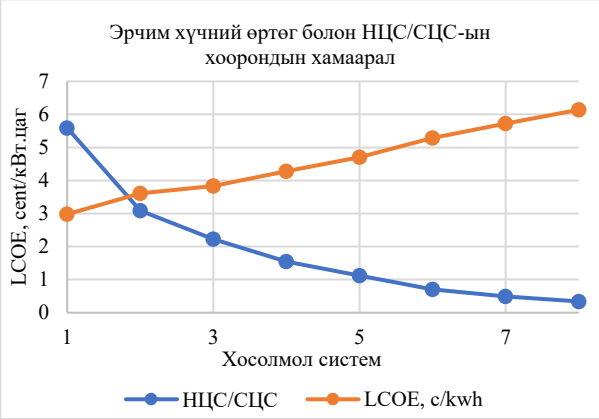
5-р зураг. Хосолмол системийн эхний жилийн эрчим хүчний үйлдвэрлэл

НЦС/СЦС харьцаа болон LPSP-ийн хамаарлыг 6-р зураг үзүүлэв. Шинжилгээнээс харахад салхины эх үүсвэрийн хувь нэмэгдэх тусам системийн найдвартай байдал сайжирч байгааг харуулж байна. Тухайлбал, НЦС/СЦС = 5.59 үед LPSP хамгийн өндөр (0.44) байгаа бол НЦС/СЦС = 0.49 үед хамгийн бага (0.31) утгад хүрч байна.

Энэ нь нарны эх үүсвэр зөвхөн өдрийн цагт ажилладаг бол салхины эх үүсвэр шөнийн цагт эрчим хүч үйлдвэрлэх боломжтой тул хэрэглээний тасалдлыг бууруулж байгаатай холбоотой юм. Иймээс салхины эх үүсвэрийг нэмэгдүүлэх нь системийн найдвартай байдлыг сайжруулах чухал хүчин зүйл болохыг харуулж байна.



6-р зураг. Эрчим хүч тасалдахгүй байх магадлал нь НЦС/СЦС-ын харьцаа

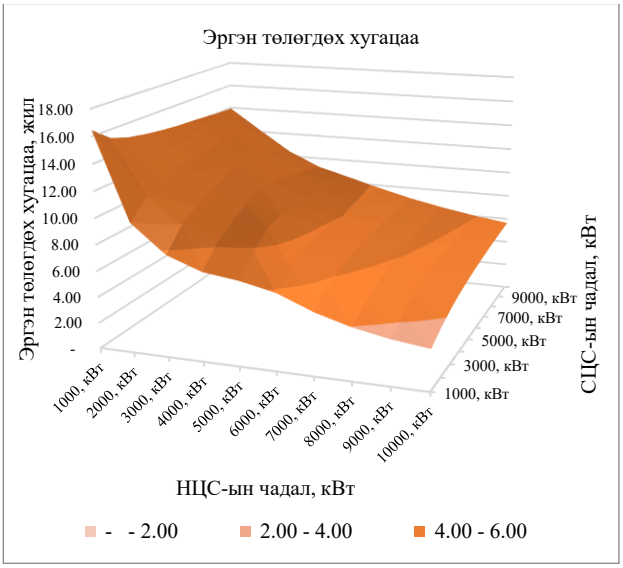


7-р зураг. Эрчим хүчний өртөг нь НЦС/СЦС-ын хамаарал

НЦС/СЦС харьцаа болон LCOE-ийн хамаарлыг шинжилгээнээс (7-р зураг) харахад нарны эх үүсвэр давамгайлах үед (НЦС/СЦС > 1) системийн өртөг буурч, харин салхины эх үүсвэр давамгайлах үед (НЦС/СЦС < 1) LCOE мэдэгдэхүйц өсөж байна. Тухайлбал, НЦС/СЦС = 5.59 үед LCOE хамгийн бага (2.98 c/kWh) байгаа бол НЦС/СЦС = 0.34 үед хамгийн их (6.14 c/kWh) байна.

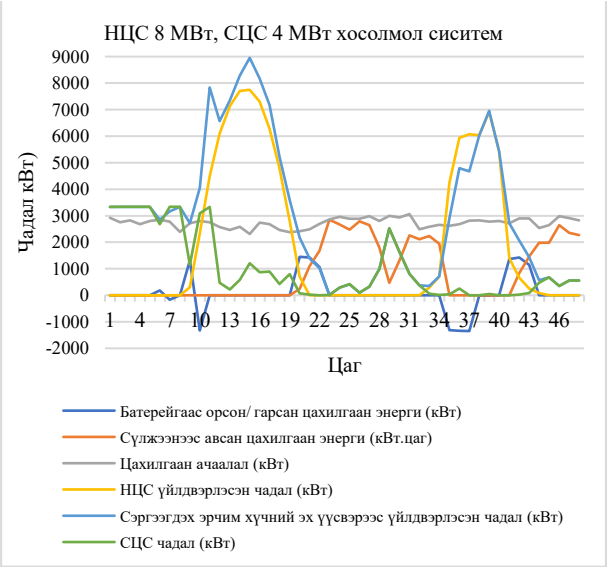
Энэ нь нарны цахилгаан станцын өртөг харьцангуй бага, харин салхины цахилгаан станцын хөрөнгө оруулалт өндөр байгаатай холбоотой юм. Иймээс системийн эдийн засгийн үр ашгийг нэмэгдүүлэхийн тулд нарны эх үүсвэр давамгайлсан бүтэц илүү оновчтой болохыг харуулж байна.

Үйлдвэрлэсэн нэгж эрчим хүчний өртгийг хамгийн бага байх тусам эргэн төлөлтийн хугацаа нь хурдан байна. 8-р зураг эргэн төлөгдөх симуляцийн утгуудыг харуулав. Үйлдвэрийн цахилгаан хэрэглээг хангаж чадахуйц оновчтой хосолмол системийн утгуудын харгалзах эргэн төлөгдөх хугацаа нь 5.76, 6.86, 8.08 жил байна. Хосолмол системийн хувьд НЦС чадал их байхад СЦС чадал бага байх утгуудад эргэн төлөгдөх хугацаа бага байгаар харуулж байна.



8-р зураг. Хосолмол системийн эргэн төлөгдөх хугацаа

Хосолмол системийн эрчим хүчний үйлдвэрлэлийн графикийг 7,8,9-р зурагт үзүүлэв. НЦС 8 МВт болон СЦС 4 МВт хосолмол систем нь өдрийн цагт ачааллыг бүрэн хангаж илүүдэл эрчим хүчээр батарейг бүрэн цэнэглэх боломжтой. Шөнийн цагт салхины үйлдвэрлэл буурсанаар төвийн эрчим хүчээр хэрэглээг хангаж байна. НЦС 7 МВт болон СЦС 5 МВт системийн хувьд салхины үйлдвэрлэл ихэссэнээр төвийн эрчим хүчнээс авах цахилгаан энерги багассан. 3 дахь хосолмол системийн хувьд НЦС, СЦС-ын харьцаа адил болсоноор шөнийн цагаар үйлдвэрлэх эрчим хүч нэмэгдсэн. Харин нар болон салхины эх үүсвэрийн хүчин чадлын харьцаа ойролцоо байх үед шөнийн цагийн эрчим хүчний үйлдвэрлэл нэмэгдэж, системийн эрчим хүчний баланс илүү тогтвортой болох давуу тал ажиглагдсан.

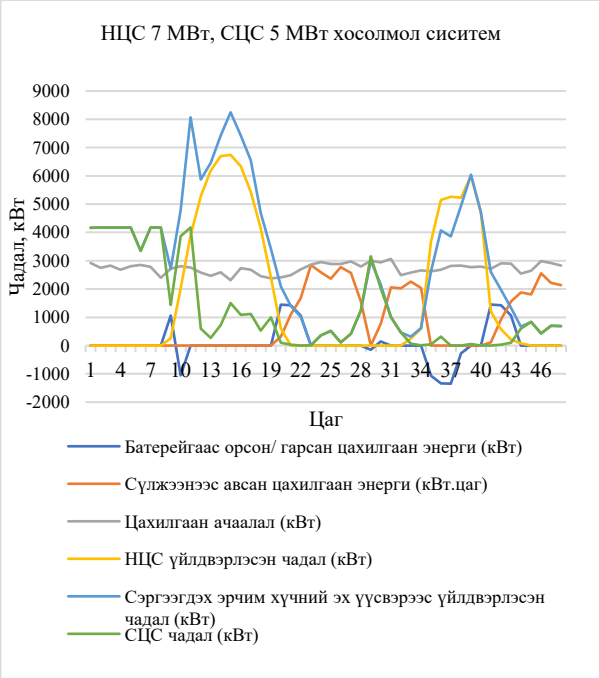


7-р зураг. Хосолмол системийн цахилгаан эрчим хүчний үйлдвэрлэл

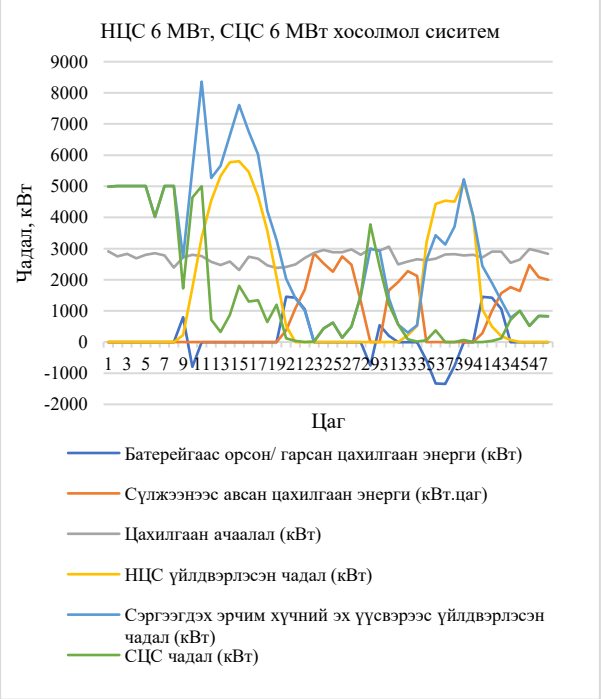
ХОСОЛМОЛ СИСТЕМИЙН ЭХНИЙ ЖИЛИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ҮЙЛДВЭРЛЭЛ, ЭДИЙН ЗАСГИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

5-Р ХҮСНЭГТ

Хосолмол системийн харьцаа	Эрчим хүчний үйлдвэрлэл кВт.цаг ≥24,419,900 кВт.цаг	LPSP	НЦС/СЦС харьцаа	LCOE, cent/кВт.цаг	Эргэн төлөгдөх хугацаа, жил
10 МВт НЦС + 2 МВт СЦС	25,497,200.00	0.44	5.59	2.98	3.75
9 МВт НЦС + 3 МВт СЦС	25,269,200.00	0.41	3.09	3.61	4.71
8 МВт НЦС + 4 МВт СЦС	25,022,100.00	0.37	2.23	3.83	5.76
7 МВт НЦС + 5 МВт СЦС	24,792,100.00	0.35	1.55	4.28	6.86
6 МВт НЦС + 6 МВт СЦС	24,564,300.00	0.34	1.12	4.71	8.08
5 МВт НЦС + 8 МВт СЦС	26,321,000.00	0.32	0.7	5.29	8.86
4 МВт НЦС + 9 МВт СЦС	26,062,000.00	0.31	0.49	5.72	9.49
3 МВт НЦС + 10 МВт СЦС	25,837,600.00	0.32	0.34	6.14	10.43



8-р зураг. Хосолмол системийн цахилгаан эрчим хүчний үйлдвэрлэл



9-р зураг. Хосолмол системийн цахилгаан эрчим хүчний үйлдвэрлэл

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар уурхайн цахилгаан хэрэглээг сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрээр хангах зорилгоор нарны цахилгаан үүсгүүр, салхины турбин болон батарейн хуримтлуурын системээс бүрдэх хосолмол системийн оновчтой хүчин чадлыг тодорхойлох судалгааг хийж гүйцэтгэлээ. Судалгаанд симуляцад суурилсан оновчлолын аргыг ашиглан System Advisor Model (SAM) программ дээр тооцоолол хийж, нар болон салхины эх үүсвэрийн

хүчин чадлыг 1–10 МВт-ын хооронд өөрчилсөн нийт 100 хувилбарыг харьцуулан шинжилсэн.

Энэхүү судалгаагаар уурхайн цахилгаан хэрэглээг хангах нар–салхи–батарейн хосолмол системийн оновчтой бүтцийг симуляцад суурилсан оновчлолын аргаар тодорхойлов. Судалгаанд эрчим хүчний үйлдвэрлэл, эдийн засгийн үзүүлэлт (LCOE, эргэн төлөгдөх хугацаа) болон найдвартай байдлын үзүүлэлт (LPSP)-ийг хамтад нь үнэлсэн.

Симуляцын үр дүнгээс эрчим хүчний балансын нөхцөлийн хувьд 8 хувилбар шалгуурыг хангасан. Гэсэн хэдий ч системийн бүтцээс хамааран эдийн засгийн болон найдвартай байдлын үзүүлэлтүүдэд тус тус ялгаа ажиглагдсан.

Нарны эх үүсвэр давамгайлсан хувилбаруудын (10 МВт НЦС + 2 МВт СЦС) хувьд LCOE хамгийн бага (2.98 c/kWh), эргэн төлөгдөх хугацаа хамгийн богино (3.75 жил) байсан боловч найдвартай байдлын үзүүлэлт (LPSP = 0.44) харьцангуй өндөр байна. Харин салхины эх үүсвэр давамгайлсан хувилбаруудын хувьд LPSP хамгийн бага (0.31) байгаа боловч LCOE болон эргэн төлөгдөх хугацаа өсөлттэй байна.

LCOE болон LPSP-ийн хооронд урвуу хамаарал ажиглагдсан бөгөөд эдийн засгийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх тусам найдвартай байдал буурах, харин найдвартай байдлыг сайжруулахад системийн зардал нэмэгдэх хандлагатай байна.

Шинжилгээгээр 8 МВт нарны цахилгаан станц болон 4 МВт салхины цахилгаан станцын хослол нь хамгийн оновчтой цэг болохыг тогтоосон. Энэхүү хувилбар нь LCOE (3.83 c/kWh), LPSP (0.37) болон эргэн төлөгдөх хугацаа (5.76 жил)-ны хоорондын хамгийн сайн тэнцвэрийг хангаж байна.

Иймээс хосолмол системийн оновчлолыг зөвхөн нэг шалгуурт (жишээлбэл LCOE) тулгуурлан тодорхойлох боломжгүй бөгөөд олон шалгуурт үнэлгээ хийх шаардлагатай болохыг энэхүү судалгаа харуулж байна. Цаашид нарийвчилсан алгоритм ашиглан судалгааг өргөжүүлэх боломжтой.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] D. D. Olodu, A. A. Erameh, A. I. Ihenyen, F. Inegbedion, “Design and optimization of a hybrid renewable energy system for sustainable power generation,” Journal of Energy Trends, vol. 2, no. 1, pp. 1–12, 2025.

[2] B. O. Bilal, V. Sambou, P. A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, M. Ndongo, “Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the loss of power supply probability (LPSP),” Renewable Energy, vol. 35, pp. 2388–2390, 2010.

[3] S. K. Ramoji, B. B. Rath, D. Vijay Kumar, “Optimum design of a hybrid pv/wind energy system using genetic algorithm (GA),” IOSR Journal of Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 38–48, 2014.

[4] A. Giedraityte, S. Rimkevicius, M. Marciukaitis, V. Radziukynas, R. Bakas, “Hybrid renewable energy systems—a review of optimization approaches and future challenges,” Applied Sciences, vol. 15, no. 4, 2025

[5] S. O. Bade, O. S. Tomomewo, A. Meenakshisundaram, M. Dey, M. Alamooti, N. Halwany, “Multi-criteria optimization of a hybrid renewable energy system using particle swarm optimization for optimal sizing and performance evaluation,” Clean Technologies, vol. 7, p. 23, 2025.

[6] B. S. Borowy, Z. M. Salameh, “Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and pv array in a wind/pv hybrid system,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 11, no. 2, pp. 367–375, 1996.

[7] Y. Wang, X. Dong, J. Wang, “Research on the optimization design method of solar-wind-hydrogen hybrid energy system based on nsga-ii and entropy-weight topsis framework,” Discover Sustainability, vol. 7, 2026.

[8] I. Amoussou, E. Tanyi, L. Fatma, T. F. Agajie, I. Boulkaibet, N. Khezami, A. Ali, B. Khan, “The optimal design of a hybrid solar pv/wind/hydrogen/lithium battery for the replacement of a heavy fuel oil thermal power plant,” Sustainability, vol. 15, 2023.

[9] M. Abolghasemian, S. Kaveh, F. Ebrahimzadeh, “Simulation-based optimization: a comprehensive review of concept, method and its application,” Research Annals of Industrial and Systems Engineering, vol. 2, no. 3, pp. 196–208, 2025.

[10] National Renewable Energy Laboratory (NREL). *System Advisor Model (SAM) User Documentation*

[11] Hassan Zahboune*, Smail Zouggar, Mohammed Elhafyani, Mostafa Ziani, Sanae Dahbi. “Optimal design method for stand-alone solar system with LPSP technology by using electric system cascade analysis method,” 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2016.

[12] Walter Shorrt, Daniel J. Packey and Thomas Holt “Levelized Cost of Energy,”A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies”, Colorado, National Renewable Energy Laboratory, 1995, p. 47.

ДОРНОГОВЬ АЙМГИЙН ЗҮҮНБАЯН СУМЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙГ СЭРГЭЭГДЭХ ЭРЧИМ ХҮЧЭЭР ШИЙДЭХ БОЛОМЖИЙН СУДАЛГАА

Батмөнхийн БАТЗОРИГ[1], Пашкагийн БЯМБАЦОГТ[1]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын танхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: batbayar.j@must.edu.mn[1]

Хураангуй: **Монгол улсын сум суурин газруудын дулаан хангамжийн систем нь ихэвчлэн нүүрс түлдэг усан халаалтын зуухтай бөгөөд энэ нь түлшний хэрэглээ нэмэгдэх, агаарын бохирдол үүсэх, түлш тээвэрлэлтийн зардал өсөх зэрэг олон асуудлыг бий болгодог.[1] Ялангуяа говийн бүсийн сумдын хувьд эрс тэс уур амьсгалтай, халаалтын улирал урт үргэлжилдэг тул дулаан хангамжийн найдвартай, эдийн засгийн хувьд үр ашигтай шийдэл шаардлагатай байдаг. Энэхүү судалгаанд Дорноговь аймгийн Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийн өнөөгийн нөхцөл байдлыг судлах явцад сумын төвд оршин суугч иргэдийн хувьд хэрэгцээний халуун усны найдвартай хангамж хангалтгүй байгаа нь орчин үеийн амьдралын наад захын хэрэгцээг бүрэн хангаж чадахгүй байгааг харуулж байна. Энэ нь Монгол Улсын Үндсэн хуульд заасан иргэдийн эрүүл, аюулгүй орчинд амьдрах эрх зөрчигдөж байна. Судалгааны зорилго нь сэргээгдэх эрчим хүчийг ашиглан дулаан хангамж болон хэрэглээний халуун ус шийдвэрлэх боломжийг тодорхойлох явдал юм. Судалгаанд тухайн бүс нутгийн дулааны ачаалал, дулааны эх үүсвэрийн хүчин чадал, уур амьсгалын нөхцөл, нарны цацрагийн нөөцийн талаарх статистик мэдээллийг ашиглаж, инженерийн тооцоо болон харьцуулсан шинжилгээ хийсэн. Судалгааны үр дүнгээс харахад Зүүнбаян сум нь нарны цацрагийн өндөр нөөцтэй бүсэд хамаарах бөгөөд нарны дулааны коллектор ашиглан төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн тодорхой хэсгийг сэргээгдэх эрчим хүчээр хангах боломжтой болох нь тогтоогдсон. Нарны дулааны системийг төвлөрсөн дулаан хангамжийн системтэй хослуулан ашигласнаар нүүрсний хэрэглээг бууруулах, дулаан үйлдвэрлэлийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөг бууруулах боломжтой. Энэхүү судалгааны ажлын онолын ач холбогдол нь орон нутгийн дулаан хангамжийн системийн дулааны ачаалал, жилийн дулааны хэрэглээ болон хэрэгцээний халуун усны ачааллыг инженерийн тооцоонд тулгуурлан тодорхойлж, түүнийг сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэртэй уялдуулан үнэлэх онол-аргазүйн үндсийг боловсруулсанд оршино. Мөн практик ач холбогдлын хувьд Зүүнбаян сумын нөхцөлд хэрэгжүүлэх боломжтой техникийн шийдлийг санал болгож, цаашид орон нутгийн дулаан хангамжийн системийг сэргээгдэх эрчим хүчээр дэмжих боломжийг бүрдүүлж байна.**

Түлхүүр үг: нарны дулаан, дулааны ачаалал, нүүрсний хэрэглээ, хосолсон систем, эрчим хүчний үр ашиг

I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд дэлхий дахинд эрчим хүчний хэрэглээ хурдацтай өсөж, уламжлалт түлшний нөөц багасах, байгаль орчны бохирдол нэмэгдэх зэрэг асуудлууд тулгамдсан асуудлын нэг болж байна. Ялангуяа нүүрс, нефть зэрэг уламжлалт түлшинд тулгуурласан эрчим хүчний үйлдвэрлэл нь агаарын бохирдол, хүлэмжийн хийн ялгарлыг нэмэгдүүлж, уур амьсгалын өөрчлөлтөд нөлөөлөх гол хүчин зүйл болж байна.[1] Иймээс дэлхийн улс орнууд сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсгүүрийг эрчимтэй хөгжүүлж, эрчим хүчний салбарын тогтвортой хөгжлийг хангах бодлого баримтлан ажиллаж байна. Монгол улсын хувьд эрчим хүчний хэрэглээний ихэнх хэсгийг дулааны цахилгаан станц болон нүүрс түлдэг дулааны эх үүсвэрүүд хангаж байна. Хот суурин газруудад төвлөрсөн дулаан хангамжийн систем ашиглагддаг бол орон нутгийн сум суурин газруудад бага чадлын зуух, нам даралтын халаалтын системийг өргөн хэрэглэдэг. Энэ нь түлшний хэрэглээ ихсэх, тээвэрлэлтийн зардал нэмэгдэх, мөн байгаль орчинд сөрөг нөлөө үзүүлэх зэрэг хүндрэлүүдийг бий болгодог.

Дорноговь аймгийн Зүүнбаян сум нь говийн бүсэд байрлах бөгөөд жилийн турш нарлаг өдрийн тоо ихтэй, нарны цацрагийн нөөц өндөртэй бүс нутагт хамаардаг. Иймээс нөхцөл нь нарны эрчим хүчийг ашиглах техникийн боломжийг бүрдүүлж байгаа бөгөөд дулаан хангамжийн системд сэргээгдэх эрчим хүчийг ашиглах боломжийг судлах шаардлагатай байна. Нарны дулааны коллектор ашиглан дулаан үйлдвэрлэх технологи нь түлшний хэрэглээг бууруулах, дулаан хангамжийн системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, байгаль орчны бохирдлыг бууруулах зэрэг олон давуу талтай.

Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь Дорноговь аймгийн Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийн өнөөгийн нөхцөл байдлыг судалж, нарны эрчим хүчийг ашиглан дулаан хангамжийг шийдвэрлэх боломжийг тодорхойлох явдал юм. Судалгааны хүрээнд сумын дулааны ачаалал, уур амьсгалын нөхцөл, нарны цацрагийн нөөц болон одоогийн дулаан хангамжийн системийн техникийн үзүүлэлтүүдийг судалж, инженерийн тооцоонд үндэслэн боломжит шийдлийг тодорхойлохыг зорьсон.

Энэхүү судалгааны үр дүн нь орон нутгийн дулаан хангамжийн системийг сэргээгдэх эрчим хүчээр дэмжих боломжийг тодорхойлох бөгөөд цаашид орон нутгийн эрчим хүчний системийг илүү тогтвортой, байгаль орчинд ээлтэй байдлаар хөгжүүлэхэд ач холбогдолтой юм.

II. ЗҮҮНБАЯН СУМЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН ӨНӨӨГИЙН БАЙДАЛ

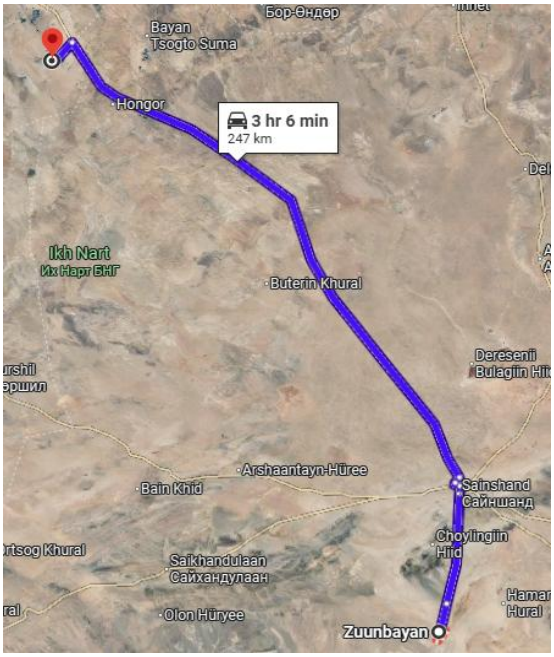
Дорноговь аймгийн Зүүнбаян сум нь Сайншанд сумын 5-р багт харьяалагддаг бөгөөд орон сууц, төрийн байгууллага, аж ахуйн нэгжүүд төвлөрсөн дулаан хангамжийн системд холбогдсон суурин газрын нэг юм. Тус сумын дулаан хангамжийг төвлөрсөн усан халаалтын зуухнаас хангадаг бөгөөд орон сууцны барилга, төсвийн байгууллага, худалдаа үйлчилгээний объектууд дулааны шугам сүлжээнд холбогдсон байна. Зүүнбаян сумын дулааны эх үүсвэр нь 2013 онд ашиглалтад орсон DZL-2.8 маркийн усан халаалтын зуухтай тус бүр 2.8 МВт хүчин чадалтай гурван ширхэг усан халаалтын зуухаар тоноглогдсон байна. Сүлжээний усны эргэлтийг хангах зорилгоор LEO LPP150-50-45/4 маркийн 45 кВт чадалтай, 200 м³/цаг зарцуулалттай насос болон SNP маркийн 45 кВт хүчин чадалтай насос ашиглагдаж байна. Эдгээр тоног төхөөрөмж нь төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг хангах үндсэн бүрэлдэхүүн хэсэг юм. Тус сумын дулааны шугам сүлжээний нийт урт ойролцоогоор 12.9 км сүлжээнд ф40-өөс ф250 хүртэлх диаметртэй хоолойнууд ашиглагдаж байгаа бөгөөд эдгээр нь хэрэглэгчдийн дулааны хэрэгцээг хангах зориулалттайгаар төлөвлөгдсөн. Дулааны шугам сүлжээнд холбогдсон хэрэглэгчдийн тоо 90 гаруй бөгөөд 396 айл, өрх, худалдаа үйлчилгээний 20 аж ахуй нэгж, төсвийн 8 байгууллагууд төвлөрсөн шугам сүлжээнд холбогдсон байна. Нийт дулааны ачаалал 3.29 Гкал/цаг байна. 2025оны нүүрсний хэрэглээг үйлдвэрлэсэн дулааныг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв.

2025 ОНЫ НҮҮРСНИЙ ХЭРЭГЛЭЭ БОЛОН ҮЙЛДВЭРЛЭСЭН ДУЛААН

1-Р ХҮСНЭГТ.

Д/Д	Сар	Нүүрсний хэрэглээ (тн)	Үйлдвэрлэсэн дулаан (Гкал/сар)
1	10	412	559
2	11	494	771
3	12	534	897
4	1	607	1020
5	2	549	923
6	3	348	584
7	4	233	313

Зүүнбаян сум нь уур амьсгалын II бүсэд хамаарах бөгөөд хамгийн хүйтэн тав хоногийн тооцоот температур −29°C хүрдэг. Халаалтын улирал жил бүрийн 10 дугаар сарын 1-нээс эхэлж дараа оны 5 дугаар сарын 1 хүртэл үргэлжилдэг бөгөөд нийтдээ ойролцоогоор 213 хоног үргэлжилдэг. Нүүрсийг Дорноговь аймгаас 250 км орчим зайд байрлах Шивээ-Овоогийн уурхайгаас нийлүүлдэг бөгөөд тээвэрлэлтийн зардал болон түлшний хэрэглээ нь дулаан үйлдвэрлэлийн зардлын чухал хэсгийг бүрдүүлдэг. Нүүрсний дундаж илчлэг ойролцоогоор 2670 ккал/кг бөгөөд чийглэг, үнслэгийн агууламж харьцангуй өндөр байдаг.

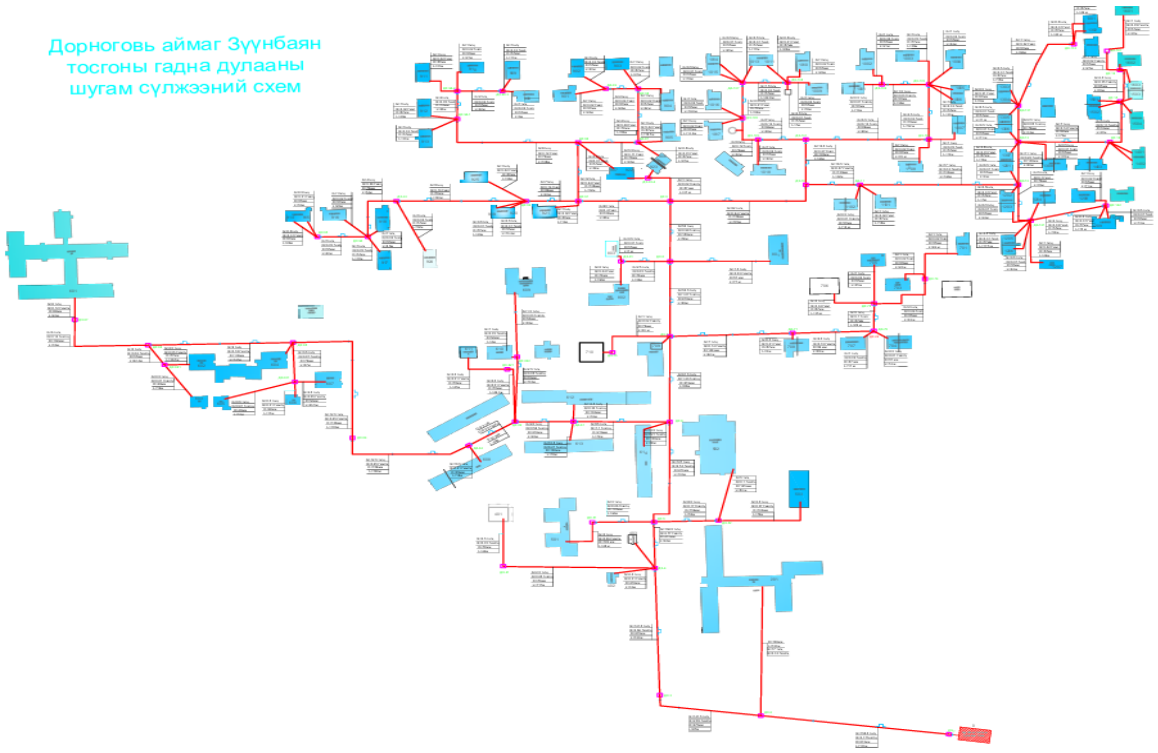


1-р зураг. Шивээ-Овоогийн уурхайгаас Зүүнбаян луу тээвэрлэх зай

Ийм нөхцөлд түлшний хэрэглээг бууруулах, дулаан хангамжийн системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжийг судлах шаардлага бий болж байна. Зүүнбаян сум нь нарны цацрагийн өндөр нөөцтэй бүс нутагт байрладаг тул нарны дулааны коллектор ашиглан дулаан хангамжийн системийг дэмжих боломжтой гэж үзэж байна.

III. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ

Энэхүү судалгааны объект нь Дорноговь аймгийн Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийн өнөөгийн байдал, хэрэглээ, ачаалал болон түүнийг сэргээгдэх эрчим хүчээр хангах боломжийг тодорхойлох асуудал болно.Зүүнбаян сум нь Монгол орны говийн бүсэд оршдог бөгөөд эрс тэс эх газрын уур амьсгалтай, өвлийн улиралд -25°C – -30°C хүртэл хүйтэрдэг, зуны улиралд 30°C хүрч халдаг онцлогтой. Жилийн нарны тусгалын хугацаа их, нарны цацрагийн нөөц өндөртэй нь сэргээгдэх эрчим хүч ашиглах боломжийг нэмэгдүүлдэг. Судалгаанд хамрагдсан барилга байгууламжууд нь:



1-р зураг. Сүлжээний схем

- Ерөнхий боловсролын сургууль-1
- Цэцэрлэг -1
- Эрүүл мэндийн төв-1
- Соёлын төв-1
- Захиргааны барилга-1
- Нийтийн орон сууц -14
- Хувийн орон сууц- 74

Эдгээр барилгуудын нийт халаалтын талбай ойролцоогоор 40000–55000 м² бөгөөд дулааны хэрэглээ нь улирлын шинж чанартай, өвлийн улиралд оргил ачаалал үүсдэг.Одоогийн байдлаар сумын дулаан хангамж нь нам даралтын уурын болон усан халаалтын зуух нүүрсэн түлштэй төвлөрсөн бус, тархмал системт тулгуурлаж байна.

- Дулаан хангамжийн системийн сул талууд:
- Зуухны ашигт үйлийн коэффициент бага (~40–60%)
- Түлш тээвэрлэлтийн зардал өндөр
- Агаарын бохирдол их

Зүүнбаян сумын дулааны сүлжээний ерөнхий төлөвлөлт, барилга байгууламжийн байрлал нь тархмал хэлбэртэй бөгөөд энэ нь дулааны алдагдлыг нэмэгдүүлдэг (сүлжээний схемийг зураг 1-т зүүлсэн).

IV. ДУЛААНЫ АЧААЛАЛ, ЖИЛИЙН ХЭРЭГЛЭЭНИЙ ТООЦОО

Халаалтын тооцоот ачаалал

Зүүнбаян сумын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн халаалтын тооцоот ачааллыг хэрэглэгчдийн барилгын халаагдах эзлэхүүн, уур амьсгалын нөхцөл болон барилгын дулаан техникийн үзүүлэлтэд тулгуурлан тодорхойлов. Судалгааны объектыг бүрдүүлж буй барилга байгууламжуудын нийт халаагдах эзлэхүүн:

V=135031 м^3

Тооцоот ачааллыг дараах томьёогоор тодорхойлно:

$$Q = q_v \cdot V \cdot (t_д - t_г) \quad (1)$$

Энд: q_v -эзэлхүүний дулаан алдагдлын коэффициент;

$t_д$-дотор агаарын температур, $t_д = 20$

$t_г$-гадна агаарын температур, $t_г$=-29

Зүүнбаян сумын барилгын дулаан техникийн байдлыг харгалзан: $q_v = 0.55$Вт/м^3·^{0}С

Тооцоонд өгөгдлүүдийг орлуулбал:

Q=0.55×135031×49=3.64 МВт

Сүлжээний болон инфильтрацийн алдагдлыг 5% гэж үзвэл:

Q=3.64×1.05=3.82 МВт=3.29 Гкал/ц

ДУЛААНЫ АЧААЛАЛ

2-Р ХҮСНЭГТ

Д/Д	Дулааны ачаалал			
	Хэрэглэгчийн нэр	Тоо	*Эзлэхүүн, м³*	*Тооцоот ачаалал МВт*
1	11 жилийн сургууль	1	19600	0.555
2	Халуун ус	1	145	0.004
3	Цэцэрлэг	1	2568	0.073
4	Соёлын төв	1	4500	0.127
5	Биеийн тамир спортын заал	1	3012	0.085
6	1-р 58 айл	1	11800	0.334
7	78 айл	1	18768	0.531
8	58 айл	1	7200	0.204
9	2-р 58 айл	1	11800	0.334
10	Хаан Банк	1	400	0.011
11	Дэлгүүр 1	1	641	0.018
12	Багийн алба	1	977	0.028
13	8 -н айл 1	1	1950	0.055
14	8 -н айл 2	1	1950	0.055
15	8 -н айл 3	1	1950	0.055
16	Батсайхан	1	350	0.010
17	Төмөрсүх	1	345	0.010
18	Данзандорж	1	345	0.010
19	Эмнэлэг	1	5800	0.164
20	Цайны газар	1	260	0.007
21	Сугарбаатар	1	300	0.008
22	Чулуунбазар	1	638	0.018
23	Дэлгэр говь	1	300	0.008
24	Пүрэвцэрэн	1	641	0.018
25	Гэрэл	1	641	0.018
26	85 Катеж	1	510	0.014
27	Хүнсний дэлгүүр	1	420	0.012
28	Төрийн банк	1	1400	0.040
29	Катеж А	38	13300	0.376
30	Катеж Б	34	22100	0.625
31	ЦТП	1	420	0.012
Нийт		101	135031	3.821

Халаалтын тооцоот ачааллыг тодорхойлсны дараа тухайн сарын дундаж дулааны ачааллыг гадна агаарын температурын өөрчлөлтөөс хамааруулан дараах томьёогоор тодорхойлов:

$$Q_{сд} = Q_{max}\frac{t_д - t_{г,ср}}{t_д - t_г} \quad (2)$$

Энд: Q_{max} -халаалтын тооцоот ачаалал (Гкал/ц)

$t_{г,ср}$ -тухайн сарын гадна агаарын дундаж температур

Дээрх томьёоны дагуу сар бүрийн дундаж дулааны ачааллыг тодорхойлж, улмаар жилийн дулааны хэрэглээг дараах томьёогоор тодорхойлов:

$$Q_ж = Q_{сд} \cdot 24 \cdot z_x \quad (3)$$

Энд: $Q_{сд}$- тухайн сарын дундаж дулааны ачаалал (Гкал/ц)

z_x-тухайн сарын халаалтын хоногийн тоо

ЖИЛИЙН ДУЛААНЫ ХЭРЭГЛЭЭ

3-Р ХҮСНЭГТ

Д/Д	Гадна агаарын температураас хамаарсан дулааны ачаалал			
	Сар	*Q, Гкал/ц*	*Хоног*	*Q, Гкал/сар*
1	10	0.89	31	662
2	11	1.68	30	1209
3	12	2.22	31	1651
4	1	2.44	31	1815
5	2	2.09	28	1405
6	3	1.43	31	1063
7	4	0.82	30	590
9	Нийт			8395

2-р хүснэгтийн тооцооны үр дүнгээс харахад Зүүнбаян сумын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн жилийн нийт дулааны хэрэглээ 8395 Гкал/жил буюу 9761.4 МВт·ц/жил байна. Энэхүү тооцооны үр дүнгээс үзэхэд Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийн системийн дулааны хэрэглээ өндөр байгаа нь тухайн бүс нутгийн эрс тэс уур амьсгал, халаалтын улирлын урт хугацаа, мөн барилгын дулаан техникийн төлөв байдалтай шууд хамааралтай байна. Ялангуяа өвлийн улиралд гадна агаарын температур огцом буурдаг нь дулааны ачааллыг нэмэгдүүлэх үндсэн хүчин зүйл болж байна.

4.2 Хэрэгцээний халуун усны тооцоо

Хэрэгцээний халуун усны ачааллыг дараах томьёогоор тодорхойлов:

$$Q_{ХХУ} = \frac{a \cdot m \cdot c \cdot (t_{хал} - t_{хүй})}{T} \quad (4)$$

энд:

a – нэг хүний хоногийн халуун усны хэрэглээ, л/хоног

m – хэрэглэгчийн тоо, хүн

c – усны хувийн дулаан багтаамж, кДж/(кг·°C)

$t_{хал}$, $t_{хүй}$ – халуун болон хүйтэн усны температур, °C

T – хэрэглээний үргэлжлэх хугацаа, цаг

Зүүнбаян сумын төвлөрсөн дулаан хангамжид холбогдсон 396 өрхийг нэг өрхөд дунджаар 3.5 хүнтэй гэж үзвэл нийт хэрэглэгчийн тоо:

m=396·2.7=1069.2≈1070 хүн

Хэрэгцээний халуун усны дулааны ачааллыг тодорхойлохдоо нэг хүний хоногийн халуун усны хэрэглээг 50 л, халуун усны температурыг 60°C, хүйтэн усны температурыг 5°C, усны хувийн дулаан

багтаамжийг 4.187 кДж/(кг·°C), хэрэглээний хугацааг 8 цаг гэж авч үзэв.

Тооцоонд өгөгдлүүдийг орлуулбал:

$$Q_{ХХУ} = \frac{50 \cdot 1070 \cdot 4.187 \cdot (60 - 5)}{8}$$

$$Q_{ХХУ} = 1.54 ГДж/цаг$$

Хэрэгцээний халуун усны дулааны жилийн хэрэглээг дараах томьёогоор тодорхойлов.

$$Q_{ХХУ}^{жил} = Q_{өвөл}^{дун} \cdot \eta_д + Q_{зун}^{дун} \cdot (8760 - \eta_д) \quad (5)$$

энд: $\eta_д$ -дулаацуулгын улирлын үргэлжлэх хугацаа, цаг. Зүүнбаян сумын халаалтын улирал 213 хоног буюу 5112 цаг

$Q_{өвөл}^{дун}$- Хэрэгцээний халуун усны өвлийн дундаж ачаалал

$Q_{зун}^{дун}$ – Зуны улиралд халуун усны хэрэглээ харьцангуй буурдаг тул дундаж ачааллыг 20%-иар бууруулж авлаа .

$$Q_{зун}^{дун} = 0.8 \cdot Q_{өвөл}^{дун} = 0.8 \cdot 1.54 = 1.23 ГДж/цаг$$

Тооцоонд өгөгдлүүдийг орлуулбал:

$$Q_{ХХУ}^{жил} = 1.727 \cdot 5112 + 1.382 \cdot (8760 - 5112)$$

$$Q_{ХХУ}^{жил} = 12603.6 ГДж/жил = 3501 МВт \cdot ц/жил$$

4.3 Нүүрсний хэрэглээний тооцоо

Зүүнбаян сумын дулаан хангамжид ашиглагдаж буй түлшийг Шивээ-Овоогийн хүрэн нүүрс гэж үзэн, жилийн дулааны хэрэглээнд үндэслэн нүүрсний хэрэгцээг тодорхойлов. Жилийн дулааны хэрэглээ Qж=8800Гкал/жил, нүүрсний илчлэг q=2800ккал/кг, хуучин зуухны ашигт үйлийн коэффициент η=0.6 гэж авч тооцлоо. Түлшний жилийн хэрэглээг дараах томьёогоор тодорхойлов:

$$B = \frac{Q_ж}{q \cdot \eta} \quad (6)$$

Тооцоонд өгөгдлүүдийг орлуулбал:

$$B = \frac{8800 \cdot 10^6}{2800 \cdot 0.6}$$

$$B = 5238 тн/жил$$

Иймд Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийн жилийн 8800 Гкал дулааны хэрэгцээг хангахад ойролцоогоор 5238 тн/жил нүүрс шаардлагатай байна. Энэ нь ашиглагдаж буй нүүрсний илчлэг бага, мөн хуучин зуухны ашигт үйлийн коэффициент харьцангуй доогуур байгаатай холбоотойгоор түлшний хэрэглээ өндөр байгааг харуулж байна.

V. НАРНЫ ДУЛААНЫ КОЛЛЕКТОРЫН ТООЦОО

Зүүнбаян сум нь Монгол орны говийн бүсэд байрладаг бөгөөд жилийн турш нарны цацрагийн хэмжээ өндөртэй бүс нутагт хамаардаг. Иймээс дулаан хангамжийн системд нарны дулааны технологийг ашиглах боломжийг судлах нь зүйтэй юм. Нарны дулааны коллектор нь нарны цацрагийг шингээн дулааны энергид хувиргах төхөөрөмж бөгөөд барилгын халаалт болон хэрэглээний халуун ус бэлтгэхэд өргөн ашиглагддаг.

Нарны дулааны коллекторын системийн үр ашгийг тодорхойлохын тулд нарны геометрийн үзүүлэлтүүд, коллекторын байрлал, коллекторын талбай болон үйлдвэрлэх дулааны хэмжээг инженерийн тооцооны аргаар тодорхойлов.

5.1 Нарны дулааны коллекторын сонголт

Зүүнбаян сумын уур амьсгалын нөхцөл, нарны цацрагийн нөөц болон хэрэгцээний халуун усны ачааллын онцлогийг харгалзан нарны дулааны коллекторын төрлийг сонгон авч үзэв. Тус бүс нутаг нь говийн бүсэд хамаарах бөгөөд жилийн турш нарны тусгалын хугацаа их, нарны цацрагийн нөөц өндөр боловч өвлийн улиралд гадна агаарын температур −29°C хүртэл буурдаг эрс тэс уур амьсгалтай тул дулааны алдагдал багатай, бага температурын нөхцөлд тогтвортой ажиллах чадвартай төхөөрөмж сонгох шаардлагатай.

Нарны дулааны коллекторуудыг хийцийн хувьд хавтгай болон вакум хоолойт гэж ангилдаг. Хавтгай коллектор нь хийцийн хувьд энгийн, анхны өртөг харьцангуй бага боловч орчны температур буурах үед дулааны алдагдал ихсэж, ашигт үйлийн коэффициент мэдэгдэхүйц буурах сул талтай. Харин вакум хоолойт коллектор нь вакум тусгаарлалттай бүтэцтэй тул дулаан алдагдлыг эрс бууруулж, бага температурын нөхцөлд өндөр үр ашигтай ажиллах боломжийг бүрдүүлдэг.



2-р зураг. Нарны дулааны коллектор

Судалгаанд **Apricus ETC-30** загварын вакум хоолойт нарны дулааны коллекторыг сонгон авч үзэв. Тус коллектор нь 30 ширхэг вакум хоолойтой, 2.84 м² ашигтай талбайтай бөгөөд дулаан дамжуулах хоолойн (heat pipe) технологиор ажилладаг. Ийм хийцийн нарны коллектор нь дулааны алдагдал багатай, бага температурын үр ашигтай ажилладаг.

Коллекторын техникийн үзүүлэлт

- Вакум хоолойн тоо: 30 ширхэг
- Ашигтай талбай: 2.84 м²
- Нийт талбай: 4.4 м²
- Нэгжийн дулааны гарц: 1.5–2.0 кВт
- Ажлын температур: 50–90°C
- Ажиллах хэрэгсэл: 6–8 бар

- Ашигт үйлийн коэффициент: η = 0.6–0.75

5.2 Нарны хазайлтын өнцгийн тооцоо

Нарны хазайлтын өнцөг нь нарны туяа дэлхийн экваторын хавтгайтай үүсгэх өнцөг бөгөөд дэлхийн тэнхлэгийн 23.45° хазайлтаас шалтгаалан жилийн турш өөрчлөгдөж байдаг. Нарны хазайлтын өнцгийг дараах Куперийн томьёогоор тодорхойлно.

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \quad (7)$$

энд:

δ – нарны хазайлтын өнцөг (градус)
n – жилийн тухайн өдрийн дугаар

Иймээс тухайн өдөр нарны хазайлтын өнцөг ойролцоогоор 0° байна.

Нарны өндрийн өнцөг нь нар тэнгэрт ямар өндөр байрлаж байгааг илэрхийлдэг. Нарны өндрийн өнцгийг дараах томьёогоор тодорхойлно.

$$\alpha = 90^0 - \varphi + \delta \quad (8)$$

энд: α – нарны өндрийн өнцөг
φ – газрын өргөрөг
δ – нарны хазайлтын өнцөг

Зүүнбаян сумын өргөрөг: $\varphi = 44^0$
Тэгвэл:

$$\alpha = 90^0 - 44^0 + 0$$

Иймээс тухайн бүсэд нарны дундаж өндрийн өнцөг ойролцоогоор 46° байна.

Нарны коллекторын үр ашгийг нэмэгдүүлэхийн тулд коллекторын налуу өнцгийг зөв сонгох шаардлагатай. Коллекторын оновчтой налуу өнцгийг тухайн газрын өргөрөг дээр үндэслэн тодорхойлно.

$$\beta = \varphi + 10^0 \quad (9)$$

Энд:β – коллекторын налуу өнцөг
φ – газрын өргөрөг

Зүүнбаян сумын хувьд:

$$\beta = 44^0 + 10^0 = 54^0$$

Иймээс коллекторыг 50–55° налуу өнцгөөр байрлуулах нь тохиромжтой.

5.3 Коллекторын үйлдвэрлэх дулааны хэмжээ

Зүүнбаян сум нь Монгол орны говийн бүсэд байрладаг бөгөөд жилийн турш нарны цацрагийн хэмжээ өндөртэй бүс нутагт хамаардаг. Иймээс нарны эрчим хүчийг хэрэгцээний халуун ус бэлтгэхэд ашиглах боломж өндөр юм. Хэрэгцээний халуун усны ачаалал нь халаалтын ачааллаас ялгаатайгаар жилийн турш харьцангуй тогтвортой байдаг тул нарны дулааны коллектор ашиглахад хамгийн тохиромжтой хэрэглээний нэг болно.

Нарны дулааны коллекторын системийн хүчин чадлыг тодорхойлохдоо тухайн бүс нутгийн нарны нийлбэр цацраг, коллекторын талбай, системийн ашигт үйлийн коэффициент зэрэг үндсэн үзүүлэлтүүдийг харгалзан үздэг. Коллекторoор үйлдвэрлэх дулааны хэмжээг дараах томьёогоор тодорхойлно.

$$Q = A \cdot G \cdot \eta \quad (10)$$

энд:

Q – үйлдвэрлэх дулааны хэмжээ (кВт·ц)
A – коллекторын нийт талбай (м²)
G – нарны нийлбэр цацраг (кВт·ц/м²)
η – коллекторын ашигт үйлийн коэффициент

Монгол орны говийн бүсийн жилийн нарны нийлбэр цацраг ойролцоогоор 1500–1600 кВт·ц/м² байдаг. Судалгаанд нарны цацрагийн дундаж утгыг 1550 кВт·ц/м² гэж авч үзэв. Нарны вакум коллекторын ашигт үйлийн коэффициент дунджаар 0.45–0.55 байдаг бөгөөд тооцоонд 0.5 гэж үзсэн.

Ингэснээр коллекторын жилд үйлдвэрлэх боломжит дулааны хэмжээ:

Зүүнбаян сумын хэрэгцээний халуун усны жилийн дулааны хэрэгцээ өмнөх тооцоогоор $Q_{ХХУ}$ =3501МВт·ц/жил байна. Иймээс хэрэгцээний халуун усны хэрэгцээг нарны дулааны коллекторoор хангах тохиолдолд шаардлагатай коллекторын талбайг дараах байдлаар тодорхойлов.

$$A = \frac{Q}{G \cdot \eta} \quad (11)$$

$$A = \frac{3501000}{1550 \cdot 0.5} = 4517\text{м}^2$$

Судалгаанд сонгосон Apricus ETC-30 маркийн коллекторын тоог дараах байдлаар тодорхойлов:

$$N = \frac{A}{A_1} = \frac{4520}{2.84} = 1591 \text{ ширхэг}$$

Иймээс Зүүнбаян сумын хэрэгцээний халуун усны жилийн хэрэгцээг бүрэн хангахын тулд ойролцоогоор 1591 ширхэг коллектор,_7000 м² коллекторын талбай шаардлагатай байна.

5.4 Дулааны насос ба хосолсон систем

Дулааны насос нь бага температуртай орчноос (агаар, хөрс, ус) дулааны энергийг авч, өндөр температурт дамжуулан халаалтын системд ашигладаг төхөөрөмж юм. Энэ нь цахилгаан энерги ашиглан дулааныг “шахаж” зөөвөрлөх зарчмаар ажилладаг бөгөөд уламжлалт дулааны эх үүсвэрээс хэд дахин өндөр үр ашигтай байдаг.

Дулааны насосны үр ашгийг дараах томьёогоор илэрхийлнэ:

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (12)$$

энд:Q — гаргаж буй дулаан (МВт)
W — цахилгаан хэрэглээ (МВт)

Карногийн онол (идеал нөхцөл)

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (13)$$

энд:T_1 — системийн температур

T_2 — эх үүсвэрийн температур

Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийг дан ганц нэг эх үүсвэрээр хангах нь техникийн болон эдийн засгийн хувьд оновчтой биш тул нарны дулааны коллектор болон дулааны насосыг хослуулсан системийн хувилбарыг авч үзэв. Хосолсон системийн үндсэн санаа нь нарны эх үүсвэрээр хэрэгцээний халуун усыг хангаж, үлдэх ачааллыг дулааны насосоор нөхөхөд оршино. Иймд байдлаар уламжлалт нүүрсэн эх үүсвэрийн ачааллыг бууруулах, түлшний хэрэглээг багасгах, системийн нийт үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжтой.

5.6 Дулааны насосны цахилгаан чадлын тооцоо

Дулааны насосны үр ашгийг илэрхийлэх үндсэн үзүүлэлт нь COP буюу дулаан хувиргалтын коэффициент юм. Судалгаанд агаар-ус төрлийн дулааны насосны дундаж үр ашгийг:

$$COP = \frac{333}{333 - 244} = 3.74$$

гэж авч үзэв. Энэ нь 1 кВт цахилгаан эрчим хүчээр 3.7 кВт дулаан үйлдвэрлэнэ гэсэн үг юм.

Дулааны насосны шаардагдах цахилгаан чадлыг дараах томьёогоор тодорхойлно.

$$W = \frac{Q}{COP} \qquad (14)$$

Тооцоолбол:

$$W = \frac{3.64}{3.74} = 0.97 \text{ МВт}$$

Иймээс дулааны насосоор 3.64 МВт дулаан үйлдвэрлэхийн тулд ойролцоогоор 0.97 МВт цахилгаан чадал шаардлагатай байна.

Жилийн цахилгаан хэрэглээ

Зүүнбаян сумын халаалтын улирлын үргэлжлэх хугацаа:

$$\tau = 213 \cdot 24 = 5112 \text{ цаг}$$

Дулааны насосны жилийн цахилгаан хэрэглээг дараах томьёогоор тодорхойлно.

$$E = W \cdot \tau \qquad (15)$$

Тэгвэл:

$$E = 0.97 \cdot 5112 = 5{,}878.8 \text{ МВт} \cdot \text{ц/жил}$$

Иймээс хосолсон системийн нөхцөлд дулааны насосны жилийн цахилгаан хэрэглээ 5879 МВт·ц/жил байна.

Хосолсон системийн хувьд нарны дулааны коллектор нь түлшгүйгээр дулаан үйлдвэрлэх давуу талтай боловч улирлын болон хоногийн хэлбэлзлээс хамаарна. Харин дулааны насос нь тогтвортой ажиллах боломжтой боловч цахилгаан эрчим хүчний эх үүсвэр шаардана. Иймээс эдгээрийг хослуулан ашигласнаар нэг системийн сул талыг нөгөө системийн давуу талаараа нөхөх боломжтой.

5.7 Харьцуулсан үнэлгээ

Одоогийн нүүрсэн систем ба сэргээгдэх эрчим хүчний хосолсон системийн ерөнхий харьцуулалтыг 4-р хүснэгтэд нэгтгэн үзүүлэв

4-Р ХҮСНЭГТ

Д/Д	Гадна агаарын температураас хамаарсан дулааны ачаалал		
	Үзүүлэлт	***Нүүрсэн систем***	***Нар + дулааны насос***
1	Жилийн дулааны хэрэгцээ	8395 Гкал/жил	8395 Гкал/жил
2	Нүүрсний хэрэглээ	5238 тн/жил	Эрс буурна
3	Жилийн түлш/цахилгаан шууд зардал	523.8 сая төг/жил	1,646 сая төг/жил
4	Анхны хөрөнгө оруулалт	Харьцангуй бага	Харьцангуй өндөр
5	CO_2 ялгаралт	11,943 тн/жил	Мэдэгдэхүйц буурна
6	Үнс, шаарга	Үүснэ	Үүсэхгүй
7	Орон нутгийн агаарын бохирдол	Их	Бага

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар Дорноговь аймгийн Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийн системийн өнөөгийн байдал, дулааны ачаалал, жилийн дулааны хэрэглээ болон нүүрсний хэрэглээг инженерийн тооцоонд тулгуурлан тодорхойлж, сэргээгдэх эрчим хүч ашиглах боломжийг үнэллээ. Судалгааны үр дүнгээр тус сумын халаалтын тооцоот ачаалал 3.29 Гкал/ц, жилийн дулааны хэрэглээ 8395 Гкал/жил байгааг тогтоосон. Одоогийн байдлаар төвлөрсөн системд хэрэгцээний халуун усны хангамж хангалтгүй бөгөөд энэ нь оршин суугчдын ахуйн наад захын хэрэгцээг бүрэн хангаж чадахгүй байгааг харуулж байна. Иймээс судалгаанд хэрэгцээний халуун усны ачааллыг нэмэлтээр тооцож, жилийн хэрэглээг 3501 МВт·ц/жил гэж тодорхойлсон. Энэ нь цаашид сумын дулаан хангамжийн системийг сайжруулахад зайлшгүй авч үзэх шаардлагатай ачаалал бөгөөд жилийн турш тогтвортой хэрэглээ үүсгэх онцлогтой юм. Одоогийн дулаан хангамжийн систем нь нүүрсэн түлшинд тулгуурласан, ашигт үйлийн коэффициент харьцангуй бага, мөн түлшний тээвэрлэлт, үнс зайлуулалт зэрэг нэмэлт зардал ихтэй байна. Жилийн нүүрсний хэрэглээ 5238 тн, үүнээс үүсэх CO_2 ялгаралт 11,943 тн/жил байгаа нь байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөө өндөр байгааг илэрхийлж байна. Сэргээгдэх эрчим хүчний нөөцийн үнэлгээгээр Зүүнбаян сум нь нарны цацрагийн өндөр нөөцтэй бүсэд хамаарах бөгөөд хэрэгцээний халуун усны ачааллыг нарны дулааны коллекторoор хангах боломжтой нь тогтоогдсон. Мөн халаалтын үндсэн ачааллыг дулааны насосоор хангах нь техникийн хувьд боломжтой бөгөөд системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх нөхцөлийг бүрдүүлж байна. Нарны дулааны коллектор болон дулааны насосыг хослуулан ашиглах нь одоогийн системд байхгүй

байгаа хэрэгцээний халуун усны хангамжийг шийдвэрлэхийн зэрэгцээ нүүрсний хэрэглээг бууруулах, дулаан хангамжийн найдвартай байдлыг сайжруулах, байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөг багасгах цогц шийдэл болох нь тогтоогдлоо. Иймээс Зүүнбаян сумын дулаан хангамжийн системийг сэргээгдэх эрчим хүчид суурилсан хосолсон шийдлээр хөгжүүлж, хэрэгцээний халуун усны төвлөрсөн хангамжийг шинээр бий болгох нь техник, эдийн засаг, нийгмийн хувьд үндэслэлтэй гэж дүгнэж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] С. Батмөнх, Ба. Бат-Эрдэнэ, Н.И. Воропай, “Монголын эрчим хүчний салбарын хөгжил: тойм, бодлого, шинжилгээ, загварчлалын асуудал,” *Эрчим хүч & Engineering*, Улаанбаатар, №197, 2020.

[2] Д. Цэрэндулам, *Нарны эрчим хүчний ашиглалт*, Улаанбаатар, Монгол Улс, 2012.

[3] С. Батмөнх, Монголын нөхцөлд нарны энергийг дулаанд хувиргах технологийн онол, практикийн үндэс, Улаанбаатар, 2014

[4] Ө. Мөнхбаатар, *Нарны эрчим хүчний нөөц ба судалгаа*, Улаанбаатар, 2012.

[5] С. Батмөнх, Ба. Бат-Эрдэнэ ба Н.И. Воропай, “Монголын эрчим хүчний салбарын хөгжил: I. Тойм, бодлого, шинжилгээ, загварчлалын асуудал,” Эрчим хүч&Engineering. Улаанбаатар, № 197, 2020 оны 7-р сар.

[6] Б. Намхайням, Н. Цолмон, *Байгаль орчин, эрчим хүч, технологи*, Улаанбаатар, 2014.

[7] *Улаанбаатар хотын дулааны сүлжээнд сэргээгдэх эрчим хүчийг нэгтгэх судалгаа*, Улаанбаатар, 2022.

[8] ШУТИС, *Дулаан хангамжийн онол ба тооцооны гарын авлага*, Улаанбаатар.

[9] “Нарны дулааны системийн техник-эдийн засгийн үндэслэл (ТЭЗҮ)”, Улаанбаатар, 2023.

ФАЗЗИ ЛОГИК ДЭЭР СУУРИЛСАН ПРОПОРЦИОНАЛЬ ИНТЕГРАЛ ДИФФЕРЕНЦИАЛ УДИРДЛАГА

Амарсайханы АМГАЛАНБААТАР[1], Баатарын НЯМБАЯР[2]

[1,2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан техникийн салбар

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: amgaa0217@yahoo.com[1], b_nyambayar@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Барилгын дотоод орчны агаарын чанар нь оршин суугчдын эрүүл мэнд, тав тух болон хөдөлмөрийн бүтээмжид шууд нөлөөлдөг тул ашиглалтын горим, ачааллын хэлбэлзэлд нийцүүлэн ухаалгаар удирдах шаардлагатай байдаг. Уламжлалт пропорциональ–интеграл–дифференциал (PID) удирдлага нь тогтвортой ажиллагаатай боловч барилгын дулааны системийн шугаман бус динамик шинж, гадаад нөлөөлөл болон параметрийн тодорхой бус байдлын үед дасан зохицох чадвар султай. Энэхүү дутагдалтай талыг шийдвэрлэхийн тулд тус судалгаагаар Фаззи логик дээр суурилсан, өөрийгөө тохируулах чадвартай PID удирдлагын алгоритмыг боловсруулж, MATLAB орчинд симуляц гүйцэтгэв. Фаззи-PID удирдлага нь системийн алдаа болон түүний өөрчлөлтийн хурдад үндэслэн коэффициентуудыг бодит хугацаанд динамикаар оновчлон тохируулдаг. Симуляцын үр дүнгээс харахад санал болгож буй арга нь уламжлалт PID удирдлагатай харьцуулахад шилжилтийн процессын хугацааг богиносгож, хэтрэлтийг багасган, гадаад орчны нөлөөлөлд илүү тогтвортой ажиллаж байгаа нь батлагдлаа.**

Түлхүүр үг: Фаззи логик PID удирдлага; PID удирдлага; Халаалт, агаар сэлгэлтийн удирдлага.

I. УДИРТГАЛ

Пропорциональ–интеграл–дифференциал (PID) удирдлага нь орчин үеийн удирдлагын онолууд эрчимтэй хөгжиж буйг үл хамааран үйлдвэрлэлийн процессын автоматжуулалтад хамгийн өргөн ашиглагддаг. PID удирдлага түгээмэл байгаа нь түүний алгоритмын бүтэц энгийн, ажиллагаа найдвартай бөгөөд практик гүйцэтгэл сайтай байдагтай холбоотой. Энэхүү удирдлага нь пропорциональ (P), интеграл (I), болон дифференциал (D) гэсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүдээс бүрдэх бөгөөд эдгээр нь системийн тогтворжих хугацааг богиносгох, тогтвортой төлөвийн алдааг арилгах, хэтрэлтийг бууруулах зэрэг чанарын үзүүлэлтүүдийг оновчлоход чиглэдэг. Удирдлагын хууль нь зорилтот утга $r(t)$ болон системийн бодит гаралтын $y(t)$ зөрүү буюу алдааны дохион дээр үндэслэн актуаторт өгөх удирдлагын командыг боловсруулдаг.Гэвч уламжлалт PID удирдлага нь объектын математик загвар тодорхой бус эсвэл параметрийн өөрчлөлт ихтэй үед дасан зохицох чадвар муутай байдаг. Иймээс сүүлийн жилүүдэд фаззи логик болон хиймэл нейрон сүлжээ зэрэг ухаалаг удирдлагын аргуудыг дасан зохицох системүүдэд ашиглах нь өндөр үр ашигтай болохыг судалгаанууд харуулж байна. Тухайлбал, фаззи өөрөө тааруулдаг PID удирдлага нь онолыг тайлбарлах боломж болон практик дасан зохицох чадварын хооронд зохистой тэнцвэрийг хангадаг. Энэхүү судалгааны ажлын гол зорилго нь янз бүрийн төрлийн процессуудад эрчим хүчний хувиргалтын үр ашгийг дээшлүүлэх, удирдлагын чанарын үзүүлэлтүүдийг сайжруулах чадвартай, өөрийгөө оновчлох удирдлагын системийг боловсруулахад оршино.

II. СУДЛАГДСАН БАЙДАЛ

Фаззи логик дээр суурилсан PID удирдлагын үндэс, Уламжлалт PID удирдлага нь үйлдвэрлэлийн болон инженерийн системүүдэд хамгийн өргөн хэрэглэгддэг хэдий ч системийн параметрүүд хувирах эсвэл шугаман бус шинж чанартай үед тохируулгын коэффициентууд болох kp, ki, kd -ийг тогтмол утгаар барих нь удирдлагын нарийвчлалыг бууруулдаг. Энэхүү асуудлыг шийдвэрлэхийн тулд Л.А.Задегийн анх боловсруулсан Фаззи логикийн онолыг [1], PID удирдлагатай хослуулан ашиглах нь үр дүнтэй байдаг.

Фаззи логик удирдлага нь математик загвар нь нарийн тодорхойлогдох боломжгүй, эсвэл маш төвөгтэй системүүдийг хүний сэтгэхүйн арга барилаар (Лингвистик утгууд дээр тулгуурлан) удирдах боломжийг олгодог. Фаззи-PID удирдлагын систем нь үндсэн гурван үе шатаас бүрдэнэ:

2.1. Фаззификаци:

Системийн бодит оролтын утгуудыг фаззи олонлог буюу хэл шинжлэлийн хувьсагчид (жишээ нь: их, дунд, бага, маш бага) рүү хөрвүүлнэ. Тус судалгаанд удирдлагын оролт нь системийн гаралтын алдаа e(t) болон алдааны өөрчлөлтийн хурд ec(t) байна.

2.2. Фаззи локиг гаргалгаа :

Мэргэжилтний мэдлэг болон туршлага дээр үндэслэн (If-Then) хэлбэрийн дүрмийн санг бүрдүүлнэ. IF-THEN дүрмүүд нь оролтын болон тооцоолсон утгуудыг гаралтын хүссэн утгатай харьцуулан харуулдаг.

Оролтын алдааны төлөв байдлаас шалтгаалан PID коэффициентуудын өөрчлөлтийг (Δkp, Δki, Δkd хэрхэн тохируулахыг III-р бүлэгт тайлбарлана.

2.3 Дефаззификаци:

Гаргалгааны үр дүнд үүссэн фаззи утгыг буцаагаад бодит тоон утга руу хөрвүүлнэ. Энэхүү зарчмаар Фаззи-PID удирдлага нь барилгын халаалт, агаар сэлгэлтийн системийн гадаад температурын хэлбэлзэл, ачааллын өөрчлөлт зэрэг саад нөлөөллийг мэдэрч, өөрийн параметрүүдээ бодит хугацаанд тасралтгүй, оновчтой байдлаар тохируулж ажилладаг.

III. ФАЗЗИ-PID УДИРДЛАГА

Фаззи-PID удирдлага нь уламжлалт PID удирдлагын фаззи дүрмийн багц болон хийх механизмтай хамтад нь ашиглаж, PID-ийн өсгөлтийн коэффициентуудыг бодит хугацаанд тохируулдаг систем юм [2-5].

Фаззи-PID удирдлага уламжлалт шугаман PID удирдлагын оронд сонгодог болон орчин үеийн бүх төрлийн удирдлагын системийн хэрэглээнд ашиглаж болно.

Хэмжигдсэн хувьсагч болон лавлагаа хувьсагчийн хооронд үүсэх алдааг процессын актуаторт өгөх удирдлагын команд болгон хувиргадаг.

Практик загварчлалд эдгээр удирдлагын орох–гарах эквивалент дамжуулалтын шинж чанарын мэдээлэл маш чухал ач холбогдолтой байдаг.

Уламжлалт PID удирдлагууд нь үйлдвэрлэлийн олон салбарт өргөн хэрэглэгддэг. PID удирдлагын ерөнхий тэгшитгэлийг дараах байдлаар илэрхийлнэ:

$$u(t) = K_{pe}(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \qquad (1)$$

Энд удирдлага нь дараах гурван бүрэлдэхүүн хэсгээс тогтоно:

Kp-Пропорциональ гишүүн

Ki-Интеграл гишүүн

Kd-Дифференциал гишүүн

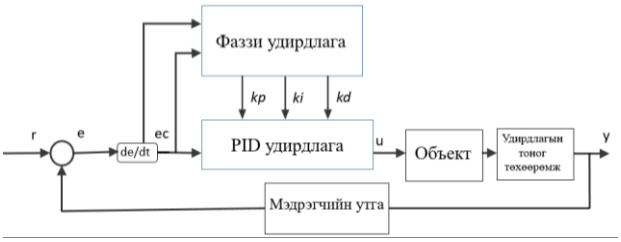
3.1. Фаззи-PID удирдлагын бүтэц

Фаззи-PID удирдлага нь инкрементал фаззи логик удирдлага ашиглан зохион бүтээгдсэн өөрөө дасан зохицох удирдлагын систем юм. PID удирдлага нь дотоод орчны уур амьсгалын удирдлагад (температур, чийгшил, агаарын чанар гэх мэт)-д ашиглагддаг.

Өөрөө тохируулдаг фаззи- PID удирдлага нь хоёр үндсэн хэсгээс бүрдэнэ. Үүнд:

- PID удирдлага
- Фаззи логик удирдлага

Харин фаззи логик удирдлага нь PID удирдлагын параметрүүд болох *kp*, *ki*, *kd* -г онлайн горимд фаззи логикийн дүрмүүдийг ашиглан тохируулж, янз бүрийн ажиллагааны нөхцөлд PID удирдлагын гүйцэтгэлийг сайжруулах үүрэгтэй[6-8].



Зураг 1: Фаззи-PID удирдлагын бүтэц

Фаззи өөрийгөө тохируулах PID удирдлага нь PID удирдлагын гүйцэтгэлийг сайжруулах зорилготой тул PID удирдлагын энгийн бүтцийг хэвээр хадгалдаг. Иймээс уг аргыг хэрэгжүүлэхэд анхны удирдлагын системийн тоног төхөөрөмжийн хэсгүүдэд ямар нэг өөрчлөлт хийх шаардлагагүй.

3.2. PID удирдлагын алгоритм

Дотор орчныг PID удирдлагаар зохицуулдаг бөгөөд энэ нь системийн алдаа e болон алдааны өөрчлөлтийн хурд *ec*-ийг оролт болгон ашигладаг. Эдгээрийг (2) болон (3) тэгшитгэлүүдээр тодорхойлсон.

e(k) нь системийн бодит гаралт болон зорилтот гаралт хоорондын алдааг илэрхийлдэг бөгөөд дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$e(k) = r(k) - y(k) \qquad (2)$$

ec(k) нь e(k) алдааны өөрчлөгдөх хурдыг илэрхийлэх бөгөөд дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$ec(k) = e(k) - e(k-1) \qquad (3)$$

PID удирдлагын гаралт нь халаагуурын ажиллах чадал (ажлын хурд) бөгөөд системийн гаралт нь дотор орчны агаарын температур байна. PID удирдлагын алгоритмыг дараах байдлаар илэрхийлж болно.

$$u(k) = k_p\big(e(k) - e(k-1)\big) + k_i e(k) + k_d\big(e(k) - 2e(k) + e(k-2)\big) \qquad (4)$$

PID удирдлагын гүйцэтгэл нь үндсэндээ PID параметрүүд болох *kp*, *ki*, *kd* -ийн сонголтоос хамаардаг. Фаззи-PID удирдлагын стратегийн фаззи блок нь эдгээр параметрүүдийн утгыг автоматаар тохируулах зорилготойгоор зохион бүтээгдсэн.

3.3. Фаззи блокийн загварчлал

Фаззи логик удирдлагын үүрэг нь цаг хугацааны явцад өөрчлөгдөх алдаа e болон алдааны өөрчлөлтийн хурд *ec*-д үндэслэн фаззи логикийн удирдлагын дүрмүүдийг ашиглаж, PID удирдлагын *kp*, *ki*, *kd* параметрүүдийг онлайн горимоор тохируулах явдал юм. Үүнийг Зураг 2-д үзүүлсэн



Зураг 2: Фаззи блокийн үйл ажиллагааны блок диаграм

PID параметрүүдийн фаззи өөрөө тохируулах нь PID удирдлагын гурван параметр (*kp*, *ki*, *kd*) болон алдаа *e*, алдааны өөрчлөлтийн хурд ec-ийн хоорондох фаззи харилцааг тодорхойлох зорилготой.

Эхлээд системийн гаралт *y*-г хэмжиж, оролт *r*-ээс үндэслэн *e* ба *ec*-г тооцоолно. Дараа нь фаззи удирдлага нь онлайн горимоор фаззи дүрмүүдийг ашиглан гурван параметрийг тохируулж, удирдлага объект руу илүү сайн динамик ба тогтвортой гүйцэтгэл үзүүлэх боломжтой болгоно.

Фаззи дүрмийн сан

Фаззи логикийн дүрмийн сан нь хүний сэтгэлгээний логикийг хэл шинжлэлийн лингвистик утгуудад шилжүүлэн боловсруулдаг тус удирдлагын системийн үндсэн "тархи" юм. Энэхүү дүрмийн сан нь оролтын хувьсагчдын лингвистик утгын төлөв байдлаас хамааран гаралтын хувьсагчид тохирох утгыг оноох замаар системийн удирдлагын шийдвэрийг гаргадаг.

Иймд PID-ийн параметр тус бүрийн үүрэг, системийн алдаанд үзүүлэх нөлөө, удирдлагын гүйцэтгэлд хэрхэн нөлөөлдгийг ойлгох шаардлагатай.

ФАЗЗИ ПАРАМЕТРҮҮДИЙН ТОХИРУУЛГА

1-Р ХҮСНЭГТ .

Параметр	Системийн үзүүлэлтэд үзүүлэх нөлөө			
	Өсөлтийн хугацаа	Тогтвор-жилтын хугацаа	Хэтрэлт	Статик алдаа
Kp өсөхөд	Буурна	Өснө	Бага өснө	Буурна
Ki өсөхөд	Багаар буурна	Өснө	Өснө	Ихээр буурна
Kd өсөхөд	Багаар буурна	Буурна	Буурна	Өөрчлөл бага

Үүний дараа фаззи гаралт (*kp*, *ki*, *kd*) ба фаззи оролт (*e*, *ec*) хоорондын харилцааг тодорхойлж, эцэст нь фаззи дүрмүүдийг байгуулах боломжтой болно.

ФАЗЗИ ИНТЕГРАЛ ДҮРМИН САН

2-Р ХҮСНЭГТ .

e╲ec	ИС	ДС	БС	0	БЭ	ДЭ	ИЭ
ИС	ИЭ	ИЭ	ДЭ	ДЭ	БЭ	0	0
ДС	ИЭ	ИЭ	ДЭ	БЭ	БЭ	0	БС
БС	ДЭ	ДЭ	ДЭ	БЭ	0	БС	БС
0	ДЭ	ДЭ	БЭ	0	БС	ДС	ДС
БЭ	БЭ	БЭ	0	БС	БС	ДС	ДС
ДЭ	БЭ	0	БС	ДС	ДС	ДС	ИС
ИЭ	0	0	ДС	ДС	ДС	ИС	ИС

a. Хүснэгтийн зүүлтийн жишээ. (*Лингвистик утгууд: ИС (Их сөрөг), ДС (Дунд сөрөг), БС (Бага сөрөг), 0 (Тэг), БЭ (Бага эерэг), ДЭ (Дунд эерэг), ИЭ (Их эерэг)*)

ФАЗЗИ ИНТЕГРАЛ ДҮРМИН САН

3-Р ХҮСНЭГТ .

e╲ec	ИС	ДС	БС	0	БЭ	ДЭ	ИЭ
ИС	ИС	ИС	ДС	ДС	БС	0	0
ДС	ИС	ИС	ДС	БС	БС	0	0
БС	ИС	ДС	БС	БС	0	БЭ	БЭ
0	ДС	ДС	БС	0	БЭ	ДЭ	ДЭ
БЭ	ДС	ДС	0	БЭ	БЭ	ДЭ	ИЭ
ДЭ	0	0	БЭ	БЭ	ДЭ	ИЭ	ИЭ
ИЭ	0	0	БЭ	ДЭ	ДЭ	ИЭ	ИЭ

b. Хүснэгтийн зүүлтийн жишээ. (Лингвистик утгууд: ИС (Их сөрөг), ДС (Дунд сөрөг), БС (Бага сөрөг), 0 (Тэг), БЭ (Бага эерэг), ДЭ (Дунд эерэг), ИЭ (Их эерэг))

ФАЗЗИ ДИФФЕРЕНЦИАЛ ДҮРМИН САН

4-Р ХҮСНЭГТ .

e╲ec	ИС	ДС	БС	0	БЭ	ДЭ	ИЭ
ИС	БЭ	БС	ИС	ИС	ИС	ДС	БЭ
ДС	БЭ	БС	ИС	ДС	ДС	БС	0
БС	0	БС	ДС	ДС	БС	БС	0
0	0	БС	БС	БС	БС	БС	0
БЭ	0	0	0	0	0	0	0
ДЭ	ИЭ	БС	БЭ	БЭ	БЭ	БЭ	ИЭ
ИЭ	ИЭ	ДЭ	ДЭ	ДЭ	БЭ	БЭ	ИЭ

c. Хүснэгтийн зүүлтийн жишээ. (Лингвистик утгууд: ИС (Их сөрөг), ДС (Дунд сөрөг), БС (Бага сөрөг), 0 (Тэг), БЭ (Бага эерэг), ДЭ (Дунд эерэг), ИЭ (Их эерэг))

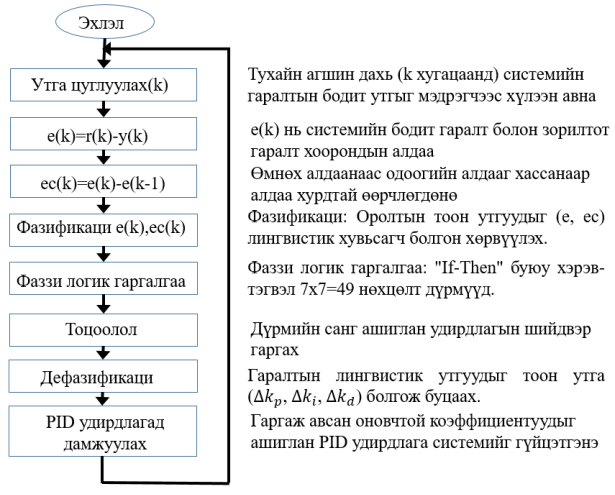
Фаззи дүрмийн сан болон гишүүнчлэлийн функцийн дагуу Δkp, Δki, Δkd утгуудыг тодорхойлох боломжтой. Үүний дараа *kp*, *ki*, *kd* параметрүүдийг дараах тэгшитгэлүүдийн тусламжтайгаар тооцоолно.

$$k_p(k-1) = f_{kp}(e, ec) = k_p(k) + \Delta k_p(k) \quad (5)$$

$$k_i(k-1) = f_{ki}(e, ec) = k_i(k) + \Delta k_i(k) \quad (6)$$

$$k_d(k-1) = f_{kd}(e, ec) = k_d(k) + \Delta k_d(k) \quad (7)$$

Ингэснээр *kp*, *ki*, *kd* параметрийн шаардлагатай утгуудыг фаззи логик удирдлага ашиглан тодорхойлж, тэдгээрийг PID удирдлагад дамжуулснаар халаалт, агаар сэлгэлтийн төхөөрөмжүүдийг зөв зохистой ажиллуулах боломж бүрдэнэ. Фаззи-PID удирдлагын процессын алгоритмыг Зураг 3-д үзүүлэв.



Зураг 3: Фаззи-PID удирдлагын алгоритм

Хэмжилтийн төхөөрөмжийг ашиглан дээж авах алхам *k*-д удирдлагын өгөгдлийг цуглуулна.

(2) болон (3) тэгшитгэлүүдийг ашиглан системийн алдаа e болон алдааны өөрчлөлтийн хурд ec-ийг тооцоолно.

Гишүүнчлэлийн функцуудыг ашиглан e болон ec-ийг фаззификаци хийнэ.

Дүрмийн санг ашиглан Δkp, Δki, Δkd-ийн фаззи утгуудыг тодорхойлно.

Гишүүнчлэлийн функцуудыг ашиглан Δkp, Δki, Δkd-ийг дефаззификаци хийнэ.

(5) – (7) тэгшитгэлүүдийг ашиглан kp, ki, kd параметрүүдийг тооцоолно.

Тооцоолсон kp, ki, kd параметрүүдийг дотоод температурын хяналтыг хэрэгжүүлэх PID удирдлагад дамжуулна.

IV. СИМУЛАЦИЙН ҮР ДҮН

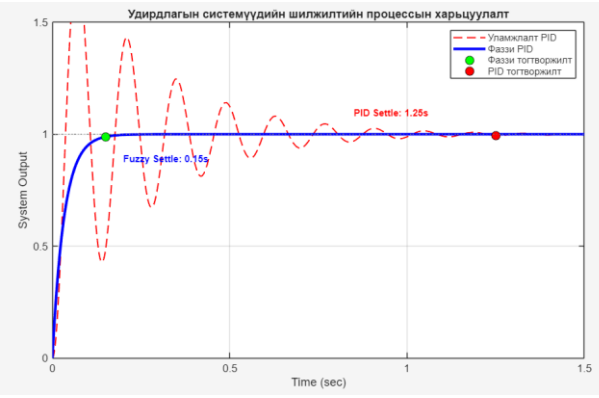
Энэхүү судалгааны ажилд санал болгож буй Фаззи-PID удирдлагын системийг MATLAB программ ашиглан туршиж, симуляцын үр дүнг шинжиллээ. Симуляцын туршилтыг бодит нөхцөлд ойртуулах үүднээс манай орны эрс тэс уур амьсгалтай орчноор тооцон 3м х 2м х 2.5м хэмжээтэй, 0.3м зузаантай ердийн тоосгон ханатай барилгын өрөөг удирдлагын объект болгон тооцсон. Уг өрөөний дотор агаарын чанарыг тогтмол барихад агаар нийлүүлэх сувгийн төгсгөлд байрлах халаагч болон чийгшүүлэгч төхөөрөмжүүдийг гүйцэтгэх механизм болгосон.

Удирдлагын объектын математик загварыг дараах байдлаар өгсөн болно:

Энерги хадгалагдах хууль:
Өрөөний температурын өөрчлөлтийг дараах дифференциал тэгшитгэлээр илэрхийлнэ:

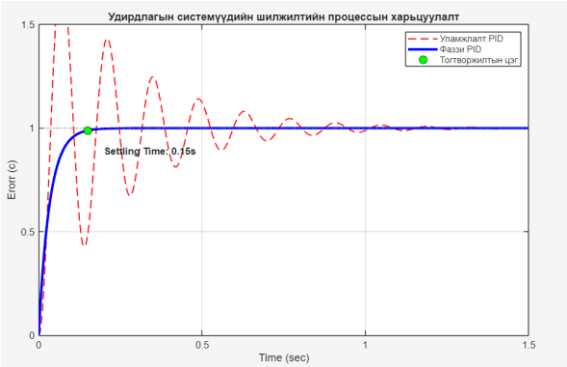
$$\rho_a \cdot C_p \cdot V_i \cdot \frac{dT_i}{d\tau} = Q_{h1} \cdot U_w \cdot A_w \cdot (T_i - T_o) \quad (8)$$

ρ_a — агаарын хувийн дулаан багтаамж,
V_i — өрөөний эзлэхүүн,
dT_i — дотор агаарын температур,
$d\tau$ — хугацаа,
Q_{h1}— дулаан өгөх хурд,
U_w — ханын дулаан дамжуулалтын коэффициент,
A_w — ханын талбай,
T_i— дотор агаарын температур,
T_o — гадна агаарын температур,



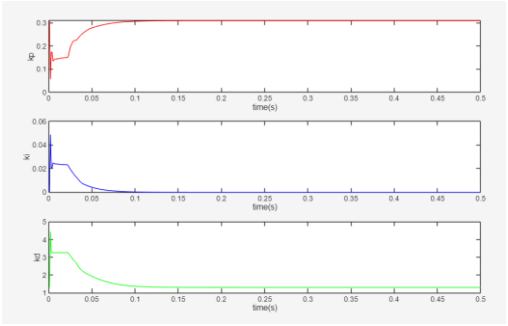
Зураг 4 Фаззи-PID удирдлагын системийн гаралт

Зураг 4 симуляцын үр дүнгээс харахад хариу үйлдэл уламжлалт PID тогтворжих хугацаа 1.25 сек фаззи PID удирдлагын систем нь хурдан, тогтвортой бөгөөд 0.15 с нарийвчлалтай тогтвортой байна. Энэ нь сонгосон удирдлагын алгоритм хурдан хугацаанд тогтвортой ажиллагаанаас харахад ажиллагаа сайн байгааг илтгэнэ.



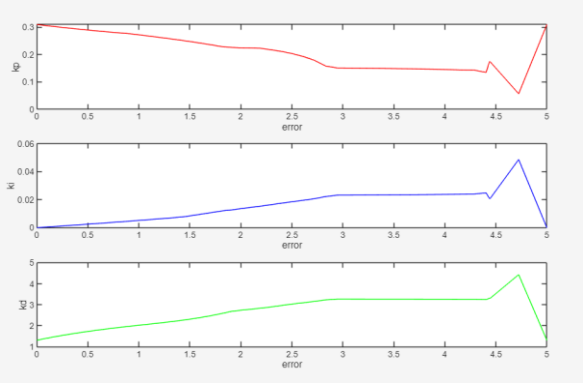
Зураг 5: Симуляцын үе дэх Фаззи-PID удирдлагын алдааны үр дүн

Зураг 5 симуляцийн үр дүн нь удирдлагын алгоритм системийн алдаа болон алдааны өөрчлөлтийн хурд фаззи удирлагад шилжүүлэн PID удирдах нь фаззи PID удирдлагын систем үр дүнтэйг харуулж байна.



Зураг 6: Фаззи-PID удирдлагын PID параметрүүдийн тохируулгын үр дүн

Зураг 6 графикуудаас харахад PID параметрүүд симуляцийн эхний үед динамикаар өөрчлөгдөж, системийн алдааг хурдан багасгах болон тогтвортой ажиллагааг хангахыг харуулж байна. Хугацаа өнгөрөхөд бүх параметрүүд тогтвортой утгад хүрч, удирдлагын системийн тогтвортой байдал болон нарийвчлал сайжирч байгааг харуулж байна. Фазз-PID удирдлагын арга нь системийн динамик шинж чанарт тохируулан параметрүүдийг оновчтой өөрчилж чаддаг болохыг илтгэнэ.



Зураг 7: Фаззи-PID удирдлагын PID параметрүүд алдаа гарах үеийн үр дүн

Зураг 7 энэхүү симуляцын үр дүнгээс харахад PID параметрүүд алдааны хэмжээнээс хамааран динамикаар өөрчлөгдөж, удирдлагын системийн хариу үйлдлийг оновчтой болгож байна. Ийм төрлийн тохируулга нь системийн тогтвортой ажиллагаа, хурдан хариу болон өндөр нарийвчлалыг хангахад чухал ач холбогдолтой фаззи-PID удирдлагын аргын үр ашигтай ажиллагааг илтгэнэ.

V. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар барилгын дотоод орчны агаарын чанарыг удирдах Фаззи логик дээр суурилсан, өөрөө тохируулагч Фаззи-PID удирдлагын алгоритмыг боловсруулж, MATLAB орчинд симуляц гүйцэтгэлээ. Судалгааны үр дүнд дараах дүгнэлтүүдийг гаргаж байна:

- Дасан зохицох чадвар:

Боловсруулсан Фаззи-PID удирдлага нь системийн алдаа (*e*) болон алдааны өөрчлөлтийн хурдад (*ec*) үндэслэн PID-ийн коэффициентуудыг (kp, ki, kd) бодит хугацаанд онлайн горимоор оновчтой тохируулж байгаа нь батлагдлаа.

- Удирдлагын чанар:

Симуляцын үр дүнгээс харахад санал болгож буй арга нь уламжлалт PID удирдлагатай харьцуулахад шилжилтийн процессын хугацааг богиносгож, системийн хэтрэлтийг багасган, гаралтын утгыг тогтоосон лавлагаа утгад илүү хурдан бөгөөд нарийвчлалтай тогтворжуулж байна.

- Тогтвортой байдал:

Фаззи дүрмийн сангийн тусламжтайгаар параметрүүдийг динамикаар өөрчилснөөр барилгын дулааны системийн шугаман бус шинж чанар болон гадаад орчны температурын хэлбэлзэл зэрэг саад нөлөөлөлд систем илүү тогтвортой ажиллах нөхцөлийг бүрдүүллээ.

Иймээс тус Фаззи-PID удирдлагын алгоритмыг барилгын автоматжуулалтын системд нэвтрүүлэх нь дотоод орчны тав тухыг дээшлүүлэхээс гадна эрчим хүчний хэмнэлттэй ажиллагааг хангах ач холбогдолтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information and Control, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.

[2] Z.Y. Zhao, M. Tomizuka, S. Isaka, Fuzzy gain scheduling of PID controllers, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics 23 (1993)

[3] J. Carvajal, L. Chen, and R. K. Ogmen, "Fuzzy PID controller: Design, tuning and control prioritization," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 6, 2000,

[4] B. Hu, G. Mann, R.G. Gosine, A systematic study of fuzzy PID controllers-Function-based evaluation approach, IEEE Transaction on Fuzzy Systems 9 (2001)

[5] Volosencu, C. Pseudo-Equivalence of Fuzzy PID Controllers, WSEAS Transactions on Systems and Control, Issue 4, Vol. 4, April 2009

[6] Kazemian, H. B. (2001). Comperative study of a learning fuzzy PID controller and a self-tuning controller. ISA Transactions

[7] J. Carvajal, G. Chen, H. Ogmen, Fuzzy PID controller: design performance evaluation and stability analysis, Information Science 123 (2000)

[8] D. Kolokotsa, Design and implementation of an integrated intelligent building indoor environment management system using fuzzy logic, advanced decision support techniques, local operating network capabilities and smart card technology, PhD. Technical University of Crete, 2001.

[9] ASTM, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, ASTM Standard D6245-98, 2003.

[10] X. Gu, H. Li, L. Zhao and H. Wang, "Adaptive PID Control of Indoor Air Quality for an Air-Conditioned Room," 2008 ICICTA, Changsha, China, 2008

УРВУУ ТАРХАЛТЫН АЛГОРИТМТАЙ НЕЙРОН СҮЛЖЭЭТЭЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬ ИНТЕГРАЛ ДИФФЕРЕНЦИАЛ УДИРДЛАГА

Амарсайханы АМГАЛАНБААТАР[2], Баатарын НЯМБАЯР[2]

Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан техникийн салбар

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: amgaa0217@yahoo.com[1], b_nyambayar@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Оффис, сургууль, эмнэлэг, худалдааны төв зэрэг барилгууд нь ашиглалтын горим, ачааллын хэлбэлзэл, агаарын чанарт тавигдах шаардлагаараа харилцан адилгүй бөгөөд оршин суугчдын тав тух, эрүүл мэнд, бүтээмжид шууд нөлөөлдөг. Тогтвортой ажиллагаанаас шалтгаалан пропорциональ–интеграл–дифференциал (PID) удирдлага халаалт, агаар сэлгэлтийн системд өргөн хэрэглэгддэг. Гэвч тогтмол параметртэй удирдлагын аргын хувьд барилгын дулааны системд орших шугаман бус динамик шинж, гадаад нөлөөлөл, параметрийн тодорхой бус байдлын үед дасан зохицох чадвар нь хязгаарлагдмал байдаг. Энэхүү судалгааны зорилго нь урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээг ашиглан PID удирдлагын kp, ki, kd параметрүүдийг автоматаар тохируулах явдал юм. Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ удирдлага дээр суурилсан PID удирдлагын алгоритмыг дэлгэрэнгүй судалж, дараа нь удирдлагын гүйцэтгэлийг MATLAB программ хангамж ашиглан симуляц хийсэн. Дотор агаарын чанарыг удирдах хүндрэл нь удирдлагын системийн эвдрэл, хугацааны саатал, хэмжилтийн алдаа зэрэг юм. Үр дүнгээс харахад хосолсон удирдлагын алгоритм нь уламжлалт PID удирдлагатай харьцуулахад системийн тогтвортой байдал, эвдрэл гэмтлээс сэргийлэх, хариу үйлдэл үзүүлэх хурд, жижиг хэт ачааллын хувьд илүү сайн гүйцэтгэлтэй.**

Түлхүүр үг: Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ удирдлага; PID удирдлага; дотор агаарын чанарын удирдлага; халаалт, агаар сэлгэлтийн удирдлага

I. УДИРТГАЛ

Халаалт, агаар сэлгэлтийн системүүд нь барилгын нийт эрчим хүчний хэрэглээний багагүй хувийг эзэлдэг бөгөөд дотор орчны агаарын чанарыг хадгалах үндсэн механизм болдог. Дотоод орчны агаарын чанарын удирдлага нь температур, CO_2 концентраци, харьцангуй чийгшил, агаар сэлгэлтийн түвшнийг тогтвортой байлгах шаардлагатай динамик процесс юм[1].

Дотоод орчны динамик нь дараах шинжүүдтэй:

- Дулааны инерц их
- Удаан хугацааны тогтмол
- Цаг хугацааны хувьд өөрчлөгдөх параметр
- Нарны цацраг, хүний ачааллаас үүсэх саад
- Ажлын горимоос хамаарах шугаман бус байдал

Эдгээр нөхцөлд тогтмол PID коэффициент нь бүх ажиллагааны бүсэд оновчтой ажиллах боломжгүй[2].

Иймээс нейрон сүлжээ, фаззи логик, тооцооллын удирдлагын аргууд нь дасан зохицох чадвартай ухаалаг удирдлагын шийдэл болж өгдөг.

II. УДИРДЛАГЫН АРГУУД

2.1. Удирдлагын аргуудын тойм

Удирдлагын систем гэдэг нь өгөгдсөн хамаарал бүхий даалгаврыг хүний шууд оролцоогүйгээр гүйцэтгэж байгаа болон удирдаж байгаа объект, удирдаж байгаа төхөөрөмж хоёрын хоорондоо харилцан үйлчилж байгаа цогц байдлыг хэлнэ. Дотоод агаарын чанарын удирдлагад уламжлалт арга, PID удирдлага, оновчтой удирдлага, нейрон сүлжээний удирдлага, фаззи логик удирдлага, тооцооллын оюун ухаан, хиймэл оюун ухаан зэрэг аргуудыг хэрэглэгддэг[3]. Гэвч эдгээрийн ихэнх нь:

- Нарийвчилсан загвар шаарддаг
- Параметрийн тодорхой бус
- Дасан зохицох чадвар сул

Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ нь:

- Шугаман бус функцийг ойролцоолох чадвартай
- Өгөгдлөөс суралцах боломжтой
- Онлайн тохируулга хийх боломжтой гэдгээрээ давуу талтай.

2.2. Удирдлагын системийн асуудлууд

Барилгын халаалт, агаар сэлгэлт системд дотор агаарын чанарыг сайжруулах зорилгоор олон төрлийн удирдлагын аргуудыг боловсруулж, нэвтрүүлсэн бөгөөд зарим нь тодорхой нөхцөлд сайн гүйцэтгэл үзүүлдэг. Гэвч одоогийн удирдлагын технологиуд нь бүрэн шийдвэрлэгдээгүй хэд хэдэн асуудалтай хэвээр байна. Эдгээр сул талуудыг дараах байдлаар нэгтгэн дүгнэж болно:

2.2.1 Загварт тулгуурласан тусгайлсан дизайн шаарддаг

Уламжлалт удирдлагын аргууд, тухайлбал PID удирдлага нь барилга удирдлагын систем эсвэл халаалт, агаар сэлгэлт системийн математик загварт үндэслэн зохиогддог. Дасан зохицох чадвартай удирдлага ч гэсэн тодорхой хэмжээний системийн урьдчилсан мэдлэг шаарддаг.

Гэвч бодит нөхцөлд:

- Параметрийн тодорхой бус байдал
- Цаг хугацааны хувьд өөрчлөгдөх динамик шинж чанар

- Загварчлалд тусгагдаагүй нөхцөл байдлын нөлөөлөл

зэргээс шалтгаалан системийн зөрүү үүсэх магадлал өндөр байдаг. Үүний улмаас удирдлагын гүйцэтгэл буурч, систем тогтворгүй болох эрсдэл нэмэгддэг [4-8].

2.2.2 Практикт нэвтрүүлэхэд хүндрэлтэй

PID удирдлагын сул тал нь:

- Гишүүнчлэлийн функцийг нарийвчлалтай тодорхойлох хүндрэл
- Мэргэжлийн мэдлэгийг өгөгдлийн санд системтэйгээр хөрвүүлэх арга зүйн дутагдал
- Параметр тохируулга хийхэд их хугацаа шаарддаг

Нейрон сүлжээ нь параметрүүдийг автоматаар тохируулах боломжтой бөгөөд хөгжүүлэлтийн хугацааг мэдэгдэхүйц бууруулж, гүйцэтгэлийг сайжруулдаг.

Хэдийгээр одоогийн аргууд сайн үр дүнтэй байгаа ч дараах дутагдалтай талууд байна:

- **Заавал загварчлал шаарддаг:** PID болон адаптив удирдлагууд нь барилгын нарийн тодорхойлогдсон математик загвар дээр суурилдаг. Загвар болон бодит байдлын зөрүү нь удирдлагын чанарыг муутгадаг.
- **HVAC технологийн хөгжлөөс хоцорсон:** Одоогийн алгоритмууд нь эрчим хүчний хэмнэлт болон дотоод орчны тав тух агаарын чанарыг нэгэн зэрэг хангах олон зорилтот удирдлагад дутагдалтай байна.

2.3. Ирээдүйн хэтийн төлөв

Дээрх асуудлуудыг шийдвэрлэхийн тулд ирээдүйн халаалт, агаар сэлгэлтийн удирдлагын технологийн хөгжил дараах чиглэлд хөгжүүлэх шаардлагатай.

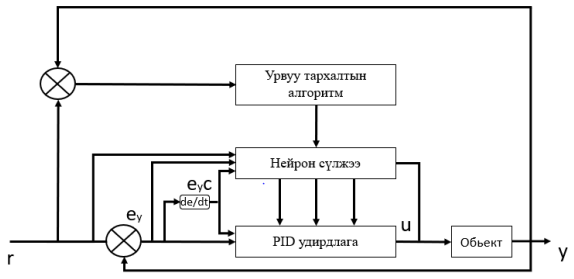
- Уламжлалт болон дэвшилтэт аргуудын давуу талыг нэгтгэсэн холимог аргуудыг нэвтрүүлэх.
- Операторын оролцоо, тусгай мэдлэг шаардахгүйгээр бие даан ажиллах чадвартай систем бүтээх.
- Эрчим хүчний хэмнэлтийг нэмэгдүүлэх
- Дотор орчны чанарыг зохих хэмжээнд байлгах

Олон төрлийн барилгуудын тухай бүрд нь хэрэгцээг хангах

III. УРВУУ ТАРХАЛТЫН АЛГОРИТМТАЙ НЕЙРОН СҮЛЖЭЭ PID УДИРДЛАГА

3.1. Удирдлагын бүтэц

PID удирдлага нь удирдлагын объектыг буюу барилгын орчны дотор агаарын чанарыг удирдахад ашиглагдана. Удирдлагын гүйцэтгэл нь PID удирдлагын параметрүүд болох k_p, k_i, k_d -ийн тохируулгаас шууд хамаардаг бөгөөд эдгээр параметрүүдийг урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ автоматаар тохируулж өгнө.



Зураг 1. Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ PID удирдлагын схем

Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ нь градиент бууралтын аргад суурилсан онлайн сургалтын алгоритмыг ашиглан нейрон сүлжээний жингийн коэффициентуудыг шинэчилнэ. Ингэснээр нейрон сүлжээ нь PID удирдлагад шаардлагатай удирдлагын параметрүүдийг бодит хугацаанд системийн гаралтыг тогтвортой байдлыг ханган удирдах боломж бүрдэнэ.

3.2. PID удирдлагын алгоритм

PID удирдлагын алгоритмыг дараах байдлаар илэрхийлж болно:

$$u(k) = u(k-1) + k_p\{e_y(k) - e_y(k-1)\} + k_i e_y(k) + k_d e_y(k) - 2e_y(k-1) + e_y(k-2) \quad (1)$$

Энд:

u - Удирдлагын системийн гаралт,

k_p—Пропорциональ коэффициент

k_i- Интеграл коэффициент

k_d -Дифференциал коэффициент

e_y -Системийн алдаа буюу өгөгдсөн утга болон бодит утгын зөрүү.

бөгөөд энэхүү алдааг хугацааны эгшин бүрд дараах байдлаар илэрхийлж болно:

$$e_y(k) = y(k) - r(k) \quad (2)$$

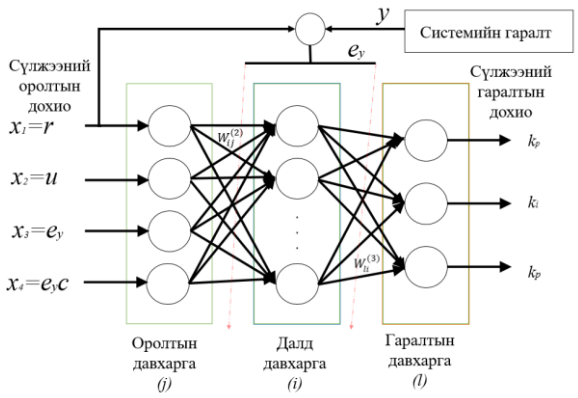
Энд:

y(k) - системийн бодит гаралт,

r(k) - системийн зорилтот гаралт юм.

3.3. Урвуу тархалтын алгоритм бүхий хиймэл нейрон сүлжээ

Нейрон сүлжээ нь хангалттай тооны нейрон бүхий ганц далд давхаргатай байхад л аливаа тасралтгүй функцийг хүссэн нарийвчлалтайгаар ойролцоолон төлөөлөх чадвартай байдаг [9–13]. Иймд энэхүү судалгааны ажилд нэг далд давхарга бүхий хиймэл нейрон сүлжээний бүтцийг сонгон авч, удирдлагын системд ашигласан.



Зураг 2: Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ алгоритмын схем

Зураг 2-т үзүүлснээр санал болгож буй загвар нь 4-н оролт, 3-н гаралт бүхий урвуу тархалтай нейрон сүлжээ бөгөөд нийт 3-н давхаргатай бүтэцтэй. Үүнд:

- Оролтын давхарга
- Нэг далд давхарга
- Гаралтын давхарга

Энэ хэсэгт урагш дамжуулах алгоритм болон урвуу тархаалтын аргаар жинг тохируулах дүрмийг дэлгэрэнгүй авч үзнэ.

1. Оролтын давхарга:

Зураг 1 болон Зураг 2-т үзүүлснээр нейрон сүлжээ нь 4-н оролттой бөгөөд эдгээр нь:

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathrm{r} \\ u \\ ey \\ eyc \end{Bmatrix}$$

Энд r, u болон e_y нь (1) ба (2) тэгшитгэлд тодорхойлогдсон; ба $e_y c$ нь системийн алдааны e_y-ийн өөрчлөгдөх хурд бөгөөд үүнийг дараах байдлаар илэрхийлж болно.

$$e_y c(k) = e_y(k) - e_y(k-1) \qquad (3)$$

Оролтын давхарга дахь нейрон бүрийн гаралтыг дараах байдлаар илэрхийлнэ:

$$O_j^{(1)} = x(j) \qquad (j = 4,3,2,1) \qquad (4)$$

Алгоритмд (1), (2) болон (3) гэсэн дээд индекс нь оролтын давхарга, далд давхарга болон гаралтын давхаргыг илэрхийлдэг.

2. Далд давхарга: Нейроны сүлжээний далд давхаргын нейрон бүрийн оролт дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$in_i^{(2)}(k) = \sum_{j=1}^{4} W_{ij}^{(2)} O_j^{(1)} \qquad (i = 1,2,\ldots,n) \qquad (5)$$

Энд $W_{ij}^{(2)}$ нь оролтын давхаргын нейронуудыг далд давхаргын нейронуудтай холбох жинг илэрхийлнэ.

Нейроны сүлжээний далд давхарга дахь нейрон бүрийн гаралтын утга дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$O_i^{(2)}(k) = f\left(in_i^{(2)}(k)\right) \qquad (6)$$

Энд $f(x)$ нь далд давхаргын идэвхжүүлэх функц бөгөөд нейроны оролтын дохио болон гаралтын дохионы хоорондын функциональ хамаарлыг тодорхойлно. Идэвхжүүлэх функц болгон симметрик сигмоид функцийг сонгосон ба түүнийг дараах хэлбэрээр илэрхийлнэ:

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \qquad (7)$$

3. Гаралтын давхарга: Гаралтын давхаргын нейрон бүрийн оролт дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$in_l^{(3)}(k) = \sum_{i=1}^{N} W_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \qquad (l = 1,2,3 \qquad (8)$$

Энд $w_{li}^{(3)}$ нь далд давхарга болон гаралтын давхаргын нейронуудын хоорондох холболтын жин болно.

Гаралтын давхаргын нейрон тус бүрийн гаралт дараах хэлбэрээр тодорхойлогдоно:

$$O_1^{(3)}(k) = g(in_1^{(3)}(k)) \qquad (9)$$

$$O_1^{(3)}(k) = k_p \qquad (10)$$

$$O_2^{(3)}(k) = k_i \qquad (11)$$

$$O_3^{(3)}(k) = k_d \qquad (12)$$

Энд $g(x)$ нь гаралтын давхаргын идэвхжүүлэх функц бөгөөд нейрон бүрийн оролт ба гаралтын хоорондын хамаарлыг илэрхийлнэ. Гаралтын давхаргын гаралтууд нь PID параметрүүд болох k_p, k_i, k_d байна.

Эдгээр параметрийн утгууд сөрөг байж болохгүй тул гаралтын давхаргад сөрөг бус сигмоид функцийг идэвхжүүлэх функц болгон ашигласан бөгөөд дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$g(x) = \frac{1}{2}\left(1 + \tanh(x)\right) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}} \qquad (13)$$

Нейронийн сүлжээ нь PID удирдлагын параметрүүдийг автоматаар тохируулах боломжтой бөгөөд удирдлагын системийн загварчлалын үйл явцад инженерүүдийн зарцуулах хугацааг мэдэгдэхүйц бууруулна. Гэвч загварт суурилсан процессын удирдлагад загварчлалын алдаа ихэвчлэн үүсдэг бөгөөд энэ нь процессыг өндөр нарийвчлалтай удирдах хүндрэлийг эрс нэмэгдүүлдэг. Иймээс урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээний удирдлагын системийн алдаа e_y -г бууруулах зорилгоор сүлжээний жингүүдийг тохируулах алгоритмыг хэрэглэсэн.

4. Жингийн шинэчлэлт: Энэхүү алгоритмд системийн гаралтын алдааны функцийг дараах байдлаар тодорхойлно:

$$E_y(k) = \frac{1}{2}\left(r(k) - y(k)\right)^2 = \frac{1}{2}e_y^2 \qquad (14)$$

Нейроны сүлжээний загварыг ашиглахаас өмнө процессыг хийх ёстой. Энэхүү процессыг өгөгдлийн дундаж квадрат алдаа хүссэн хамгийн бага хэмжээнд хүрэх хүртэл давтана. Одоогийн ажилд сургалтын процесс нь урвуу тархалт дээр суурилдаг. Урвуу тархалтын үндсэн санаа нь давталтын процесст алдааны функц дээр градиент бууралтын алгоритмыг ашиглан нейроны эсийн жинг тохируулах явдал юм. Ерөнхийдөө далд давхаргаас гаралтын давхарга хүртэлх жин бүрийн тохируулгыг дараах байдлаар илэрхийлж болно:

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E_y(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} \quad (15)$$

Гэвч урвуу тархаалтын алгоритмд ихэвчлэн тохиолддог орчны хамгийн бага асуудлыг зайлсхийхийн тулд санал болгож буй алгоритмд жингийн өөрчлөлтөд хурдасны гишүүн нэмсэн. Энэ нь жингийн энэ удаагийн шинэчлэлт зөвхөн одоогийн алдаанд бус, өмнөх өөрчлөлтүүдэд ч хамаарах гэсэн үг юм. Иймээс далд давхаргаас гаралтын давхарга руу чиглэсэн холболтын жингийн тохируулалтыг дараах байдлаар өөрчилсөн:

$$\Delta w_{li}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E_y(k)}{\partial w_{li}^{(3)}} + \alpha \Delta w_{li}^{(3)}(k-1) \quad (16)$$

Энд

η-Суралцах хурд,

α-Импульсийн хүчин зүйл байна.

$$\frac{\partial E_y(k)}{\partial W_{li}^{(3)}(k)} = \frac{\partial E_y(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial O_1^{(3)}(k)} \cdot \frac{\partial O_1^{(3)}(k)}{\partial in_{li}^{(3)}(k)} \cdot \frac{\partial in_1^{(3)}(k)}{\partial w_{li}^{(3)}(k)} \quad (17)$$

$$\frac{\partial in_1^{(3)}(k)}{\partial w_{li}^{(3)}(k)} = O_i^{(2)}(k) \quad (18)$$

(1), (10), (11) болон (12) тэгшитгэл дээр үндэслэн дараах тэгшитгэлүүдийг тооцоолно:

$$\frac{\partial u(k)}{\partial O_1^{(3)}(k)} = e_y(k) - e_y(k-1) \quad (19)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial O_2^{(3)}} = e_y(k) \quad (20)$$

$$\frac{\partial u(k)}{\partial O_3^{(3)}} = e_y(k) - 2e_y(k-1) + e_y(k-2) \quad (21)$$

Иймээс гаралтын давхаргын жинг шинэчлэх алгоритмыг дараах байдлаар илэрхийлж болно:

$$W_{li}^{(3)}(k+1) = W_{li}^{(3)}(k) + \triangle W_{li}^{(3)}(k) \quad (22)$$

$$\triangle W_{li}^{(3)}(k) = \alpha \triangle W_{li}^{(3)}(k-1) + \eta \delta_1^{(3)} O_i^{(2)}(k) \quad (23)$$

$$\delta_1^{(3)} = e_y(k) \cdot \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial O_l^{(3)}(k)} \cdot g'\left(in_l^{(3)}(k)\right) \quad (24)$$

g(x)-ийн эхний уламжлалыг дараах байдлаар өгнө:

$$g'(x) = g(x)(|-g(x)) \quad (25)$$

Мөн далд давхарга дахь жингийн шинэчлэлтийн алгоритмыг дараах байдлаар илэрхийлж болно:

$$w_{ij}^{(2)}(k+1) = w_{ij}^{(2)}(k) + \triangle w_{ij}^{(2)}(k) \quad (26)$$

$$\triangle w_{ij}^{(2)}(k) = \alpha \triangle w_{ij}^{(2)}(k-1) + \eta \delta_i^{(2)} O_j^{(1)}(k) \quad (27)$$

$$\delta_i^{(2)} = f'\left(in_i^{(2)}(k)\right) \cdot \sum_{l=1}^{3} \alpha\, \delta_1^{(3)} w_{li}^{(3)})(k) \quad (28)$$

f(x)-ийн эхний уламжлалыг дараах байдлаар өгнө:

$$f'(x) = \frac{\left(1-f^2(x)\right)}{2} \quad (29)$$

3.4. Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ дээр суурилсан PID удирдлагын хураангуй

Удирдлагын процесст нейронийн сүлжээнд байгаа жингүүд нь PID удирдлагын хувьд хамгийн сайн PID параметрүүд болох k_p, k_i, k_d-г олж авахын тулд урвуу тархалтын жингийн тохируулгын дүрмээр тооцдог.

Тиймээс удирдлагын системийн доторх агаарын чанарыг хүлээн зөвшөөрөгдөхүйц түвшинд хангаж болно. Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ дээр суурилсан PID-ийн алгоритмыг дараах байдлаар нэгтгэн дүгнэж болно:

1) Нейронийн сүлжээнд жин тус бүрийг $w_{ij}^{(2)}$(k) болон $w_{li}^{(3)}$(k), мөн суралцах хурд η болон импульсийн хүчин зүйл α -г k=1 байх үед эхлүүлнэ.

2) r(k) болон y(k) өгөгдлийг цуглуулж, (2) тэгшитгэлийг ашиглан системийн алдаа еу-г тооцоолно.

3) Нейрон бүрийн оролт болон гаралтыг тооцоолж, PID параметрүүдийг k_p, k_i, k_d гаргана.

4) PID удирдлагын гаралтыг (1) тэгшитгэлийг ашиглан тооцоолно.

5) PID параметрүүдийг k_p, k_i, k_d өөрөө дасан зохицох зохицуулалтыг хэрэгжүүлэхийн тулд нейронийн сүлжээнд байгаа нейрон бүрийн жинг урвуу тархалтын алгоритмаар тохируулна. k=k+1 гэж тохируулаад 1) дүрэм рүү буцна.

IV. СИМУЛЯЦЫН ҮР ДҮН

Урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ дээр суурилсан PID удирдлагын системийг MATLAB программ ашиглан туршсан. Барилгын орчин, дотор агаарын чанар удирдлагын хүндрэл нь удирдлагын саад тотгор болон цагийн саатал байгаа явдал юм. Дотор агаарын чанар удирдлагын санал болгож буй удирдлагын стратегийн хариу үйлдлийн хурд, хэт өндөр, тогтвортой байдал болон дасан зохицох чадвар зэрэг гүйцэтгэлийг хэлэлцэхийн тулд симуляц хийж, үр дүнг шинжил

PID удирдлагын үр нөлөөг үнэлэх симуляцад зориулж 3м (урт) х 2м (өргөн) х 2.5м (өндөр) хананы бүтэц: 0.3м зузаантай объектоор тооцсон. Удирдлагын объектын математик загварыг дараах байдлаар өгсөн болно:

$$y(k) = \frac{a(k) \cdot y(k-1)}{1+y^2(k-1)} + u(k-1) + 0.2u(k-2) \quad (30)$$

Энд $a(k)$ нь цаг хугацааны явцад өөрчлөгддөг параметр бөгөөд дараах байдлаар өгөгдөнө:

$$a(k) = 1.4(1 - 0.9e^{-0.3k}) \quad (31)$$

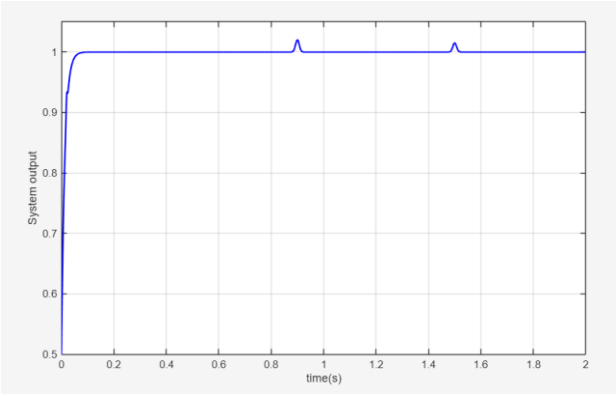
Анхны хурд η =0.28 болон импульсийн коэффициентийг α =04.0 Нейронийн сүлжээний жинг [-0.5, 0.5] мужид санамсаргүй байдлаар эхлүүлнэ.

Нэгдүгээрт, алхам дохио (r (k)=1)-ийг t=0 үед нэвтрүүлнэ. Удирдлагын системийн гаралтын симуляцын үр дүнг Зураг 3-т үзүүлэв.

Зурагт үзүүлсэнчлэн систем нь маш хурдан хариу үйлдэл үзүүлдэг бөгөөд маш бага хэтрэлттэй байна.

Бодит удирдлагын процесст зарим саад тотгорын хүчин зүйлс байдаг тул урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ дээр суурилсан PID удирдлагын системийн бат бөх чанарыг цаашид баталгаажуулахын тулд систем тогтвортой төлөвт байх үед t=0.8 ба t=1.6 гэсэн хоёр саад тотгорын ачааллыг нэмнэ. Зураг 3-т саад тотгор гарсан үед

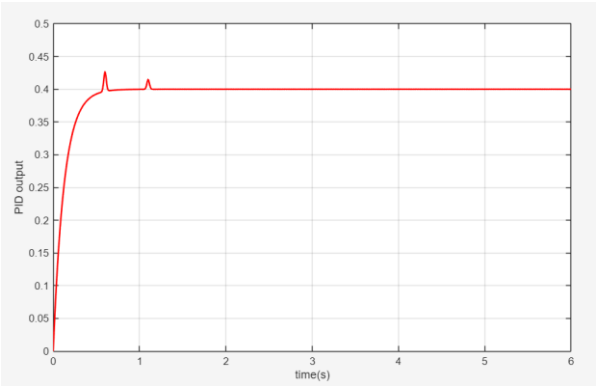
удирдлагын систем хурдан тогтвортой байж, сайн тогтвортой байдлыг хангаж болохыг харж болно.



Зураг 3. Системийн гаралтын алхмын оролтод үзүүлэх хариу үйлдэл

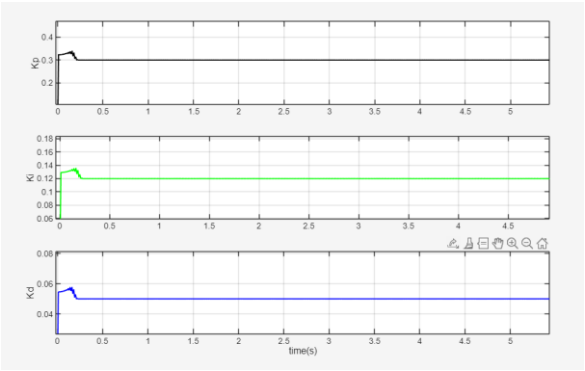
Зураг 4-т PID удирдлагын гаралтын хариу үйлдэл болон гажуудлыг алхам алхмаар оролтын дохионд үзүүлсэн бөгөөд энэ нь боловсруулсан аргыг бага хэлбэлзэлтэй, богино хугацаанд тогтворжуулах замаар гүйцэтгэдэг.

PID параметрүүдийн k_p, k_i, k_d -г автоматаар тохируулах процессыг Зураг 5-д ажиглаж болно. Энэ нь урвуу тархалтын алгоритм дээр суурилсан нейрон сүлжээний удирдлагын схемийг ашиглан зохих PID параметрүүдийг олж авах боломжтойг харуулж байна.



Зураг 4: PID гаралтын алхмын оролтод үзүүлэх хариу үйлдэл

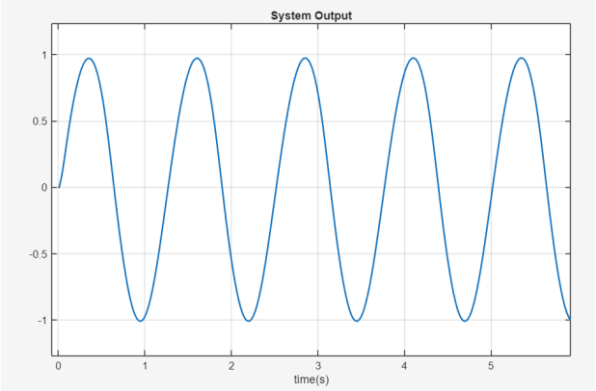
Гэнэт гажуудал нэмэгдэхэд нейронийн сүлжээ нь ийм нөхцөл байдалд хурдан хариу үйлдэл үзүүлж, PID удирдлагыг хамгийн сайн k_p, k_i, k_d -г тооцоолж, системийг тогтвортой болно.



Зураг 5. PID параметрүүдийг автоматаар тохируулах

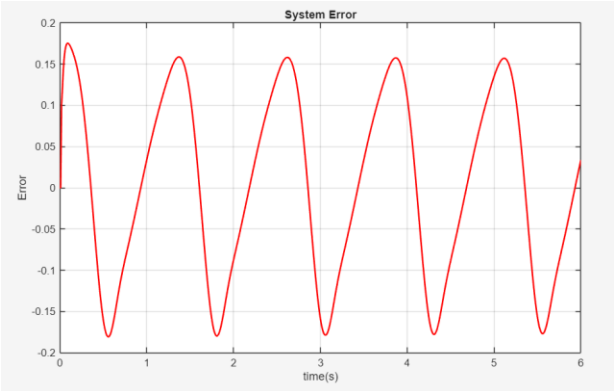
Дараа нь урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ дээр суурилсан ухаалаг PID удирдлагын системийн гүйцэтгэлийг цаашид баталгаажуулахын тулд t=0 үед нэгж синусийн тохируулгын цэг (r(k)= sin(2 π t)) болон t=0.8 ба t=1.6 үед хоёр саад тотгорыг нэвтрүүлдэг.

Нейронийн сүлжээнд анхны жинг санамсаргүй байдлаар сонгодог. Эдгээр тохиромжгүй жин нь удирдлагын гүйцэтгэлийг муутгаж болзошгүй; Гэсэн хэдий ч урвуу тархалтын алгоритмыг ашиглан тэдгээрийг тохируулснаар нейронийн сүлжээнд хүссэн жинг хурдан олж авч, зорилтот системийн гаралтад хүрэхэд ашиглаж болно.



Зураг 6. Синус оролтод системийн гаралтын хариу үйлдэл

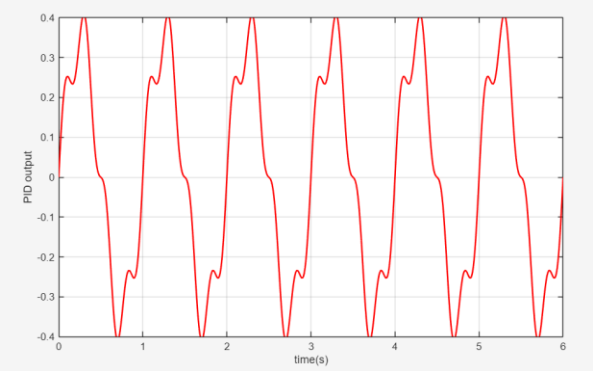
Зураг 6-д синусийн оролтод системийн гаралтын хариу үйлдлийг харуулав. Үр дүнгээс харахад синусийн дохиог сайн удирдлага, шинээр боловсруулсан удирдлага нь цаг хугацааны хувьсах параметр болон цаг хугацааны хувьд өөрчлөгдөж буй системийн лавлагааг даван туулж чадна. Санамсаргүй байдлаар тохируулсан Нейрон сүлжээний жингээс үүдэлтэй байж болох эхэнд том хэтрэлт байхгүй. Гэнэтийн саад тотгор нэмэгдсэнээр ямар ч хэлбэлзэл гараагүй бөгөөд үүнийг Зураг 7-д системийн алдааг дүрсэлсэн хэсэгт илүү тодорхой ажиглаж болно.



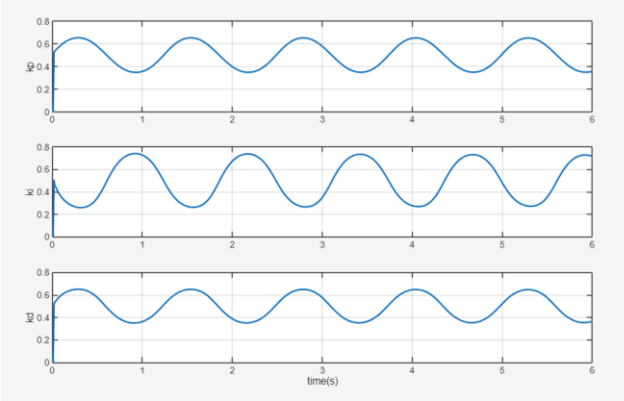
Зураг 7. Системийн алдаа (синус оролт)

Зураг 8-д синус оролтод PID удирдлага гаралтын хариу үйлдлийн үр дүнг харуулсан бөгөөд энэ нь PID удирдлага нь хурдан хариу үйлдэл үзүүлэх хурдтай, тогтвортой тогтвортой төлөвтэй байгааг харуулж байна. Энэ нь PID параметрүүдийг

нарийвчлалтай зохицуулсан бөгөөд k_p, k_i, k_d-ийн автомат тохируулгыг Зураг 9-д үзүүлэв.



Зураг 8. Синус оролтод PID гаралтын хариу үйлдэл



Зураг 9. PID параметрүүдийг автоматаар тохируулах (синус оролт)

Зураг 9-т боловсруулсан нейронийн сүлжээний удирдлагын арга нь параметр болон системийн лавлагааны хугацааны хэлбэлзэлд маш сайн дасан зохицох чадвартай болохыг харуулж байна. Хүссэн гаралтыг янз бүрийн нөхцөлд хурдан гаргаж болно.

V. ДҮГНЭЛТ

Симуляцаар харуулсанчлан, урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ техник нь PID удирдлагын тохиромжтой параметрүүдийг хангах чадвартай бөгөөд зорилтот системийн гаралтыг хангах боломжтой. Шинжилгээнээс харахад урвуу тархалтын алгоритмтай нейрон сүлжээ дээр суурилсан PID удирдлагын системийн хариу хурд, тогтвортой байдал, жижиг системийн алдаа болон дасан зохицох чадвар баталгаажсан байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] B. F. Yu, Z. B. Hu, and M. Liu, “Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health,” International Journal of Refrigeration, vol. 32, 2009.

[2] A. I. Dounis, M. Bruant, and M. Santamouris, “Comparison of conventional and fuzzy control of indoor air quality in buildings,” Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, vol. 4, 1996.

[3] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, “Learning representations by back-propagating errors,” Nature, vol. 323, 1986.

[4] S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines, 3rd ed. New York: Pearson, 2009.

[5] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” Information and Control, vol. 8, 1965.

[6] P. S. Hui, L. T. Wong, and K. W. Mui, “Feasibility study of an express assessment protocol for the indoor air quality of air-conditioned offices,” Indoor and Built Environment, vol. 15, no. 4, 2006.

[7] K. W. Mui, L. T. Wong, P. S. Hui, and K. Y. Law, “Epistemic evaluation of policy influence on workplace indoor air quality of Hong Kong,” Building Services Engineering Research and Technology, vol. 29, no. 2, 2008.

[8] A. K. Persily, “Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide,” ASHRAE Transactions, vol. 103, no. 2, 1997.

[9] ASTM, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, ASTM Standard D6245-98, 2003.

[10] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 62-2007: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Atlanta, 2007.

[11] K. W. Mui and L. T. Wong, “Evaluation of neutral criterion of indoor air quality for air-conditioned offices in subtropical climates,” Building Services Engineering Research and Technology, vol. 28, no. 1, 2007.

[12] G. J. Levermore, Building Energy Management Systems: Applications to Heating and Control. London: E & FN Spon, 1992.

[13] Wang, S., et al. (2021). "Artificial Intelligence in HVAC Systems: A Review."

[14] Li, X., et al. (2022). "Adaptive PID Control Using Neural Networks for Energy-Efficient Building Automation

[15] S. Yang, S. Wu, and Y. Y. Yan, “Control strategies for indoor environmental quality and energy efficiency: A review,” International Journal of Low-Carbon Technologies, 2013.

УУРХАЙН 10 КВ-Н ЦАХИЛГААН ХАНГАМЖИЙН СИСТЕМД SCADA УДИРДЛАГА НЭВТРҮҮЛСЭН ИНЖЕНЕРИЙН ШИЙДЭЛ БА АШИГЛАЛТ

Золжаргалын БААСАНЖАРГАЛ[1], Төмөрбаатарын БАТГЭРЭЛ[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: baasanjargalzoljargal@gmail.com[1], batgerelt@must.edu.mn[2]

***Хураангуй*: Өнөө үед уул уурхайн үйл ажиллагаа тогтвортой, үр ашигтай ажиллахад цахилгаан эрчим хүч найдвартай ажиллагаа, чадлын дутагдалгүй байх нь гол тулгуур болж байна. Иймд цахилгаан хангамжийн системийн ажиллагааг бодит цаг хугацаанд хянах, тоног төхөөрөмжийн төлөв байдлыг үнэлэх, доголдол гэмтлийг шуурхай илрүүлэх боломж бүхий удирдлагыг нэвтрүүлэх шаардлага үүссэн. Энэхүү судалгаанд уул уурхайн 10 кВ цахилгаан хангамжийн системд SCADA** (Supervisory Control and Data Acquisition) **удирдлагын системийг нэвтрүүлэх инженерийн шийдлийг судалж, түүний ашиглалтын үр нөлөөг тодорхойлов. Судалгааны үр дүнгээс харахад SCADA системийг нэвтрүүлснээр цахилгаан хангамжийн найдвартай ажиллагаа сайжирч, тасралтын үед нөөц эх үүсвэрт автоматаар шилжих боломж бүрдсэн. Үүний үр дүнд уурхайн үйлдвэрлэлийн тасралтгүй ажиллагаа хангагдаж, нийт 28,799.892 кВт·цаг цахилгаан эрчим хүчний тасалдлаас урьдчилан сэргийлсэн байна. Мөн бодит цагийн хяналт, мэдээллийн төвлөрсөн боловсруулалт, доголдлыг эрт илрүүлэх боломж нэмэгдсэнээр цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг оновчтой удирдах, алдагдлыг бууруулах, ашиглалтын үр ашгийг дээшлүүлэх боломжтой болох нь тогтоогдсон.**

Түлхүүр үг: Уурхайн цахилгаан хангамж, алсын хяналт, найдвартай ажиллагаа, системийн хяналт интеграци

I. ОРШИЛ

Орчин үеийн уул уурхайн үйлдвэрлэл нь өндөр хүчин чадлын тоног төхөөрөмж, машин механизм тасралтгүй ажиллагаатай технологийн процессууд дээр тулгуурлан ажилладаг бөгөөд эдгээр процессуудын ажиллагаа нь найдвартай цахилгаан хангамжаас шууд хамаардаг. Дэлхийн эрчим хүчний салбарт ухаалаг сүлжээ болон бүрэн автомат хяналтын системийг өргөн ашиглах болсон нь цахилгаан хангамжийн найдвартай ажиллагаа, үр ашгийг нэмэгдүүлж байна. Ялангуяа ил уурхайн олборлолт, баяжуулалт, тээвэрлэлтийн хэсгүүдийн үндсэн үйл ажиллагаанд цахилгаан эрчим хүч нь технологийн үйл ажиллагааг хангах чухал хүчин зүйл болдог. Сүүлийн жилүүдэд дан ганц уул уурхайн салбар гадна бусад салбаруудад ч мөн автоматжуулалт, алсын удирдлагын технологийг нэвтрүүлэх чиг хандлага эрчимтэй нэмэгдэж байна. Уул уурхайн цахилгаан хангамжийн систем нь цахилгаан түгээх сүлжээ, хэрэглэгчид (техник, хөдөлгүүр) гэсэн хоёр үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгээс бүрддэг.

Монгол Улсын эрчим хүчний систем нь уламжлалт, төвлөрсөн эх үүсвэрт тулгуурласан бүтэцтэй бөгөөд ихэнх цахилгаан байгууламжууд нь зөвлөлт Оросын холбооны улсын үеийн техник, стандартын дагуу төлөвлөгдөн баригдсан байдаг [1]. Нийгэм эдийн засагт уул уурхайн үйл ажиллагаа чухлаар нөлөөлдөг болсон өнөө үед эрчим хүчний хэрэглээ эрчимтэй өсөж байгаа хэдий ч тэдгээрийг дагасан шинэ эх үүсвэр, дэд бүтцийн өргөтгөл хангалттай хэмжээнд хийгдээгүй хэвээр байна. Уул уурхайн салбарт технологийн процессууд тасралтгүй үргэлжилдэг бөгөөд цахилгаан хангамжийн аливаа доголдол нь үйлдвэрлэлийн бүтээмж буурах, тоног төхөөрөмжийн зогсолт үүсэх, улмаар эдийн засгийн алдагдал бий болох нөхцөлийг бүрдүүлдэг. Иймд уурхайн цахилгаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг хангах, тоног төхөөрөмжийн төлөв байдлыг бодит цаг хугацаанд хянах, үйл ажиллагааг оновчтой удирдах шаардлагатай. Энэ хүрээнд цахилгаан тоног төхөөрөмжийн ажиллагааг тогтмол хянах, мэдээллийг бодит цаг хугацаанд цуглуулах, удирдлагын шийдвэрийг шуурхай гаргах боломжийг бүрдүүлдэг SCADA хяналт удирдлагын систем хэрэглэгдэх болсон [2]. Бразил улсад хүнс хөдөө аж ахуйн салбарт эрчим хүчний үр ашгийн дээшлүүлэхэд SCADA системийг ашигласан судалгааг хийж гүйцэтгэсэн бөгөөд тус судалгаанд SCADA систем болон автоматжуулалтын дэвшилтэт технологиудыг ашигласнаар эрчим хүчний хэрэглээг оновчтой болгох, алдагдлыг илрүүлэх, өндөр өртөг нөлөө бүхий засвар арга хэмжээг хэрэгжүүлэх боломжтой болохыг тогтоосон [3].

Мөн түүнчлэн аж үйлдвэрлэлийн салбарт эрчим хүчний удирдлагын системийг бүрэн автоматжуулахад ухаалаг эрчим хүчний систем нь бодит цагийн хяналт удирдлагатай, ухаалаг сэлгэн залгах горимтой, алдаа хянах өгөгдөл боловсруулах системтэй байх нь чухал ач холбогдолтойг олон судалгаанд харуулж байна [3-7]. Иймд уламжлалт технологийг ч орчин үеийн хувьсалд шилжүүлэн найдваржилтын түвшнийг сайжруулан алдагдлыг бууруулах шинэ үйл ажиллагааг Монгол орны дан ганц эрчим хүчний салбарт гэлтгүйгээр бүх салбарт нэвтрүүлэх шаардлагатай.

Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь уурхайн 10 кВ-ын цахилгаан хангамжийн системд SCADA удирдлагын системийг нэвтрүүлэх инженерийн шийдлийг судалж, түүний ашиглалтын үр нөлөөг тодорхойлоход оршино. Өмнөговь аймагт байрлах

уул уурхайн орд газрууд нь төвийн эрчим хүчний системээс алслагдсан байрлалтай бөгөөд уурхайн цахилгаан хангамжийн системүүд ихэвчлэн дотоод хэрэгцээнд тулгуурласан, харьцангуй энгийн бүтэцтэйгээр олон жилийн турш ашиглагддаг, гар ажиллагаатай хяналт удирдлага хийхэд болхи байгаа. Иймд уурхайн цахилгаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг сайжруулах, тоног төхөөрөмжийн төлөв байдлыг бодит цаг хугацаанд хянах, төвийн бүсийн нэгдсэн сүлжээнээс үүсэх тасралтыг SCADA хяналт удирдлагын системийг нэвтрүүлснээр ашиглалтын үр нөлөөг сайжруулснаас гадна эдийн үр ашиг нэмэгдсэн.

II. СУДАЛГААНЫ АРГАЧЛАЛ

A. Судалгааны арга зүй ба өгөгдлийн эх үүсвэр

“Эрдэнэс Тавантолгой” ХК (“ЭТТ” ХК)-ийн уурхайн цахилгаан хангамжийн бүтэц нь 10/0.4 болон 6/0.4 кВ-ын хүчдэлийн түвшинд хамаарах ба түгээх сүлжээнд тулгуурласан. Уурхайн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглэгчид нь ус шахуургын худаг, ажилтнуудын оффисын барилга, замын гэрэлтүүлэг, засвар үйлчилгээний барилга байгууламж, тээврийн талбай, хяналт тээвэрлэлтийн авто пүү зэрэг үндсэн үйл ажиллагааны дэмжлэг болон үйлчилгээний зориулалттай объектууд юм. Эдгээр хэрэглэгчид нь нэгдсэн цахилгаан хангамжийн системээс тэжээл авдаг бөгөөд уурхайн талбайд байрлах нийт 5.5 км урттай цахилгаан дамжуулах агаарын шугам, 47 км кабель шугамаар холбогдсон байдаг. Хариуцан ажиллах уурхайн талбай нь 220 км² орчим өргөн уудам нутгийг хамардаг тул тархмал байршилтай объектуудад шуурхай ажиллагаа явуулах, гэмтэл саатлыг богино хугацаанд арилгахад хүндрэлтэй байдаг. Судалгаагаар салбар шугамын тасралт болон хэрэглэгчийн хязгаарлалт харьцангуй өндөр давтамжтай тохиолдож байгаа бөгөөд гар ажиллагаатай үед нөөц тэжээлд шилжүүлэх (сэлгэн залгалт) хугацаа дунджаар 30–60 минут зарцуулагдаж байна.

Иймд уурхайн цахилгаан хангамжийн ерөнхий схем, хэрэглэгчдийн суурилагдсан хүчин чадал болон шугамын тасралтын статистик өгөгдөлд тулгуурлан SCADA системийг нэвтрүүлж, бодит цагийн хяналт болон автомат сэлгэн залгалтыг хэрэгжүүлэх техникийн шаардлагыг тодорхойлов.

B. SCADA системийн архитектур ба холбооны шийдэл

Судалгааны хүрээнд **MicroSCADA X SYS600** платформ дээр суурилсан хяналт, удирдлагын системийг ашигласан. Системийн Workplace X орчинд цахилгаан хангамжийн сүлжээний процессын зураглал үүсгэж, таслуур, салгуур, трансформаторуудын төлөв байдлыг (HMI) дүрслэв. Ингэснээр диспетчер инженер сүлжээний горимыг шуурхай үнэлж, алсаас удирдах нөхцөл бүрдсэн Тус системийг шинээр суурилуулахад үндсэн 4 үе шатнаас бүрдэнэ. Үүнд:

1. Дэд өртөөнүүдийн тоноглолуудын /техник хангамж/ угсралт хийх үе шат;
2. Дэд өртөөнүүдийн шилэн кабелийн угсралтын ажил, холболт хийж гүйцэтгэх үе шат;
3. Программ хангамжийг тоноглолуудтай холбох үе шат;
4. Диспетчер хяналт, удирдлагын өрөөнөөс удирдах, шалгах үе шат;

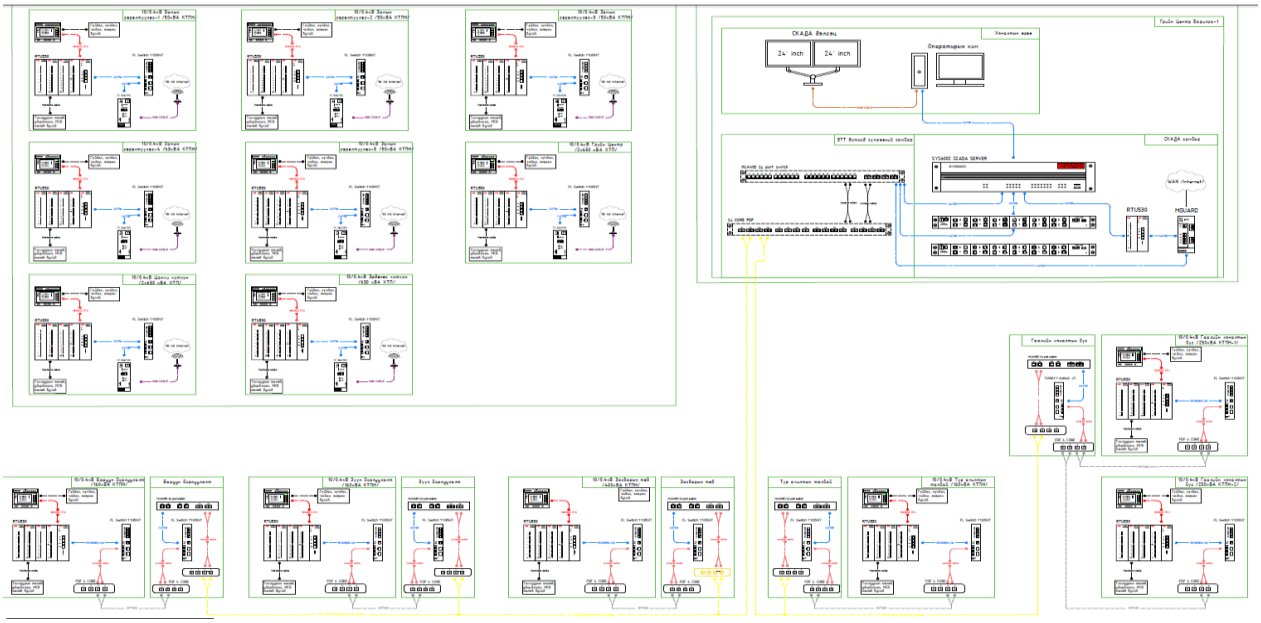
Уул уурхайн цахилгаан хангамжид MicroSCADA X SYS600 платформ дээр суурилсан SCADA хяналт, удирдлагын системийг ашигласан. Төхөөрөмжүүдийн хооронд мэдээлэл дамжуулахад Modbus TCP, IEC60870-5-104, IEC61850, DNP3 протоколуудыг ашигласан бөгөөд шилэн кабелийн сүлжээгээр өгөгдлийг дамжуулж, бодит цагийн хяналт, удирдлагыг хэрэгжүүлж байна. 1-р зураг уурхайн СКАДА сүлжээний топологи схемийг холболтоор үзүүлсэн. Тус схемд харуулсанчлан “ЭТТ” ХК-ийн СКАДА систем нь хоёр үндсэн аргаар зохион байгуулагдсан бөгөөд шилэн кабель татах боломжгүй, алслагдсан дэд өртөөний холболтуудад MGuard ба TC-Router төхөөрөмжүүдийг ашиглаж, СКАДА сүлжээг аюулгүй, тасралтгүй ажиллуулах шийдэл нэвтрүүлсэн.

MGuard төхөөрөмжийн үүрэг:

- MGuard нь “ЭТТ” ХК-ийн дотоод сүлжээнээс Public IP рүү хандалтыг эхлүүлнэ.
- Firewall, NAT, VPN боломжуудыг ашиглан SCADA системийн алсын хяналт, өгөгдлийн дамжуулалтыг сүлжээгээр хангана.

TC-Router төхөөрөмжийн үүрэг:

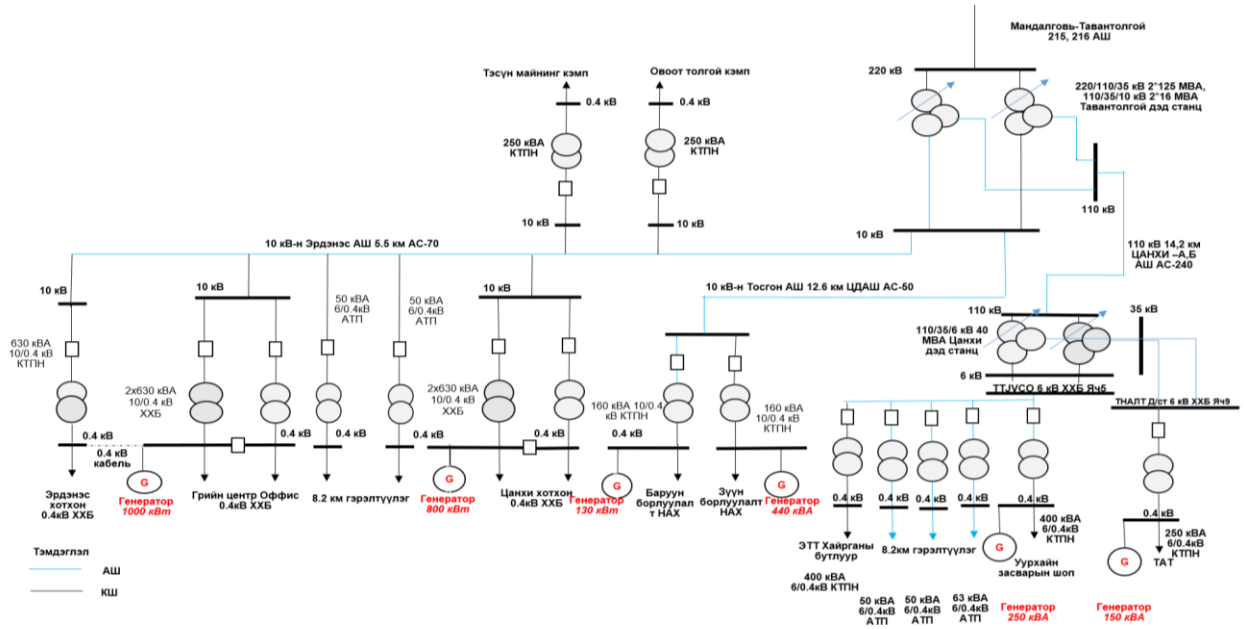
- Дэд станцад суурилуулсан TC-Router нь тухайн байршлаас “ЭТТ” ХК-ийн төвийн IP хаяг руу аюулгүй холболт үүсгэн хандалтын хүсэлт илгээдэг.
- Cellular/3G/4G сүлжээ ашиглан шилэн кабель татах боломжгүй алслагдсан талбайн төхөөрөмжүүдийг СКАДА сервертэй холбох боломжийг олгодог.Үүний тусламжтайгаар тасралтгүй, мэдээллийг хяналт удирдлагын СКАДА системд илгээнэ.



1-р зураг. Уул уурхайн цахилгаан хангамжийн СКАДА сүлжээний схем

III. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ТУРШИЛТ, ТООЦОО

Уул уурхайн цахилгаан хангамжийн ерөнхий схемийг 2-р зурагт, суурилагдсан хүчин чадлыг гаргалга тус бүрээр 1-р хүснэгтэд үзүүлэв. Уурхайн цахилгаан хангамж нь нэгдсэн сүлжээнээс дөрвөн тусдаа цахилгаан дамжуулах агаарын шугамаар холбогддог. Эдгээр шугамын эзэмшил, ашиглалт болон хяналтыг өөр өөр байгууллага хариуцдаг тул гэмтэл саатлын үед шуурхай ажиллагааг нэгдсэн байдлаар зохион байгуулах, бодит цагийн хяналт тавихад хүндрэлтэй байдаг. Судалгаанд хамрагдсан хэсгийн нийт суурилагдсан чадал 4.8 МВА бөгөөд хэрэглэгчийн бүрэлдэхүүнд ажилчдын хотхон, гэрэлтүүлэг, оффисын барилга, тээвэрлэлтийн үйл ажиллагааг хангах объектууд багтаж байна.



2-р Зураг. Уул уурхайн цахилгаан хангамжийн ерөнхий схем

ЦАХИЛГААН ХЭРЭГЛЭГЧДИЙН СУУРИЛАГДСАН ХҮЧИН ЧАДЛЫН МЭДЭЭЛЭЛ

1-Р ХҮСНЭГТ

Д/д	Эх үүсвэрийн холболт	Цахилгаан хэрэглэгч	Суурилагдсан чадал, кВА	Аваарын нөөц тэжээл, кВА
1.	10 кВ-н	Хотхон	2х630	800
2.	Эрдэнэс АШ	Хотхон	630	1,000
3.		Оффис	2х630	
4.		Гэрэлтүүлэг	50	-
5.		Гэрэлтүүлэг	50	-
6.	10 кВ-н Тосгон АШ	Борлуулалт	160	130
7.		Борлуулалт	160	440

8.	110/35/6 кВ-н Цанхи дэд станц	Бутлуур	400	-
9.		Гэрэлтүүлэг	50	-
10.		Гэрэлтүүлэг	50	-
11.		Гэрэлтүүлэг	63	-
12.		Засварын шоп	400	250
13.	35/6 кВ-н ТНАЛТ дэд станц	Түр ачилтын талбай	250	150
14.	**Нийт**		**4,783**	**2,770**

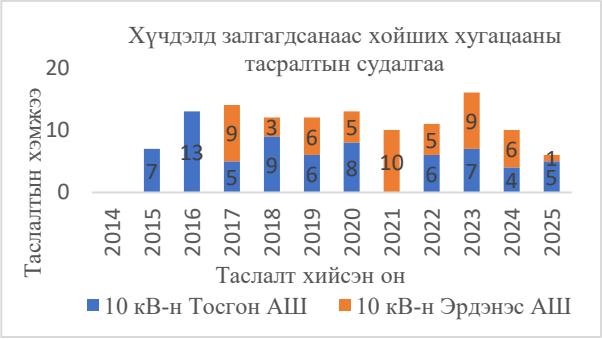
Эдгээр дэд өртөөнүүд нь дараах үндсэн хэсгүүдээс бүрдэнэ. Үүнд:

- 10/6 кВ талын хамгаалалтын болон таслах, залгах аппарат;
- 10/0.4 болон 6/0.4 кВ-ын хүчний трансформатор;
- 0.4 кВ-ын хуваарилах самбар;
- Аваарын дизель генератор;

Үндсэн тэжээлийн шугамуудад 2014 оноос хойш нийт тасралт-199, таслалт-124 бүртгэгдсэн байна Жилд гарсан тасралт, таслалтын харьцуулсан утгыг 3 болон 4-р зураг харуулав. Үндсэн тэжээлд гэмтэл гарах эсхүл төлөвлөгөөт засвар хийх үед аваарын нөөц тэжээл дизель генераторт шилжүүлэх ажиллагааг гар аргаар гүйцэтгэж байгаа нь технологийн процессын тасралтгүй байдлыг алдагдуулж, эдийн засгийн хувьд үр ашиггүй байдалд хүргэж байна.



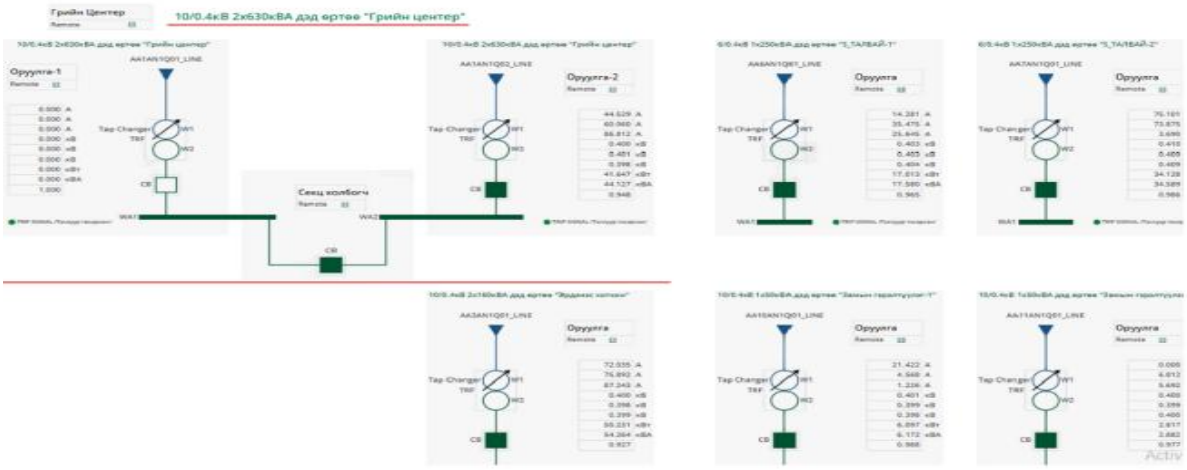
3-р Зураг. Уул уурхайн бүсийн хэрэглэгчийг тэжээж буй агаарын шугамын тасралтын үзүүлэлт



4-р Зураг. Уул уурхайн бүсийн хэрэглэгчийг тэжээж буй агаарын шугамын таслалтын үзүүлэлт

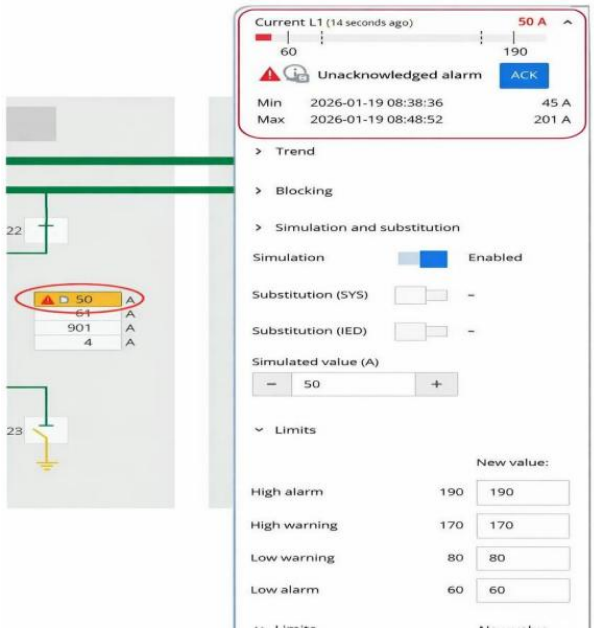
IV. ҮР ДҮН

Уурхайн 10/0.4 болон 6/0.4 кВ-ын КТПН, АТП тоноглолын ажиллагааг алсаас хянах, мэдээллийг төвлөрсөн байдлаар боловсруулах зорилгоор MicroSCADA X SYS600 системийг 2025 оны IV улиралд ашиглалтад оруулсан. Үйл ажиллагаанд нэвтрүүлсэн MicroSCADA X SYS600-ын харагдах байдлыг 5-р зураг үзүүлэв. Автоматжуулалтын хүрээнд 0.4 кВ талын хуваарилах байгууламжуудыг шинэчилж, оруулгын автомат таслуурыудыг солих, мэдээлэл дамжуулах RTU төхөөрөмжийн самбарыг угсрах ажил хийгдсэн. Ингэснээр 10/6 кВ-ын оролт бүр дээрх ачааллыг алсаас хянах боломжтой болсон. RTU төхөөрөмж нь хүчдэл, гүйдэл, чадал зэрэг үндсэн параметрүүдийг бодит цаг хугацаанд цуглуулж, SCADA программ хангамжид дамжуулж байна. Уул уурхайн цахилгаан хангамжийн тасралтгүй ажиллагааг хангах зорилгоор, аваарын нөөц дизель генераторын автомат сэлгэн залгах систем (ATyS)-ийг холболт хийсэн. Үндсэн (нэгдсэн сүлжээ) тэжээл хэвийн үед хэрэглэгчид цахилгаан хангамжийн сүлжээнээс тэжээл авдаг. Харин үндсэн тэжээлийн хүчдэл тасрах үед ATyS ажиллаж, аваарын нөөц тэжээл дизель генераторыг асаах команд өгдөг. Нөөц тэжээлийг тогтвортой ажиллагаанд орсны дараа систем нь ачааллыг генераторт автоматаар шилжүүлдэг. Энэхүү үйл ажиллагаа нь хэрэглэгчийг найдвартай цахилгаан эрчим хүчээр хангах, шуурхай ажиллагааг түргэн шуурхай, хүний оролцоогүйгээр гүйцэтгэх боломжийг бүрдүүлсэн. Мөн энэхүү хяналтын систем нь хэмжилтийн утгуудыг тодорхой хязгаарын утгатай холбон тохируулах боломжтой бөгөөд тухайн параметр тогтоосон дээд эсхүл доод хязгаарыг давсан тохиолдолд систем автоматаар дохиолол үүсгэн хариуцсан ажилтанд мэдээлдэг. SCADA системд дохиоллын харагдах байдлыг 6-р зураг үзүүлэв. Энэ байдал нь тоног төхөөрөмжийн хэвийн бус ажиллагааг эрт илрүүлэх, болзошгүй аваарын нөхцөлийг урьдчилан тодорхойлох, реле хамгаалалтын үйл ажиллагаатай уялдан системийн найдвартай байдлыг нэмэгдүүлэхэд чухал ач холбогдолтой. Уурхайн бүсийн хэрэглээнд ачаалал өсөн нэмэгдэж буй хэсэг болох борлуулалтын дэд өртөөний чадал тохируулж өгснөөр өвлийн их ачааллын үед нийт 18 удаагийн хэрэглээний хяналтыг хийж хэрэглэгчийг найдвартай цахилгаан эрчим хүчээр хангаж ажиллаж чадсан. Зураг хэрэглэгчийн ачаалал тохируулсан хамгийн бага утгаас давсан тул дохиолол өгч мэдэгдсэн байдал, хамгийн их утгад хүрсэн хугацаа зэргийг харуулав.



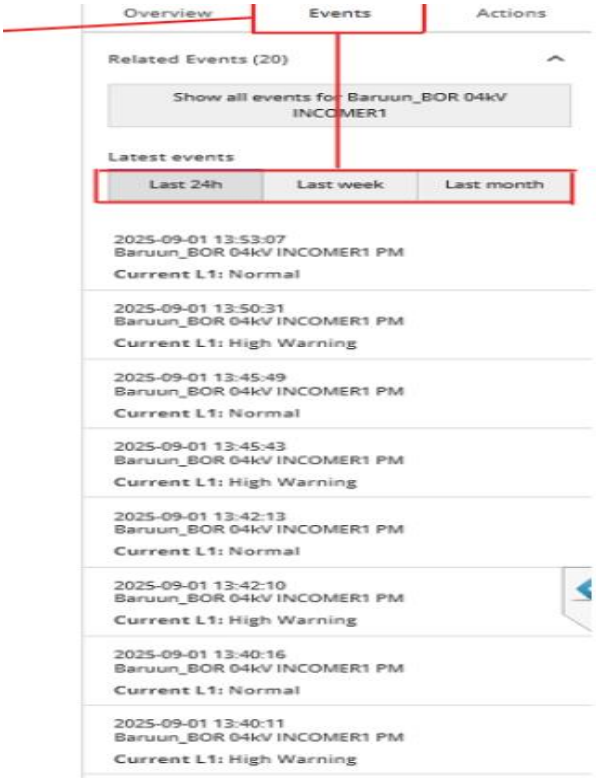
5-р зураг. Хэрэглэгчийн SCADA системд харагдах байдал

SCADA системийн нэг чухал боломж нь системийн ажиллагаатай холбоотой бүх үйл явдлыг бүртгэн хадгалах явдал юм. “Events” буюу үйл явдлын бүртгэлд тоног төхөөрөмжийн төлөв өөрчлөгдөх, дохиолол идэвхжих, хариуцсан ажилтны өгсөн удирдлагын команд, системийн өөрчлөлт зэрэг мэдээлэл цаг хугацааны дараалаар бүртгэгддэг. 7-р зураг үйл ажиллагааны бичилт харагдах байдлыг үзүүлэв. Зурагт борлуулалтын оруулгын таслуурын төлөв, болон оруулгад гарсан ерөнхий өөрчлөлтийн мэдээлэл тухайн өдөр болон долоо хоног, сараар архивлагдан, бүртгэгдсэн харагдаж байна. Хэрэглэгчийн ачааллын өөрчлөлт цагийн интервалтай бүртгэл хийгдсэнээр ачааллыг тэнцвэржүүлэх (фазын тэнцүүлэг)-ийг, схемийн өөрчлөлт хийж чадсан.



6-р Зураг. Уул уурхайн бүсийн хэрэглэгчийн их болон бага чадлыг тохируулсан тохиолдолд дохиолол анхааруулга харагдах байдал.

Энэ нь цахилгаан хангамжийн системд үүссэн гэмтэл, хэвийн бус нөхцөлийг богино хугацаанд илрүүлж, шаардлагатай арга хэмжээг шуурхай авахад чухал үүрэг гүйцэтгэдэг. Үүнээс гадна SCADA систем нь явцын түүх, мэдээллийг хадгалж, тодорхой хугацааны интервалд тайлан гаргах боломжтой. Тайлангийн мэдээллийг CSV болон XML форматад экспортлон бусад программ хангамжид боловсруулж, цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ, ачааллын өөрчлөлт, тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын горимд нарийвчилсан дүн шинжилгээ хийх боломж бүрддэг. [9]



7-р Зураг. Хэрэглэгчийн тасралт болон үйл ажиллагааны бичилт харагдах байдал

SCADA НЭВТРҮҮЛСЭН ҮР ДҮНГИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ

№	Үзүүлэлт	SCADA нэвтрүү-	SCADA нэвтрүүл-	Өөрчлөлт

		лэхийн өмнө	сэн дараа	
1.	Нэгдсэн сүлжээнээс таслалт	124 удаа	3 удаа	Алсаас шилжүүлсэн;
2.	Нэгдсэн сүлжээнээс тасралт	199 удаа	13 удаа	Автоматаар шилжсэн;
3.	Нөөц тэжээлд шилжилт	Гар ажиллагаа	Автомат (ATyS)	Хүний оролцоо багассан;
4.	Хариу үйлдлийн хугацаа	30–60 минут	5–10 минут	~6 дахин хурдассан; (дундаж)
5.	Хяналтын горим	Байршилд очиж багажаар шалгах	Алсаас бодит цагийн хяналт	Бүрэн автомат хяналттай болсон;
6.	Хянагдсан ачааллын шилжилт	Бүртгэлгүй /гар ажиллагаа/	18 удаа SCADA-аар хянасан	Бодит цагийн шуурхай хяналт;
7.	Дутуу түгээгдсэн ЦЭХ	-	28,799.892 кВт·цаг тасалдахаас сэргийлсэн.	Хэрэглэгчийг ЦЭХ-ээр тасралтгүй хангасан;
8.	Үйл ажиллагаа тасалдал	Удаан /гар ажиллагаа/	Хурдан /алсаас, автомат/	Найдвартай байдал сайжирсан;
9.	Мэдээлэл боловсруу-лах	Мэдээлэл дутуу цуглуулах	Төвлөрсөн SCADA систем	Бодит, үнэн зөв архивтай болсон;

MicroSCADA X SYS600 платформ дээр суурилсан SCADA системийг ашигласнаар цахилгаан эрчим хүчний үндсэн параметрүүдийг тасралтгүй хянах, системийн доголдлыг богино хугацаанд илрүүлэх, ашиглалтын үйл ажиллагааг илүү үр ашигтай зохион байгуулах боломж бүрдсэнийг 2-р хүснэгтийн харьцуулалтаас харж болно. Мөн цахилгаан эрчим хүчний чанарын үзүүлэлтүүдийг хянах, мэдээллийг архивлах, боловсруулалт хийх боломж нэмэгдсэнээр цахилгаан хангамжийн системийн ашиглалтын үр ашиг мэдэгдэхүйц сайжирсан. Хяналт, удирдлагын системийг нэвтрүүлснээс хойших 6 сарын хугацаанд нэгдсэн сүлжээнээс 3 таслалт, 13 тасралт гарсан хэдий ч аваарын нөөц тэжээлд шуурхай шилжилт хийгдсэнээр уурхайн үйл ажиллагаа тасралтгүй хэвийн үргэлжилж, 28,799.892 кВт·цаг цахилгаан эрчим хүчний тасалдлаас урьдчилан сэргийлсэн.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд уул уурхайн цахилгаан хангамжийн системд SCADA удирдлагын системийг нэвтрүүлэх инженерийн шийдлийг боловсруулж, туршилт, тооцооны үр дүнд түүний ашиглалтын нөлөөг үнэлэв. Судалгааны үр дүнгээс харахад SCADA системийг нэвтрүүлснээр цахилгаан хангамжийн системийн хяналт, удирдлага сайжирч, тоноглолыг бодит цаг хугацаанд хянах, гэмтэл доголдлыг шуурхай илрүүлэх, нөөц тэжээлийн эх үүсвэрт автоматаар шилжих боломж бүрдсэн. Үүний үр дүнд цахилгаан эрчим хүчний тасалдлаас үүсэх эрсдэл буурч, сэлгэн залгалтын дундаж хугацаа 30-60 минут байснаас 5–10 минут болж, ~6 дахин хугацаа буурсан үзүүлэлттэйгээр уул уурхайн үйлдвэрлэлийн тасралтгүй ажиллагаа хангагдсан байна. Судалгааны хугацаанд нийт 18 удаагийн ачааллын өөрчлөлтийг системээр дамжуулан оновчтой зохицуулж, болзошгүй тасалдал болон үйлдвэрлэлийн зогсолтоос урьдчилан сэргийлж чадсан. Түүнчлэн автоматжуулалтын түвшин нэмэгдсэнээр уул уурхайн цахилгаан хангамжид хүний оролцоо багасаж, цахилгаан эрчим хүчний найдвартай, үр ашигтай байдал дээшилсэн, гэмтэл доголдлыг богино хугацаанд илрүүлэх нөхцөл, үйл ажиллагааны мэдээллийг үнэн зөв авч шүүлт хийх зэрэг боломж сайжирсан.

Энэхүү бодит нөхцөлд тулгуурлан үзвэл уул уурхайн цахилгаан хангамжийн системд SCADA удирдлагын системийг нэвтрүүлэх нь техникийн болон эдийн засгийн хувьд үр ашигтай шийдэл болохыг судалгаагаар баталж байна. Цаашид уул уурхайн бүсэд шинээр холбогдох дэд станц болон хуваарилах байгууламжуудыг бүрэн хамруулсан нэгдсэн диспетчерийн хяналтын системийг хөгжүүлэх нь тус хэсгийн эрчим хүчний найдвартай ажиллагааг сайжруулах, эрчим хүчний хэрэглээний оновчтой захиалгыг үүсгэж эдийн засгийн хэмнэлт үзүүлэх болон тоноглолын насжилт уртсах үндэс болно гэж үзэж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] S.V. Podkovalnikov, Electricity Cooperation Between Russia and Mongolia: From Bilateral Collaboration to Participation in the Northeast Asia Power System Interconnection, Energy Systems Research, Vol. 5, No. 2, 2022,

[2] Gnana Swathika O.V., Aayush Karthikeyan, K. Karthikeyan, P. Sanjeevikumar, Sajju Karapparambil Thomas, Amin Babu, Critical review Of SCADA And PLC in smart buildings and energy sector, Energy Reports, Volume 12, 2024,

[3] João Mistrelo Leme, Kleber Rocha de Oliveira, José Francisco Resende da Silva, Roberta Spolon, Simone das Graças Domingues Prado, “Use of scada systems for efficient energy management in agroindustry,” Brasil, 2025,

[4] Challa Krishna Rao, Sarat Kumar Sahoo, Franco Fernando Yanine,иA review of IoT enabled intelligent smart energy management for photovoltaic power forecasting and generation, Unconventional Resources, Volume 9, 2026,

[5] Simon Elias Bibri, Jeffrey Huang, Generative AI of things for sustainable smart cities: Synergizing cognitive augmentation, resource efficiency, network traffic, cybersecurity, and anomaly detection for environmental performance, Sustainable Cities and Society, Volume 133, 2025,

[6] Weijie Zhou, Min Zhang, Tiantian Tang, Bhesh Bhandari, Chunli Li, Smart food comminution using deep learning and machine vision: Progress and prospects, Food and Bioproducts Processing, Volume 156, 2026,

[7] Mustafa J.M. Alhamdi, Jose Manuel Lopez-Guede, Jafar AlQaryouti, Javad Rahebi, Ekaitz Zulueta, Unai Fernandez-Gamiz, AI-based malware detection in IoT networks within smart cities: A survey, Computer Communications, Volume 233, 2025,

[8] Б.Бат-Дөлгөөн, ABB, MicroSCADA X SYS600 Operation Manual, Улаанбаатар хот, 2025,

[9] "Эрдэнэс Тавантолгой" ХК-ийн Цахилгаан хангамжийн хэсгийн тасралтын бүртгэл, 2013- 2026,

КОМПЬЮТЕРТ ТОМОГРАФИЙН ДҮРСИЙН ЧАНАРЫГ ФАНТОМ АШИГЛАСАН ХЯНАЛТЫН ҮР ДҮН

Оюунгэрэлийн БАГАБАНДИ,[1] Дабааажавын ПҮРЭВДАШ[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: munkhuu.bagaa1117@gmail.com[1] dashaa@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **КТ-ийн техникийн ажиллагаа болон дүрсийн чанарыг тогтмол үнэлэх нь оношилгооны мэдээллийн найдвартай байдлыг хангах чухал хүчин зүйл болдог. Судалгаанд эмнэлгийн байгууллагад ашиглагдаж буй КТ-д дүрсийн чанарын хяналтын туршилтыг гүйцэтгэж, усан фантом, тунгийн хэмжилтийн фантом ашиглан аппаратын рентген хоолойн хүчдэл, гүйдлийг стандарт утга (120 kVp, 200 мАс)-р тохируулан хэмжилт хийсэн. Туршилтаар усан фантом ашиглан хийсэн хэмжилтийн үр дүнд усны дундаж нягт 1.0 HU орчим гарсан бөгөөд хэмжилтийн хамгийн их хэлбэлзэл ±1.2 HU байсан нь усны стандарт утга болох 0 HU-тай ойролцоо байгааг харуулж байна. Мөн стандарт хазайлтаар тодорхойлогдох Дүрсийн шумын дундаж утга 4.9 HU гарсан нь дүрсийн санамсаргүй хэлбэлзэл бага байгааг илэрхийлж байна. Дүрсийн жигд байдлыг илэрхийлэх хэмжилтээр төв болон ирмэгийн хэмжилтийн ялгаа 1.6–1.7 HU байсан нь детекторын системийн жигд ажиллагааг харуулж байна. CTDI фантом ашиглан хийсэн тунгийн хэмжилтийн утгууд дээр үндэслэн тооцсон тунгийн индекс нь ойролцоогоор 30.8 mGy болсон. Мөн рентген хоолойн хүчдэл, гүйдлийг тодорхой утгуудаар тохируулах давтан хэмжилтийг хийж дүрсийн чанар тодорхойлох үзүүлэлтүүдийн өөрчлөлтийг судалсан. Эдгээр хэмжилтийн үр дүнг нэгтгэн авч үзэхэд КТ-ийн дүрсийн чанарыг тодорхойлох үндсэн параметрүүд нь харьцангуй тогтвортой бөгөөд системийн техникийн ажиллагаа хэвийн байгааг харуулж байна.**

Түлхүүр үг: Цацрагийн тун, оношилгооны нарийвчлал, төхөөрөмжийн техникийн шалгалт, чанарын баталгаажуулалт

I. УДИРТГАЛ

Орчин үеийн анагаах ухаанд Компьютер Томографи (КТ) нь дотоод эрхтэн, эд эрхтний бүтэц, эмгэг өөрчлөлтийг өндөр нарийвчлалтайгаар дүрслэх боломжтой дэвшилтэт оношилгооны технологи болж хөгжсөн. КТ-ийн технологийн хөгжлийн үр дүнд богино хугацаанд олон зүсэлт бүхий өндөр нарийвчлалтай дүрс үүсгэх боломж бүрдсэн бөгөөд энэ нь өвчний эрт илрүүлэлт, оношилгооны нарийвчлалд чухал нөлөө үзүүлдэг. Гэвч КТ-ийн дүрсийн чанар нь төхөөрөмжийн техникийн байдал, тохиргоо болон ашиглалтын горимоос хамаарч өөрчлөгдөх боломжтой байдаг [2].

Дүрсийн чанар буурах, эсвэл дүрсийн параметрүүдийн тогтвортой байдал алдагдах нь эмнэлзүйн оношилгоонд буруу дүгнэлт гаргах эрсдэлийг нэмэгдүүлэх боломжтой. Иймээс КТ-ийн ажиллагаанд тогтмол чанарын хяналт хийж, дүрсийн чанарын үндсэн параметрүүдийг үнэлэх нь чухал ач холбогдолтой юм. Олон улсын хэмжээнд дүрс оношилгооны тоног төхөөрөмжийн чанарын баталгаажуулалтыг хангах зорилгоор фантом ашиглан гүйцэтгэдэг стандарт туршилтын аргууд өргөн хэрэглэгддэг. Фантом нь хүний биеийн эд эрхтний физик шинж чанарыг дуурайлган хийсэн тусгай төхөөрөмж бөгөөд Компьютер Томографийн аппаратын дүрсийн чанар, цацрагийн тун, зүсэлтийн нарийвчлал зэрэг үзүүлэлтүүдийг хэмжихэд ашиглагддаг [1].

Сүүлийн жилүүдэд КТ-ийн аппаратын чанарын хяналтын талаар олон улсын хэмжээнд судалгааны ажлууд хийгдэж байгаа боловч эмнэлгийн бодит нөхцөлд ашиглагдаж буй аппаратад фантом ашиглан дүрсийн чанарын үзүүлэлтүүдийг системтэйгээр үнэлэх судалгаа харьцангуй хязгаарлагдмал байна. Иймээс КТ-ийн дүрсийн чанарын параметрүүдийг бодит хэмжилтээр тодорхойлох нь төхөөрөмжийн ажиллагааны тогтвортой байдлыг үнэлэх, чанарын хяналтын тогтолцоог сайжруулахад чухал ач холбогдолтой юм. Ялангуяа дүрсийн чанарт нөлөөлөх параметрүүдийг бодит хэмжилтээр тодорхойлох нь аппаратын ажиллагааг хянах, техникийн үзүүлэлтүүдийн тогтвортой байдлыг баталгаажуулахад ач холбогдолтой. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь КТ-ийн дүрсийн чанарын үндсэн үзүүлэлтүүдийг фантом ашиглан хэмжиж үнэлэх, хэмжилтийн үр дүнд үндэслэн төхөөрөмжийн ажиллагааны тогтвортой байдлыг тодорхойлох явдал юм [9].

Судалгааны үр дүн нь фантом ашиглан хийдэг чанарын хяналтын аргачлал нь КТ-ийн ажиллагааг бодит хэмжилтээр үнэлэх, дүрсийн чанарыг тогтвортой хадгалах, оношилгооны үр дүнгийн найдвартай байдлыг хангахад практик ач холбогдолтой болохыг харуулж байна. Ийм төрлийн хэмжилтэд суурилсан хяналтыг тогтмол хэрэгжүүлэх нь КТ-ийн ашиглалтын чанарыг сайжруулах, дүрс оношилгооны үйлчилгээний үр нөлөөг нэмэгдүүлэхэд чухал ач холбогдолтой юм [7][8].

II. КОМПЬЮТЕР ТОМОГРАФИЙН ТУХАЙ

КТ нь хүний биеийн доторх анатомийн бүтцийг рентген цацрагийн шингээлтийн ялгаанд үндэслэн давхаргат зүсэлтийн дүрс хэлбэрээр гарган харуулдаг оношилгооны дэвшилтэт технологи юм. КТ нь уламжлалт рентген зурагтай харьцуулахад анатомийн бүтцийг гурван хэмжээст орон зайд илүү өндөр нарийвчлалтай дүрсэлдгээрээ давуу талтай.

1972 онд Godfrey Hounsfield анхны КТ-ийг бүтээж, клиник хэрэглээнд нэвтрүүлснээр оношилгооны салбарт томоохон хувьсал авчирсан.

Анхны КТ нь зөвхөн тархины зураг авахад зориулагдсан, нэг зүсэлттэй, удаан хугацаанд скан хийдэг байсан бол технологийн хөгжлийн явцад олон үе шатуудыг дамжин хөгжсөн.

Орчин үеийн КТ нь нэг эргэлтээр 64–320 хүртэлх зүсэлт авах боломжтой бөгөөд оношилгооны хурд, дүрсийн чанар, цацрагийн тунгийн хяналтын хувьд өмнөх үеийн төхөөрөмжүүдээс эрс давуу буюу 0.25–0.5 секундийн эргэлтийн хурдтай, өндөр нарийвчлалтай гурван хэмжээст дүрс үүсгэх боломжтой болсон.

КТ нь рентген цацрагийн бодисоор шингээгдэх физик үзэгдэлд тулгуурладаг. Рентген цацраг нь хүний биеэр нэвтрэхдээ эд, эрхтний атомын дугаар, нягт, зузаан зэрэг хүчин зүйлээс хамааран ялгаатайгаар шингээгддэг [2][3][10]. Энэ хамаарлыг Beer–Lambert-ийн хуулиар илэрхийлнэ:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

I_0 – анхны цацрагийн эрчим,
I – нэвтэрч гарч ирсэн эрчим,
μ – шингээлтийн коэффициент,
x – эдийн зузаан.

Эдгээр олон өнцгөөс авсан шингээлтийн өгөгдлийг компьютероор математик аргаар дахин боловсруулах замаар зүсэлтийн дүрс сэргээгддэг.
КТ-ийн дүрсэнд эдүүдийн нягтыг Hounsfield Unit (HU) нэгжээр илэрхийлдэг.

HU масштаб нь дүрсийн контраст, ялгарал, нягтын үнэн зөв байдлыг тодорхойлогч үндсэн суурь болдог [1][2].

КТ нь өндөр нарийвчлалтай дүрс үүсгэдэг боловч тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын хугацаа, техник-технологийн нөхцөл, тохиргоо болон программ хангамжийн өөрчлөлтөөс шалтгаалан дүрсийн чанар өөрчлөгдөх боломжтой байдаг. Дүрсийн чанарын өөрчлөлт нь оношилгооны үр дүнд шууд нөлөөлж болзошгүй тул КТ-д тогтмол чанарын хяналт хийх шаардлагатай [9].
КТ-ийн аппаратын дүрсийн чанарын хяналтыг ерөнхийд нь дараах үндсэн аргуудаар гүйцэтгэдэг.

1. Техникийн үзүүлэлтэд суурилсан хяналтын арга
2. Клиник дүрсийн үнэлгээний арга
3. Цацрагийн тунгийн хэмжилтэд суурилсан арга
4. Фантом буюу хэмжлийн багаж ашигласан туршилтын арга

Эдгээр аргууд нь өөр өөр зорилготой бөгөөд ихэнх тохиолдолд хослон хэрэглэгддэг.

Фантом ашигласан туршилтын арга нь КТ-ийн дүрсийн чанарыг үнэлэх хамгийн өргөн хэрэглэгддэг, олон улсын стандартчилсан арга юм.
КТ-ийн дүрсийн чанарыг дараах үндсэн үзүүлэлтүүдээр үнэлдэг:

- Spatial resolution – жижиг бүтцийг ялгах чадвар
- Contrast resolution – нягт багатай эдийн ялгааг гаргах чадвар
- Noise (шум) – дүрсийн санамсаргүй хэлбэлзэл
- Uniformity – дүрсийн жигд байдал
- HU accuracy – нягт
- Slice thickness accuracy – зүсэлтийн зузааны бодит байдал

Эдгээр үзүүлэлтүүд нь оношилгооны үнэн зөв, дахин давтагдах чадвар, клиникийн найдвартай байдалтай шууд холбоотой.
КТ-ийн дүрсийн чанарт дараах техникийн параметрүүд шууд нөлөөлнө:

- Tube voltage (kVp) - цацрагийн нэвтрэх чадал
- Tube current (mA, мАс) - шумын түвшин
- Slice thickness - зүсэлтийн нарийвчлал
- Pitch - скан хурд ба тун
- Reconstruction kernel - дүрсийн шүүгч
- Gantry эргэлтийн хурд

Эдгээр параметрүүдийг буруу тохируулбал:

- Дүрсийн шум нэмэгдэнэ,
- Контраст буурна,
- Оношилгооны алдаа гарах,
- Өвчтөнд ирэх цацрагийн тун нэмэгдэх эрсдэлтэй. [6][7].

III. ФАНТОМ БУЮУ ХЭМЖИЛТИЙН БАГАЖНЫ ТУХАЙ

Сүүлийн жилүүдэд олон улсын судлаачид КТ-ийн дүрсийн чанарын үнэлгээг фантом ашиглан хийх судалгааг өргөн явуулж байна.
Фантомын төрөл болон практик ач холбогдол

КТ-ийн чанарын хяналтанд ашиглагддаг фантомуудыг бүтэц, зориулалт, хэрэглээнээс нь хамааруулан дараах төрөлд ангилдаг.

1) Uniformity фантом - цилиндр хэлбэртэй энгийн бүтэцтэй фантом бөгөөд ихэвчлэн ус эсвэл акрил материалаар хийгдсэн байдаг.
2) Усан фантом - ус агуулсан цилиндр хэлбэрийн фантом юм.
3) ACR CT фантом - Америкийн Радиологийн Коллежийн боловсруулсан стандарт фантом юм.
4) Catphan фантом - КТ-ийн иж бүрэн чанарын хяналт хийхэд зориулагдсан өндөр нарийвчлалтай фантом юм.
5) Anthropomorphic фантом нь хүний анатомийн бүтцийг дуурайлган хийсэн фантом юм.
6) Дозиметр фантом нь КТ-аас гарах цацрагийн тунг хэмжих зориулалттай фантом юм [3] [9].

Эдгээр фантомуудаас энэ удаагийн судалгаанд Усан фантом болон Дозиметр фантомуудыг ашиглаж хяналт, хэмжилт хийсэн.

Фантом ашиглан КТ-ийн чанарын хяналтыг хийх нь эмнэлгийн практикт дараах ач холбогдолтой.
1) Дүрсний чанарыг тогтвортой хадгалах - Фантомын хэмжилт нь аппаратын ажиллагаанд гарч болох өөрчлөлтийг эрт илрүүлэх боломж олгодог.
2) Оношилгооны нарийвчлалыг нэмэгдүүлэх - Дүрсний чанар сайн байх нь эмчийн оношилгооны шийдвэр гаргалтад чухал нөлөө үзүүлдэг.
3) Цацрагийн аюулгүй байдлыг хангах – Дозиметр фантомын хэмжилтээр дамжуулан өвчтөнд өгөх цацрагийн тунг хянах боломжтой.
4) Аппаратын ашиглалтын хугацааг уртасгах - Тогтмол чанарын хяналт хийснээр тоног

төхөөрөмжийн гэмтлийг эрт илрүүлж засвар үйлчилгээ хийх боломж бүрдэнэ.

5) Чанарын баталгаажуулалтын тогтолцоог бий болгох - Фантомын хэмжилт нь эмнэлгийн Quality Assurance (QA) системийн үндсэн хэсэг болдог [7].

Фантом ашигласан хяналтын аргын давуу тал

Фантом ашиглах арга нь КТ-ийн чанарын хяналтын хамгийн найдвартай арга гэж үзэгддэг.

a) Стандарт нөхцөл бүрдүүлдэг - Фантом нь тогтмол бүтэцтэй объект тул туршилтын нөхцөл ижил байдаг. Ингэснээр хэмжилтийг давтах, өөр өөр аппаратыг харьцуулах боломжтой

b) Дүрсийн чанарын параметрүүдийг нарийвчлалтай хэмждэг - Фантом ашигласнаар КТ-ийн оношилгооны чанарт шууд нөлөөлөх параметрүүд болох дүрсийн шум, дүрсийн жигд байдал, дүрсийн нягт зэрэг үзүүлэлтүүдийг тоон утгаар хэмжих боломжтой.

c) Өвчтөнд цацраг өгөхгүй - Фантом ашиглах үед хүн оролцохгүй

d) Аппаратын доголдлыг эрт илрүүлэх боломжтой - Хэрэв фантом туршилтын үр дүн стандарт хэмжээнээс хазайвал детекторын гэмтэл, тохиргооны алдагдал, рентген хоолойн асуудлыг илрүүлж аппаратын засвар үйлчилгээг цаг тухайд нь хийх боломжтой.

e) Олон улсын стандарттай нийцдэг - Фантом ашигласан туршилт нь дараах олон улсын

- ACR - Америкийн радиологийн коллежийн гаргасан стандарт
- AAPM - Америкийн анагаах ухааны физикчдийн холбооны гаргасан стандарт
- IAEA - Олон улсын атомын энергийн агентлагийн гаргасан стандартуудтай нийцдэг.

Иймээс Фантом ашигласан хэмжилт нь олон улсын хэмжээнд хүлээн зөвшөөрөгдсөн арга юм [6][7][8].

IV. СУДАЛГААНЫ ХЭСЭГ

Хэмжилт хийх ажиллагааны дараалал

Фантом ашиглан хэмжилт хийх ерөнхий дараалал дараах үндсэн үе шатуудаас бүрдэнэ.

1) Бэлтгэл шат - Эхний шатанд Компьютер Томографийн аппаратын техникийн бэлэн байдлыг шалгана. Үүнд:

- Аппаратын системийн warm-up ажиллагааг гүйцэтгэх
- Скан хийх протоколыг сонгох
- Хэмжилт хийх өрөөний орчны нөхцөл (температур, чийгшил)-ийг шалгах
- Фантомыг скан хийх ширээний төвд байрлуулах

Фантомыг гантрийн изоцентр дээр байрлуулах нь хэмжилтийн нарийвчлалд чухал нөлөөтэй.

2) Фантомыг байрлуулах - Лазер чиглүүлэгчээр төв тэнхлэгийг тааруулж тогтвортой байрлуулах. Фантомыг буруу байрлуулах нь дүрсийн жигд бус байдалд алдаа үүсгэх магадлалтай.

3) Скан хийх үед хэмжилтийн үр дүнд шууд нөлөөлөх параметрүүд болох kVp, мАс зэрэг утгуудыг өөрчилж хэмжилтийг олон давтамжтай хийсэн.

4) Дүрсийн шинжилгээ - Скан хийсний дараа дүрсийн шум, дүрсийн жигд байдал, дүрсийн нягт, цацрагийн алдагдал зэргийг хэмжиж тоон параметр дүрсийн чанарт хэрхэн нөлөөлөхийг судалсан. [6][11].

Судалгааны объект

Судалгааг Сонгинохайрхан Нэгдсэн эмнэлэгт суурилагдсан Siemens SOMATOM go.Up CT scanner аппаратад хийв.

QA шалгалтад Siemens үйлдвэрийн дараах Фантом-уудыг ашигласан.

1. Усан фантом - дүрсийн шум, дүрсийн нягт, дүрсийн жигд байдал хэмжих зориулалттай
2. Дозиметр фантом – Цацрагийн тун хэмжих зориулалттай

Эхний хэмжилтээр усан фантом ашиглан рентген хоолойн хүчдэл, гүйдлийн хэмжээг стандарт утга (120 kVp, 200 мАс)-р тохируулж 5 удаагийн хэмжилт хийж олон улсын стандарттай харьцуулсан.

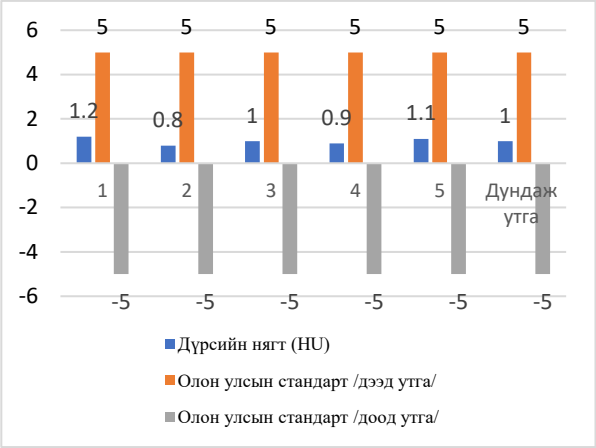
УСАН ФАНТОМ АШИГЛАСАН ХЭМЖИЛТИЙН ҮР ДҮН

1-Р ХҮСНЭГТ

Хэмжилт	Хэмжилтийн утга				Тооцоолсон утга
	Дүрсийн нягт (HU)	Дүрсийн шум (HU)	Төвийн хэмжилт (HU)	Захын хэмжилт (HU)	Дүрсийн жиг байдал (HU)
1	1.2	4.8	1.0	2.5	1.5
2	0.8	5.1	0.9	2.8	1.9
3	1.0	4.9	1.1	2.6	1.5
4	0.9	5.0	1.0	2.7	1.7
5	1.1	4.7	1.0	2.4	1.4
Дундаж	1.0	4.9	1.0	2.6	1.6

Дүрсийн нягт тодорхойлох шинжилгээ

Дүрсийн нягт нь тухайн материалыг илэрхийлэх Hounsfield Unit хэмжигдэхүүн юм. Усан фантомын стандарт утга нь 0 HU байдаг.



1-р зураг. Дүрсийн нягт тодорхойлох шинжилгээ

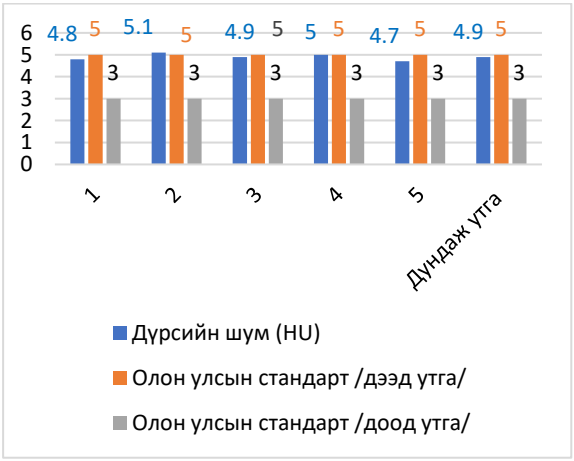
Графикийн дүнгээс харахад:

- Хэмжилтийн утгуудын дундаж 1 HU байна
- Хамгийн их хазайлт ±1.2 HU байна

Энэ нь олон улсын QA стандарт болох ±5 HU-ийн шаардлагад багтаж байна. Иймээс тухайн КТ-ийн Усны нягт тодорхойлох чанар хэвийн гэж үзэж болно.

Дүрсийн шум тодорхойлох шинжилгээ

Дүрсийн шум нь КТ-ийн дүрсийн санамсаргүй хэлбэлзлийг илэрхийлдэг.



2-р зураг. Дүрсийн шум тодорхойлох шинжилгээ

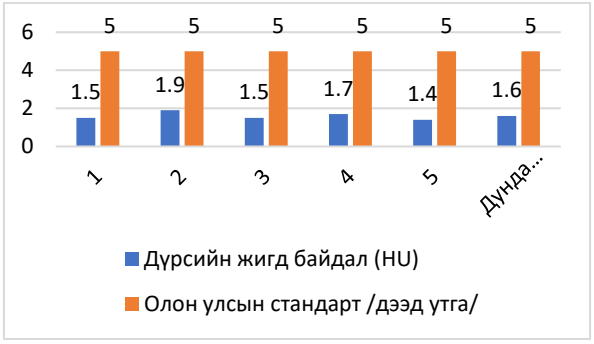
Графикийн үр дүнгээс:

- Шумын утга 4.7 – 5.1 HU байна
- дундаж шумын утга = 4.9 HU

Энэ үзүүлэлт нь Компьютер Томографийн аппаратын дүрсийн олон улсын стандарт болох Дүрсийн шум 3-5 HU хэвийн ажиллагааны хязгаарт багтаж байна.

Дүрсийн жигд байдал тодорхойлох шинжилгээ

Дүрсийн жигд байдлыг хэмжилтээр дүрсийн төв болон захад хэмжигдсэн хэмжилтийн ялгавраар илэрхийлэгддэг ба Дүрсийн жигд байдал (HU) = Захын хэмжилт (HU) – Төвийн хэмжилт (HU) тооцооллоор гаргадаг



3-р зураг. Дүрсийн жигд байдал тодорхойлох шинжилгээ

Графикийн үр дүнгээс:

- Төвийн хэмжилтийн дундаж утга = 1 HU
- Захын хэмжилтийн дундаж утга = 2.6 HU байна. Үүнийг дээрх томьёонд оруулж бодвол 2.6 – 1 = 1.6 HU байна.

Олон улсын QA стандартын дагуу дүрсийн жигд байдлын зөрүү 5 HU-аас бага байх ёстой. Иймээс судалгааны үр дүн нь стандарт шаардлагад нийцэж байна.

Хоёр дахь хэмжилтээр CTDI (Computed Tomography Dose Index – КТ-ийн тунгийн индекс) буюу КТ-аас үүсэх цацрагийн тунг фантом ашиглан рентген хоолойн хүчдэл, гүйдлийг стандарт утга (120 kVp, 200 мАс)-р тохируулж хэмжилтийн зориулалттай төвийн 1 нүх, захын 4 нүх нийт 5 нүхээр нэвтэрсэн цацрагийн тунг хэмжиж стандарт утгатай харьцуулсан.

ТУНГИЙН ИНДЕКС ТОДОРХОЙЛОХ ФАНТОМ АШИГЛАСАН ХЭМЖИЛТИЙН ҮР ДҮН

2-Р ХҮСНЭГТ

№	Хэмжилтийн байрлал	Хэмжилтийн утга (mGy)
1	Center	24.5
2	Periphery 1	33.8
3	Periphery 2	34.6
4	Periphery 3	33.1
5	Periphery 4	34.2

CTDI-г дараах томьёогоор олно

- CTDIperiphery Average = (Periphery 1) + (Periphery 2) + (Periphery 3) + (Periphery 4) + (Periphery 5) / 4
- CTDIw =(1/3 × CTDIcenter) + (2/3 × CTDIperiphery Average)

Хэмжилтийн утгыг дээрх томьёонд оруулж CTDI олбол

b) CTDIperiphery Average = (33.8 + 34.6 + 33.1 + 34.2) / 4 = 33.9 mGy

c) CTDI = (1/3 × 24.5) + (2/3 × 33.9) = 30.8 mGy

CTDI Фантом ашиглан хийсэн хэмжилтээр CTDI утга 30.8 mGy гарсан. Энэ нь Олон улсын байгууллагын зөвлөсөн 32 mGy хязгаарт багтаж байна. Иймээс судалгаанд ашигласан КТ-ын цацрагийн тун нь олон улсын стандартын шаардлагад нийцэж байна гэж дүгнэв.

Гурав дахь хэмжилтээр рентген хоолойн хүчдэлийг 80, 100, 120, 140 kVp, Гүйдлийн стандарт утга болох 200 мАсек-ээр тохируулан дүрсийн чанарт нөлөөлөх нөлөөллийг усан фантом болон тунгийн фантом ашиглан судалсан.

РЕНТГЕН ХООЛОЙН ХҮЧДЭЛИЙГ ӨӨРЧИЛЖ ГҮЙДЛИЙН СТАНДАРТ УТГАД ТОХИРУУЛСАН ХЭМЖИЛТИЙН ҮР ДҮН

3-Р ХҮСНЭГТ

kVp	Дүрсийн нягт (HU)	Дүрсийн шум (HU)	Дүрсийн жигд байдал (HU)	Цацрагийн тун (mGy)
80	-1.5	6.3	4.8	18
100	-0.8	5.1	3.9	23
120	0.2	4.3	3.2	30
140	0.6	3.8	2.7	37

Дөрөв дэхь хэмжилтээр рентген хоолойн хүчдэл 120 kVp-н стандарт утгад тохирлуулан гүйдлийг 100, 150, 200, 300 мАсек-ээр өөрчилж дүрсийн чанарт нөлөөлөх нөлөөллийг судалсан.

РЕНТГЕН ХООЛОЙН ГҮЙДЛИЙГ ӨӨРЧИЛЖ ХҮЧДЭЛИЙГ СТАНДАРТ УТГАД ТОХИРУУЛСАН ХЭМЖИЛТИЙН ҮР ДҮН

4-Р ХҮСНЭГТ

мАс	Дүрсийн нягт (HU)	Дүрсийн шум (HU)	Дүрсийн жигд байдал (HU)	Цацрагийн тун (mGy)
100	0.1	6.2	4.5	16
150	0.2	5.1	3.6	23
200	0.2	4.3	3.2	30
250	0.3	3.9	2.9	37

Тав дахь хэмжилтээр рентген хоолойн хүчдэл, гүйдлийн хэмжээг 120 kVp, 200 мАс стандарт утгад тохирлуулан зүсэлтийн зузааныг 1, 3, 5, 10 мм болгон өөрчилж хэмжилт хийж дүрсийн чанарт нөлөөлөх нөлөөллийг усан фантом болон тунгийн фантом ашиглан судалсан. Дээрх хэмжилтээс харахад хүчдэл, гүйдэл нэмэгдэхэд дүрсийн нягт нэмэгдэж дүрсийн шум болон дүрсийн жигд байдал багасах давуу талтай бол цацраг алдалтын тун ихсэж өвчтөнд очих тун болон орчинд тархаж байгаа цацрагийн тун 140 kVp, 200 мАс болон 120 kVp, 150 мАс-н утгын хэмжилтээр олон улсын стандартаас хэтэрч байна. Мөн дүрсийн шум нь дээрх параметрийн утаг хамгийн бага буюу 80 kVp, 120 мАс болон 120 kVp, 100 мАс-н утгаар хийсэн хэмжилтийн үед дүрсийн шум нэмэгдэх эрсдэл илэрсэн.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд КТ-ийн аппаратын дүрсийн чанарын үндсэн үзүүлэлтүүдийг фантом ашиглан үнэлж, тухайн төхөөрөмжийн ажиллагааны тогтвортой байдал болон дүрсийн чанарын параметрүүдийг бодит хэмжилтэд үндэслэн тодорхойллоо. Судалгааны явцад усан фантом, CTDI фантом зэрэг стандарт хэмжилтийн хэрэгслийг ашиглан КТ-ийн дүрсийн чанар, нягтралын үнэн зөв байдал, дүрсний жигд байдал, дуу чимээ болон цацрагийн тунгийн үзүүлэлтүүдийг үнэлсэн.

Хэмжилтийн үр дүнг олон улсын чанарын хяналтын стандартуудтай харьцуулахад тухайн КТ-ийн дүрсийн чанарын үзүүлэлтүүд нь техникийн шаардлагад нийцэж, оношилгоонд ашиглах боломжтойг харуулж байна. Мөн фантом ашиглан хийсэн хэмжилт нь аппаратын ажиллагааны параметрүүдийг бодит нөхцөлд үнэлэх, тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын явцад үүсч болзошгүй өөрчлөлтүүдийг эрт илрүүлэх боломжтойг тогтоолоо.

Судалгааны үр дүн нь КТ-ийн дүрсийн чанарын хяналтыг тогтмол хийх шаардлагатайг харуулж байгаа бөгөөд фантом ашигласан хэмжилтийн арга нь чанарын баталгаажуулалтын үр дүнтэй хэрэгсэл болохыг баталж байна. Ийм төрлийн хяналт нь оношилгооны дүрсийн найдвартай байдлыг хангах, эмнэлгийн тоног төхөөрөмжийн ашиглалтын аюулгүй байдал, үр ашигт ажиллагааг дээшлүүлэхэд чухал ач холбогдолтой юм. Түүнчлэн энэхүү судалгааны ажлын үр дүн нь эмнэлэгт ашиглагдаж буй КТ-ийн чанарын хяналтын тогтолцоог сайжруулах, дүрсийн чанарыг тогтвортой хадгалах, цацрагийн аюулгүй байдлыг хангах үйл ажиллагаанд практик ач холбогдолтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Kalender WA. Computed Tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications. 3rd ed. Erlangen: Publicis Publishing; 2011.

[2] Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt EM, Boone JM. The Essential Physics of Medical Imaging. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2012.

[3] Hsieh J. Computed Tomography: Principles, Design, Artifacts and Recent Advances. 2nd ed. SPIE Press; 2009.

[4] McCollough CH, Leng S, Yu L, Fletcher JG. Dual- and multi-energy CT: principles, technical approaches and clinical applications. Radiology. 2015.

[5] Kalender WA. X-ray computed tomography. Physics in Medicine and Biology. 2006.

[6] American Association of Physicists in Medicine (AAPM). Quality Control in Diagnostic Radiology. AAPM Report No. 74. College Park; 2002.

[7] International Atomic Energy Agency. Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic Radiology Physics**.** IAEA Human Health Series No. 19. Vienna; 2012.

[8] American College of Radiology. ACR CT Quality Control Manual. Reston, VA; 2017.

[9] Seeram E. Computed Tomography: Physical Principles, Clinical Applications and Quality Control. 4th ed. Philadelphia: Saunders; 2016.

[10] Buzug TM. Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. Springer; 2008.

[11] ICRP. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105. Annals of the ICRP; 2007.

[12] Goldman LW. Principles of CT and CT technology. Journal of Nuclear Medicine Technology. 2007

ЦДҮС ТӨХК-ИЙН ЗҮҮН-ӨМНӨД БҮСИЙН ЦАХИЛГААН ДАМЖУУЛАХ СҮЛЖЭЭНИЙ ТОГТСОН ГОРИМД СЭРГЭЭГДЭХ ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ХУВЬСАМТГАЙ ЭХ ҮҮСВЭРҮҮДИЙН ҮЗҮҮЛЭХ НӨЛӨӨЛЛИЙГ КВАЗИ-ДИНАМИК СИМУЛЯЦ ХИЙН ТОДОРХОЙЛОХ

Даваацэрэнгийн БАЯРЖАРГАЛ[1,4], Ичинхорлоогийн ЛУВСАНЦЭРЭН[2,3], Эрдэнэбатын ЭНХСАЙХАН[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны инженерийн тэнхим

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Шинэ, Сэргээгдэх эрчим хүчний тэнхим

[3]Монгол улс, Улаанбаатар, Эрчим хүчний яам, Бодлого төлөвлөлтийн газар

[4]Монгол улс, Улаанбаатар, Багануур ЦДҮС ТӨХК-ийн Зүүн-Өмнөд бүсийн салбар

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: enkhsaikhan@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Монгол Улсын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ нь эдийн засгийн өсөлт, уул уурхайн хөгжил, үйлдвэржилт, хүн амын өсөлттэй уялдан тогтвортой нэмэгдэх хандлагатай байна. Үүнтэй зэрэгцэн инвертерт суурилсан сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэрүүдийг системд нэвтрүүлж буй нь цахилгаан дамжуулах сүлжээний горим ажиллагаанд шинэ сорилтуудыг бий болгож, системийн найдвартай байдал болон хүчдэлийн горимыг нарийвчлан судлах шаардлагыг нэмэгдүүлж байна. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь Цахилгаан дамжуулах үндэсний сүлжээ ТӨХК-ийн Зүүн-Өмнөд бүсийн дамжуулах сүлжээний горим ажиллагаанд хэрэглээний ачаалал болон сэргээгдэх эрчим хүчний үйлдвэрлэлийн хувьсамтгай байдлын үзүүлэх нөлөөг үнэлэхэд оршино. Судалгаанд тухайн бүсийн шугам, дэд станц, трансформатор, хэрэглээ болон эх үүсвэрүүдийн бодит өгөгдөлд тулгуурлан симуляцын загварыг боловсруулж, A1805RAL төрлийн ухаалаг тоолуураар бүртгэсэн 8760 цагийн өндөр нарийвчлалтай ачааллын мэдээллийг ашиглан квазидинамик горимын тооцоог гүйцэтгэсэн. Мөн 55 МВт чадалтай салхин цахилгаан станцын үйлдвэрлэлийн хэлбэлзлийг харгалзан хоногийн 24 цагийн горим ажиллагааг загварчилсан. Үр дүнд нь сүлжээний зангилааны хүчдэлийн түвшин, чадлын алдагдал, ачааллын хуваарилалт, реактив чадлын урсгалд гарч буй өөрчлөлтийг тодорхойлж, зарим зангилаанд хүчдэлийн хэлбэлзэл үүсэх болон реактив чадлын зохицуулалт шаардлагатай нөхцөл үүсэх боломжтойг тогтоосон. Судалгаагаар системийн тогтвортой ажиллагааг хангах, хүчдэлийн түвшнийг зөвшөөрөгдөх хязгаарт барихад реактив чадлын зохицуулалт болон тоног төхөөрөмжийн оновчтой ашиглалт чухал үүрэгтэйг тодорхойлсон. Түүнчлэн энэхүү зохицуулалтыг сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн инвертер болон чадлын хувиргуурын системээр хэрэгжүүлэх боломжтойг харуулсан нь судалгааны шинэлэг тал болно. Судалгаанд DIgSILENT PowerFactory программ хангамжийг ашигласан бөгөөд үр дүн нь дамжуулах сүлжээний горим ажиллагааг үнэлэх, найдвартай байдлыг сайжруулах, цаашдын хөгжлийн төлөвлөлтөд онол, практикийн ач холбогдолтой юм.**

Түлхүүр үг: Сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэр, Квази-динамик симуляц ба 24 цагийн горим, цахилгаан эрчим хүчний систем, горим ажиллагааны судалгаа, цахилгаан дамжуулах сүлжээ, ачааллын горим, хүчдэлийн тохируулга, реактив чадлын зохицуулалт, инвертер болон чадлын хувиргуурын систем, DIgSILENT PowerFactory

I. Оршил

Сүүлийн жилүүдэд Монгол Улсын цахилгаан эрчим хүчний ачаалал, хэрэглээ эдийн засгийн өсөлт, хотжилт, уул уурхай, аж үйлдвэрийн хөгжлийн нөлөөгөөр эрчимтэй нэмэгдэж байна. Үүний нэг тод жишээ нь Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний өсөлт юм. Тухайлбал тус бүсийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ 2015 онтой харьцуулахад 48 хувь буюу ойролцоогоор 68 МВт-аар нэмэгдсэн бөгөөд айл өрх болон аж ахуйн нэгжийн тоо 80 – 100 мянгаар өссөн нь хэрэглээний өсөлтөд шууд нөлөөлсөн байна. Өнөөдрийн байдлаар Зүүн-Өмнөд бүсийн салбарын хэмжээнд 220 кВ-ын Чойр дэд станцын трансформаторын чадлыг нэмэгдүүлж, 4 дэд станцад томоохон өргөтгөл шинэчлэл хийж, 110 кВ-ын 2 дэд станц ашиглалтад орж суурилагдсан хүчин чадал 352.3 МВА-аар нэмэгдсэн байна. Сонгино – Мандалын 220 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугам баригдаж ашиглалтад орсноор тус бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээ 220 кВ-ын түвшинд тойрог хэлбэрийн схемд шилжсэн. Энэхүү тойрог схем нь сүлжээний найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлэх, ачааллыг оновчтой хуваарилах, мөн аваарын үед цахилгаан хангамжийг өөр чиглэлээр дамжуулах боломжийг бүрдүүлж, системийн горимын тогтвортой байдлыг дээшлүүлэхэд чухал нөлөө үзүүлсэн болно.

Цаашид Чойр дэд станцад 50 МВт чадалтай нарны цахилгаан станц (НЦС), 100 МВт чадалтай СЦС, Багануур дэд станцад 45 МВт усан цэнэгт цахилгаан станц (УЦЦС), Нүүрсийг хийжүүлэх технологийг ашигласан 300 МВт чадалтай цахилгаан станцууд баригдахаар техникийн нөхцөлүүд тус тус гарсан байгаа нь энэ бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний үйлдвэрлэл нэмэгдэх төлөвтэй байна. Ийм нөхцөлд сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэрүүдийн нэвтрэлт нэмэгдэх нь хүчдэлийн горим, реактив чадлын урсгал, системийн тогтвортой байдалд мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлдэг болохыг судалгаанууд харуулж байна[15][16].

Үүнтэй холбоотой цахилгаан дамжуулах шугам сүлжээний схемийн бүтэц богино хугацаанд эрчимтэй өөрчлөгдөж байгаа нөхцөлд тухайн системийн горим ажиллагаа, техникийн алдагдал болон системийн тогтвортой байдлыг хангах асуудал

онцгой ач холбогдолтой болж байна. Иймд шугам сүлжээний горим ажиллагааг судалж, ачааллын өөрчлөлтийн нөлөөллийг үнэлэх, системийн найдвартай ажиллагааг хангах нөхцөлийг тодорхойлох шаардлага үүсэж байна.

Дамжуулах сүлжээний хувьд хүчдэлийн горимыг хэвийн түвшинд тохируулах нь системийн тогтвортой ажиллагааг хангах үндсэн нөхцөлийн нэг бөгөөд хүчдэлийн тохируулга, реактив чадлын зохицуулалтыг оновчтой хэрэгжүүлснээр сүлжээний найдвартай ажиллагаа, техникийн алдагдлыг бууруулах боломж бүрддэг [16][18].

Монгол Улсад цахилгаан эрчим хүчний системийн горим ажиллагаа, хүчдэлийн тогтвортой байдал, давтамжийн чиглэлээр тодорхой судалгаанууд хийгдсэн байдаг**Error! Reference source not found.**. Тухайлбал, дулааны цахилгаан станцын цахилгаан хангамжийн системийн ачааллын хуваарилалт болон хүчдэлийн түвшний судалгааг PowerFactory программ ашиглан гүйцэтгэсэн судалгаанууд, мөн Монголын эрчим хүчний нэгдсэн системийн давтамжийн тогтворжилтыг динамик симуляцын аргаар үнэлсэн судалгаанууд хийгдсэн байна. Гэвч олон улсын түвшинд сэргээгдэх эрчим хүчний нөлөөллийг квази-динамик болон time-series симуляцын аргаар судалсан ажлууд өргөн хийгдсэн боловч **Error! Reference source not found.**[14][18], бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний горим ажиллагааг квази-динамик симуляцын аргаар хоногийн үйлдвэрлэл-хэрэглээний горимтой уялдуулан 24 цагийн горимыг судалсан ажил байхгүй байгаа нь энэхүү судалгааг хийх үндсэн суурь болсон болно.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТ

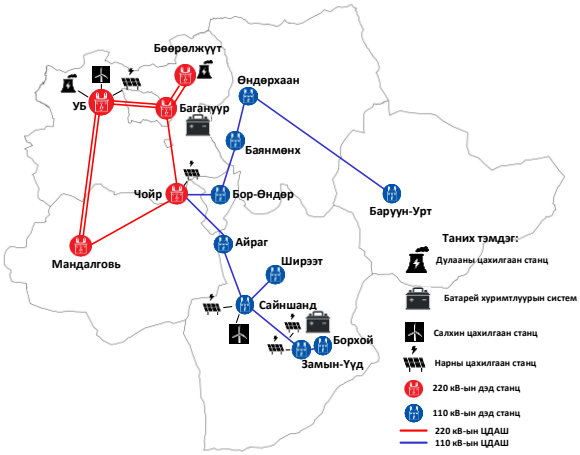
1. Судалгааны объектын тухай тойм

ЦДҮС ТӨХК-ийн Зүүн-Өмнөд бүсийн салбарын үйлчлэх хүрээг зураг 1-д үзүүлэв. Тус бүсийн трансформаторуудын нийлбэр хүчин чадал 762.9 МВА бөгөөд хотын төвийн 1 дүүрэг, 5-н аймгийн 60 суманд цахилгаан эрчим хүчийг дамжуулах үйл ажиллагаа явуулж, 220, 110 кВ-ын 1266.502 км цахилгаан дамжуулах агаарын шугам (ЦДАШ), 12 дэд станцын ашиглалт, засвар үйлчилгээ болон найдвартай ажиллагааг ханган ажилладаг [1]**Error! Reference source not found.**. Улсын хэмжээнд хүн ам өсөн нэмэгдэж, барилга байгууламж, үйлдвэрлэл нэмэгдэж байгаа нь цахилгаан эрчим хүчний эх үүсвэрийн дутагдал, найдвартай ажиллагаа, техникийн нөөц, техник технологийн болон боловсон хүчний эрэлт зэрэг олон хүчин зүйлд нөлөөлөл үзүүлж байна. [16] Зүүн Өмнөд Бүсийн Салбар (ЗӨБС)-ын 2010-2025 онуудын нийлбэр хэрэглээний харьцуулалтыг зураг 2-д харуулав. Зүүн-Өмнөд бүсийн салбарын ачааллын түвшнийг 2015 оныхтой харьцуулахад 90 МВт-аар нэмэгдсэн байна.

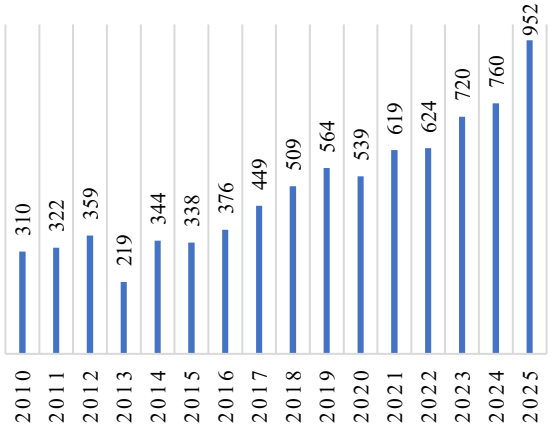
Энэхүү өсөн нэмэгдэж байгаа цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг хангахын тулд дэд станцуудын хүчин чадлын нэмэгдүүлэх, өргөтгөх, ЦДАШ-уудыг хүчитгэх, шинэ шугам барих, дамжуулагчийн хөндлөн огтлолыг нэмэх, нэвтрүүлэх чадварыг дээшлүүлэх зайлшгүй шаардлага гарч байна.

Тийм ч учраас тус салбарын хэмжээнд 220 кВ-ын Чойр дэд станцын трансформаторын чадлыг нэмэгдүүлж, 4 дэд станцад томоохон өргөтгөл шинэчлэл хийж, 110 кВ-ын 2 дэд станц ашиглалтад орж нийлбэр хүчин чадал 352.3 МВА-аар нэмэгдсэн байна [1].

Зүүн-Өмнөд бүсийн салбарт ХАРЬЯАЛАГДАХ цахилгаан дамжуулах сүлжээнд холбогдсон эх үүсвэрүүдийг хүснэгт 2, 3-т үзүүлэв. Тус бүсийн Чойр – Айраг – Сайншанд – Замын – Үүд чиглэлийн 110 кВ-ын сүлжээнд холбогдсон сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэрүүдийн суурилагдсан чадал 140 МВт байна. СЭХ-ний өндөр нэвтрэлт нь хүчдэлийн горим болон реактив чадлын урсгалд мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлдэг болохыг судалгаанууд харуулсан байдаг [15][18]**.** Мөн энэ сүлжээнд Эрдэнэ 20 МВт чалалтай 80 МВт.цаг багтаамжтай батарей хуримтлуурын систем (БХС) байх бөгөөд чадлын хувиргуур нь систем үүсгэх (Grid-Forming) технологитой байгаа нь горим тохируулгад оролцож олон давуу талуудыг тус сүлжээнд бий болгож байна [17]**ERROR! REFERENCE SOURCE NOT FOUND.**.



1-р Зураг. Зүүн-Өмнөд бүсийн салбарын цахилгаан дамжуулах сүлжээний үйлчлэх хүрээ



2-р Зураг. Салбарын сүүлийн 15 жилийн хугацаан дахь цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний график, сая кВт.цаг (2010-2025 он)

ЗҮҮН-ӨМНӨД БҮСИЙН ЧИГЛЭЛД АШИГЛАЛТАД ОРСОН СЭРГЭЭГДЭХ ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ХУВЬСАМТГАЙ ЭХ ҮҮСВЭРҮҮДИЙН ЖАГСААЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

ЦДҮС ТӨХК	**Эх үүсвэрүүдийн судалгаа**		
	СЭХ-ний эх үүсвэрийн нэр	***Суурилагдсан хүчин чадал МВт***	***Ашиглал тад орсон он***
ЗӨБС-ын эзэмшлийн бүсэд холбогдсон	Сайншанд СЦС	55	2018
	Гэгээн нар НЦС	15	2018
	Говь нар НЦС	30	2020
	Сүмбэр нар НЦС	10	2018
	Эрдэнэ нар НЦС	30	2023
Нийлбэр чадал, МВт		140	-

Мөн сүлжээний реактив чадлын тохируулгад оролцох статик вар генератор (СВГ) Шандын 18 МВар, Өндөрхааны 2х9 МВар-ын 2 тоноглол байх ба бусад дэд станцуудад шунтын реакторууд байгаа болно. Сүлжээний реактив чадлын зохицуулалтад статик вар генератор (СВГ) болон шунтын реакторууд оролцож, хүчдэлийн горимыг хэвийн түвшинд барихад чухал үүрэг гүйцэтгэж байна [18].

Тус бүсийн цахилгаан шугам сүлжээнүүдээс Чойр – Замын-Үүд чиглэлийн 110 кВ-ын сүлжээ анхаарал татаж байна. Учир энэ сүлжээ нь хамгийн олон сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэртэй бөгөөд сүлжээний хүчдэлийн горим тохируулгад Шандын СВГ, Эрдэнэ нар НЦС болон БХС ба Гэгээн НЦС-ууд оролцож, хүчдэлийн горимыг тохируулан, сүлжээний хүчдэлийн тогтворжилтыг ханган ажиллаж байна.

ЗҮҮН-ӨМНӨД БҮСИЙН ЧИГЛЭЛД АШИГЛАЛТАД ОРСОН СЭРГЭЭГДЭХ ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ЭХ ҮҮСВЭР БОЛОН БУСАД ҮҮСВЭРҮҮДИЙН ЖАГСААЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ

ЦДҮС ТӨХК	**Бусад эх үүсвэрүүдийн судалгаа**		
	Дулааны ЦС болон БХС-ийн нэр	***Суурилагдсан хүчин чадал МВт***	***Ашиглал-тад орсон он***
ЗӨБС-ын эзэмшлийн бүсэд холбогдсон	Бөөрөлжүүт ЦС	300	2024, 2025
	Багануур БХС	50 МВт/200 МВт.цаг	2024
	Эрдэнэ нар БХС	20 МВт/80 МВт.цаг	2024
Нийлбэр чадал, МВт		370	
Батарей хуримтлуурын системийн нийлбэр багтаамж		280 МВт.цаг	

2. Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан шугам сүлжээний өнөөгийн горим ажиллагааны түвшин

2025 оны 12-р сарын 17-ны өдрийн хяналт хэмжилт хийгдэх үеийн салбарын схемд дараах өөрчлөлтүүд орсон байна.

1. 2025.12.03-ны өдөр Бөөрөлжүүтийн цахилгаан станцын турбогенератор (ТГ)-2-ыг төвийн бүсийн нэгдсэн сүлжээ (ТБНС)-тэй синхрон залгасан.

2. Мөн 2025-2026 оны өвлийн их ачааллын горимд Дорнод бүсийн эрчим хүчний системээс ТБНС тусдаа горимд ажиллах.

Ээлжит нэгдсэн сүлжээний хяналт, хэмжилтийг 2025 оны 12-р сарын 17-ны өдрийн 05, 12, 19, 23 цагуудад хийсэн бөгөөд өвлийн их ачааллын хяналт, хэмжилтийн чадлын балансын нэгдсэн үр дүнг доорх хүснэгтэд харуулав. Үр дүнгээс үзвэл сүлжээний хамгийн их чадал дамжуулсан цаг өглөөний 05:00 цаг байна. Энэ үеийн алдагдал биетээр 15.3 МВт буюу 8.9 % хүрсэн байгаа нь нэг аймгийн хэрэглэгчийг хангах хэмжээний алдагдал байгаа нь маш өндөр үзүүлэлт юм. Иймээс сүлжээний алдагдлыг бууруулах арга хэмжээг хэрэгжүүлэх, үүний тулд судалгаа, шинжилгээ хийх шаардлагатай байгааг харуулж байна.

ЗҮҮН-ӨМНӨД БҮСИЙН ӨВЛИЙН ИХ АЧААЛЛЫН ҮЕИЙН БАЛАНС

3-Р ХҮСНЭГТ

Хэмжилт хийсэн цаг	**Дамжуул-сан чадал МВт**	**Нийлбэр ачаалал, МВт**	**Нийлбэр алдагдал, МВт**	**Алдагд-лын хувь, %**
5:00	172.3	157	15.3	8.9
12:00	100.9	94.7	6.3	6.2
19:00	116.4	108.1	8.3	7.2
23:00	103.5	97.1	6.4	6.2

III. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН АРГА ЗҮЙ

Энэхүү судалгаанд Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний горим ажиллагааг үнэлэх зорилгоор DIgSILENT PowerFactory программын квази-динамик симуляцын программт функцийг ашигласан бөгөөд энэ нь урт хугацааны үргэлжилсэн горим бодох боломжийг олгодог **Error! Reference source not found.**[14].

Судалгааны эхний шатад тухайн бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний бүтэц, дэд станцуудын техникийн үзүүлэлт, цахилгаан дамжуулах шугамын параметрүүд болон трансформаторын өгөгдлүүдийг цуглуулж системийн загварыг хөгжүүлсэн.

Цахилгаан дамжуулах агаарын шугам, трансформаторыг эквивалент параметрийн загвараар төлөөлүүлэн системийн математик загварыг байгуулсан. Мөн тус судалгааг хийхдээ харьцуулан дүгнэх аргыг ашигласан болно.

Системийн ачааллыг бодит ашиглалтын мэдээлэлд тулгуурлан тодорхойлж, хэрэглэгчдийн 24 цагийн ачааллын мэдээллийг ашиглан цаг хугацаанаас хамаарах өөрчлөлтийг тооцоонд тусгасан. Ийм төрлийн чадлын урсгалын өөрчлөлтийг цаг хугацааны функцээр симуляц хийх нь сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийн нөлөөллийг үнэлэхэд өргөн хэрэглэгддэг [18].

Цаашид хөгжүүлсэн системийн загварт горимын тооцоо (Load flow) хийж, цахилгаан дамжуулах шугам болон дэд станцуудын ачааллын түвшин, шинийн хүчдэлийн хэмжээг тодорхойлон загварын баталгаажуулалт буюу бодит цагийн горимд нийцүүлэн сайжруулалт хийсэн болно. Үүний дараа сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэрийн

нөлөөлөл, сүлжээний ачааллын өөрчлөлт ба горимын дүн шинжилгээг хийхийн тулд системийн горим ажиллагааны цаг хугацааны өөрчлөлтийг үнэлэх зорилгоор квази-динамик симуляцын аргыг ашиглан 24 цагийн хугацаанд ачааллын өөрчлөлттэй уялдуулан системийн хүчдэлийн горим, актив болон реактив чадлын урсгалын өөрчлөлтийг тооцоолсон.

Энэхүү судалгааны шинэлэг тал нь Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан шугам сүлжээний горим ажиллагааг бодит ашиглалтын мэдээлэлд тулгуурласан 24 цагийн ачааллын мэдээг ашиглан квази-динамик симуляцын модулийг ашиглан загварчилж, системийн хүчдэлийн горим болон чадлын урсгалын өөрчлөлтийг цаг хугацааны функцээр үнэлсэнд оршино. Ингэснээр цахилгаан дамжуулах сүлжээний хүчдэлийн хэлбэлзэл, реактив чадлын урсгалын онцлогийг тооцоолсноор, системийн горим ажиллагааг, тэр дундаа хүчдэлийн горимыг оновчтой удирдах, тохируулах боломжийг гаргаж ирсэн болно.

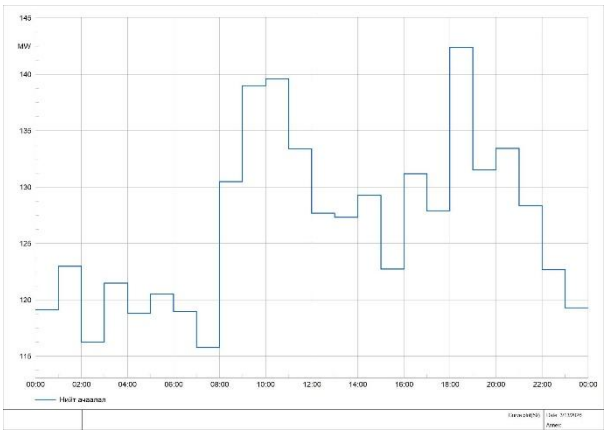
IV. Судалгааны ажлын үр дүн

1. Сүлжээний суурь горимын тооцооны үр дүн

Горимын анхны тооцооны үр дүнгээс харахад дэд станцуудын шинийн хүчдэл зөвшөөрөгдөх хэмжээнд буюу 0.95 – 1.05 х.н хүрээнд хэлбэлзэж байгаа нь систем хэвийн хүчдэлийн хазайлтын хэмжээнд байгааг харуулж байна. Энэхүү горимын тооцоо нь системийн анхны ажиллагааны төлөвийг тодорхойлох үндэс болж, цаашид цаг хугацааны өөрчлөлтийг үнэлэх квази-динамик симуляцын үр дүнг баталгаажуулсан загвар болно.

2. Хоногийн 24 цагийн ачааллын өөрчлөлтийн үр дүн

Цахилгаан шугам сүлжээний ачааллын цаг хугацааны өөрчлөлтийг тодорхойлох зорилгоор 24 цагийн ачааллын өөрчлөлтийг ашиглан квази-динамик симуляцын тооцоог гүйцэтгэсэн. Судалгаанд ашигласан ачааллын өгөгдөл нь Зүүн-Өмнөд бүсийн салбарын бодит ашиглалтын мэдээлэлд тулгуурласан бөгөөд системийн нийт ачааллын өөрчлөлтийг цагийн интервалаар тодорхойлох бодит цагийн хэмжилтийн үр дүн болно.



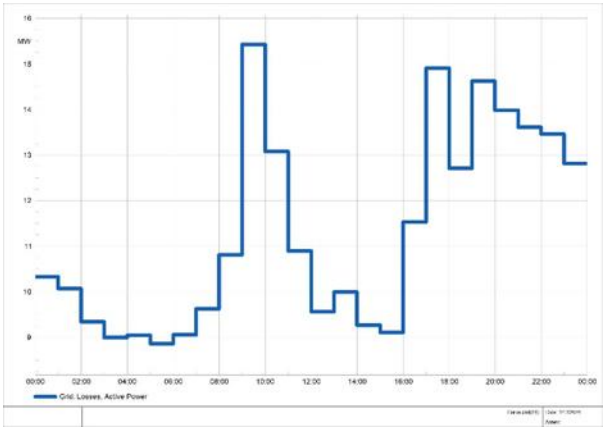
Зураг 3. Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан шугам сүлжээний хоногийн ачааллын график

Хоногийн ачааллын графикаас харахад Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан шугам сүлжээний хэрэглээ нь хоногийн туршид тодорхой хэлбэлзэлтэйгээр өөрчлөгдөж байна. Шөнийн цагт системийн ачаалал харьцангуй бага түвшинд буюу 116–120 МВт орчимд хэлбэлзэж байгаа бол өглөөний цагаас эхлэн хэрэглээ аажмаар нэмэгдэж, 09:00–11:00 цагийн хооронд ачааллын хэмжээ мэдэгдэхүйц өссөн байна. Мөн оройн хэрэглээний оргил үед буюу 18:00–19:00 цагийн хооронд ачаалал хамгийн их утгад хүрч байна. Үүний дараа оройн цагаас эхлэн ачаалал буурч, систем шөнийн горимд шилжиж байгаа нь графикаас тодорхой харагдаж байна.

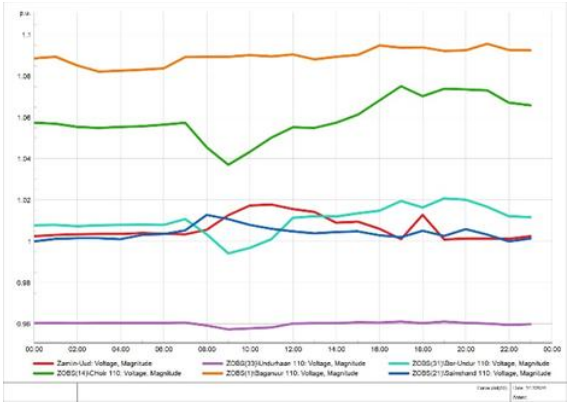
Ийм төрлийн хоногийн ачааллын хэлбэлзэл нь цахилгаан шугам сүлжээний хүчдэлийн горим, реактив чадлын баланс, тоног төхөөрөмжийн ачааллын түвшинд нөлөөлөх боломжтой тул квази-динамик симуляцын аргаар цаг хугацааны дагуу горим ажиллагааг нарийвчлан үнэлэх шаардлагатай юм.

Хоногийн ачааллын график болон цахилгаан шугам сүлжээний чадлын алдагдлын графикуудыг харьцуулан үзэхэд системийн ачааллын өсөлт нь сүлжээний алдагдлын хэмжээнд шууд нөлөөлж байгаа нь харагдаж байна. Шөнийн цагуудад системийн ачаалал харьцангуй бага түвшинд байгаа тул шугам сүлжээний чадлын алдагдал 9 – 10 МВт орчимд байна.

Харин өглөө болон оройн ачааллын оргил үеүдэд хэрэглээ нэмэгдэхийн хэрээр дамжуулах шугамын гүйдэл өсөж, үүний үр дүнд сүлжээний алдагдал 14 – 15 МВт хүртэл нэмэгдэж байгаа нь графикуудаас харагдаж байна.



Зураг 4. Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан шугам сүлжээний чадлын алдагдлын график



Зураг 5. Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан шугам сүлжээний хүчдэлийн өөрчлөлтийн график

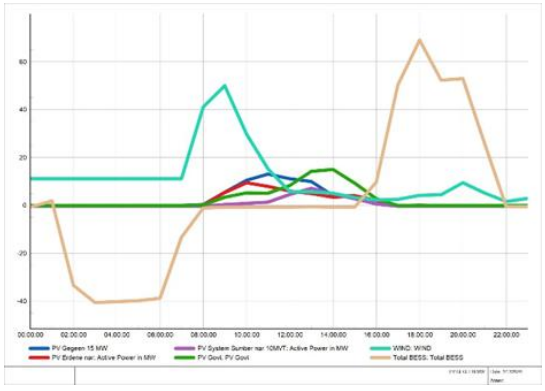
Зүүн-Өмнөд бүсийн 110 кВ Багануур, Чойр, Сайншанд, Замын-Үүд, Бор-Өндөр, Өндөрхаан дэд станцуудын хүчдэлийн түвшин хоногийн туршид тодорхой хэмжээнд хэлбэлзэж байгаа нь ажиглагдаж байна. Судалгаанд хамрагдсан шинийн хүчдэлийн түвшин 0.96–1.10 х.н. хооронд хэлбэлзэж байгаа нь системийн ачааллын өөрчлөлт болон реактив чадлын балансаас хамаарч байна.

Багануур болон Чойр дэд станцуудын хүчдэл хоногийн туршид 1.08–1.10 х.н түвшинд хадгалагдаж байгаа нь тухайн шинд системийн үндсэн эх үүсвэр болон дамжуулах сүлжээний гол зангилаанд ойр байрласантай холбоотой гэж үзэж болно.

Харин Өндөрхаан дэд станцын хүчдэл зарим цагуудад 0.96–0.98 х.н. хүртэл буурч байгаа нь урт цахилгаан дамжуулах шугамаар холбогдсонтой холбоотойг харуулж байна.

Мөн хоногийн ачааллын өсөлтийн үед Сайншанд, Замын-Үүд дэд станцуудын шинийн хүчдэлийн хэлбэлзэл илүү тодорхой ажиглагдаж байгаа нь цахилгаан шугам сүлжээний реактив чадлын баланс болон дамжуулах шугамын ачааллын өөрчлөлттэй шууд холбоотой юм.

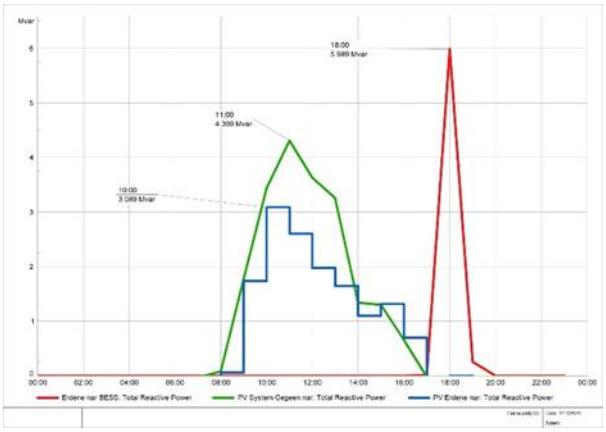
Энэ нь цахилгаан дамжуулах шугамын чадлын алдагдал нь гүйдлийн квадратаас хамаардаг (I^2R) хуулийн зүй тогтлоор тайлбарлагдах бөгөөд системийн ачааллын өсөлт нь сүлжээний алдагдлыг нэмэгдүүлэх үндсэн хүчин зүйл болж байна.



Зураг 6. Сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэр болон БХС-ийн хоногийн 24 цагийн ачааллын өөрчлөлт

Судалгааны үр дүнгээс харахад нарны цахилгаан станцын үйлдвэрлэл өдрийн цагт огцом өсөж, оройн цагт буурч байгаа нь системийн чадлын балансад тодорхой хэлбэлзэл үүсгэж байна. Энэ үед батарей хуримтлуурын систем нь өдрийн илүүдэл үйлдвэрлэлийг хуримтлуулж, оройн оргил ачааллын үед системд буцаан нийлүүлэх замаар чадлын балансыг хангахад чухал үүрэг гүйцэтгэж байна.

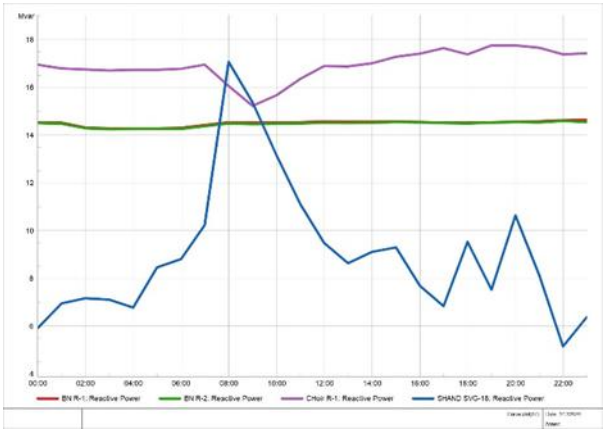
Энэхүү графикт НЦС болон БХС-ээс сүлжээнд өгч буй реактив чадлын хоногийн өөрчлөлтийг харуулав.



Зураг 7. Нарны цахилгаан үүсгүүр болон батарей хуримтлуурын системийн реактив чадлын хоногийн өөрчлөлт

Нарны цахилгаан станцын реактив чадлын үйлдвэрлэл нь нарны цацрагийн хэмжээнээс хамааран өглөөний 08:00 цагаас эхлэн нэмэгдэж, 11:00 цагийн орчимд 4.309 MВар хүрч дээд утгаа авч байна. Үүнээс хойш нарны цацраг буурсантай холбоотойгоор реактив чадлын хэмжээ аажмаар буурч байгааг харж байна.

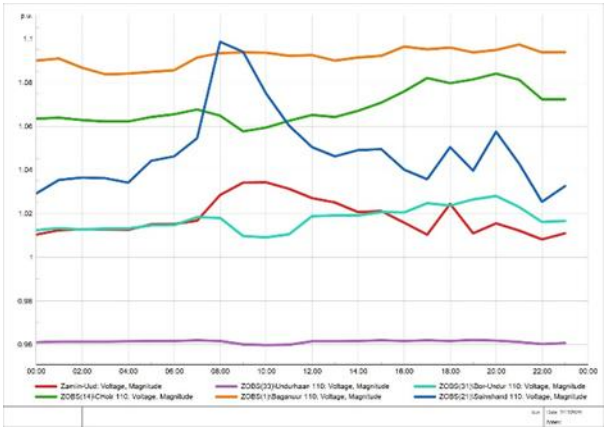
Харин БХС нь оройн ачаалал ихсэх үед сүлжээнд реактив чадлын дэмжлэг үзүүлж, 18:00 цагийн орчимд 5.989 MВар хүртэл өсөөд, системийн хүчдэлийн горимыг тогтворжуулах, хэвийн утгад байх бололцоог олгон ажиллаж байна.



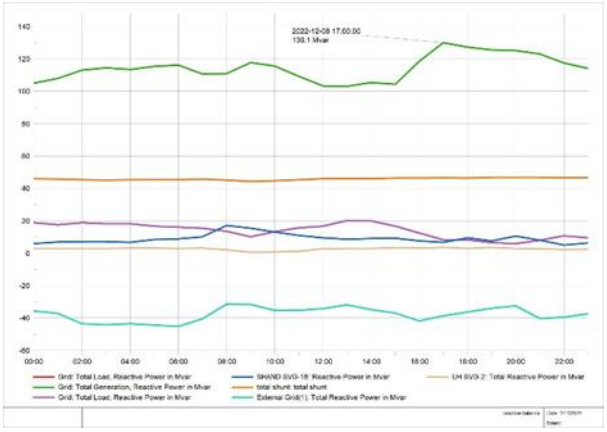
Зураг 8. Багануур, Чойр дэд станцуудын реактор, Шанд салхин станцын статик вар генератор (СВГ)-ын төхөөрөмжийн реактив чадлын хоногийн ачааллын өөрчлөлт

Багануур дэд станцын реактор-1, реактор-2-ын реактив чадлын хэмжээ хоногийн туршид харьцангуй тогтвортой байж, ойролцоогоор 14.3 – 14.7 МВар орчимд хэлбэлзэж байна. Харин Чойр дэд станцын реактор-1-ын реактив чадал 15 – 18 МВар хооронд хэлбэлзэж байгаа нь тухайн зангилааны ачааллын горим болон сүлжээний реактив чадлын урсгалтай холбоотой.

55 МВт-ын Шанд салхин цахилгаан станцын статик вар генераторын реактив чадлын гаралт нь системийн горимын өөрчлөлтөд уян хатан хариу үзүүлж байгаа бөгөөд өглөөний ачааллын өсөлтийн үед реактив чадлын нийлүүлэлт ойролцоогоор 17 МВар болж нэмэгдэж, харин бусад цагуудад 5 – 11 МВар орчимд ажиллаж байгаа нь тухайн бүсийн хүчдэлийн горимыг тогтворжуулахад статик вар генераторын төхөөрөмж чухал үүрэгтэйг харуулж байна.



Зураг 9. Шанд салхин станцын статик вар генераторын төхөөрөмж ажиллагаанаас гарсан үеийн дэд станцуудын шинийн хүчдэлийн өөрчлөлт



Зураг 10. Шанд салхин станцын статик вар генераторын төхөөрөмж ажиллагаанаас гарсан үеийн реактив чадлын өөрчлөлт

Нийлбэр реактив чадлын үйлдвэрлэл нь хоногийн туршид ойролцоогоор 103 – 130 МВар-ын хооронд хэлбэлзэж байна. Өдрийн оргил ачааллын цаг болох 16:00 – 18:00 цагийн хооронд реактив чадал 130 МВар орчим байна. Энэ нь системийн ачаалал нэмэгдэж, хүчдэлийн горимыг тохируулж ажилласантай холбоотой юм.

Сүлжээний реактив чадлын нийлбэр хэрэглээ нь ойролцоогоор 100 – 115 МВар-ын хооронд хэлбэлзэж байна.

Графикаас дараах төхөөрөмжүүд реактив чадлын балансад оролцож байгааг харж болно.

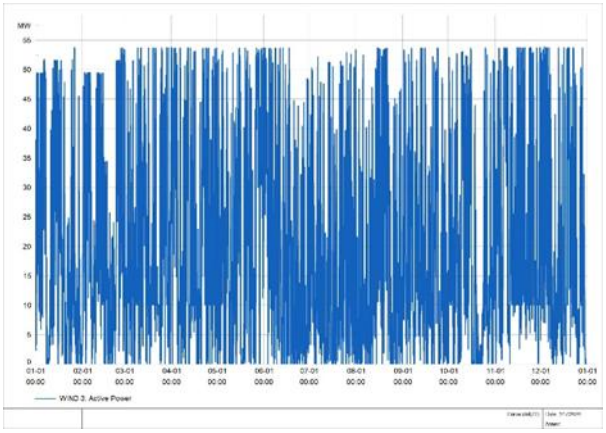
Шанд СВГ ойролцоогоор 5 – 16 МВар реактив чадал нийлүүлж байна. Харин Өндөрхаан ДС-ын СВГ-1, СВГ-2 2 – 4 МВар-ын реактив чадлын зохицуулалт хийж байна. Шунтын реакторууд нь тогтмол 45 МВар-ын реактив чадлыг шингээж байна.

Хоногийн туршид реактив чадлын баланс нь үйлдвэрлэл, хэрэглээ болон статик вар генераторын төхөөрөмжийн ажиллагааны горимоор тохируулагдаж байгаа бөгөөд статик вар генераторын төхөөрөмж болон шунтын реакторууд нь хүчдэлийн горимыг тогтвортой, хэвийн зөвшөөрөгдөх хэмжээнд байлгахад чухал нөлөө үзүүлж байна.

V. ШАНД СЦС-ЫН ҮЙЛДВЭРЛЭЛ СҮЛЖЭЭНИЙ ГОРИМД ҮЗҮҮЛЭХ НӨЛӨӨЛӨЛ БА РЕАКТИВ ЧАДЛЫН ТОХИРУУЛГАД ОРОЛЦОХ БОЛОМЖ

Сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэрүүд (НЦС, СЦС, БХС)-ийн актив чадлын үйлдвэрлэлийн нөлөөлөл болон сүлжээний хүчдэлийн зохицуулалтад реактив чадлаар оролцох боломжтой байдаг. Энэхүү дэд бүлгийн хүрээнд тухайн эх үүсвэрүүдийн реактив чадлын тохируулгын горимуудыг квази-динамик симуляц ашиглан судалж, сүлжээний хүчдэлийн горимд үзүүлэх нөлөөллийг харьцуулан тодорхойлно.

Шандын салхин цахилгаан станцын жилийн бодит үйлдвэрлэлийн горимыг 8760 цагийн өгөгдлөөр квази-динамик симуляцад оруулж, 110/35/10 кВ-ын Сайншанд дэд станцын 110 кВ-ын шинийн хүчдэлийн түвшний өөрчлөлтийг судлав.

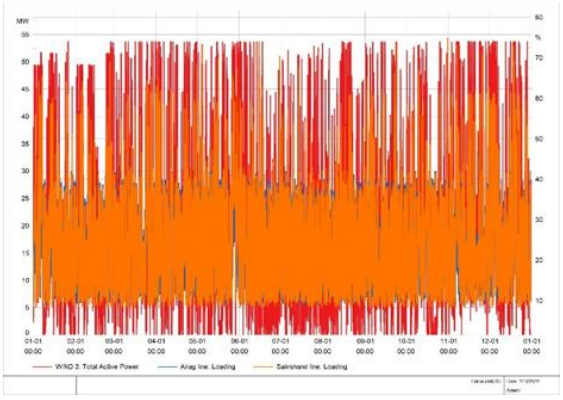


Зураг 11. Шанд салхин станцын актив чадлын жилийн бодит өөрчлөлт (P–t)

Салхин станцын актив чадлын үйлдвэрлэл нь жилийн турш өндөр хэлбэлзэлтэй бөгөөд 0–53 МВт-ийн хооронд өөрчлөгдөж байна. Энэ нь тухайн эх үүсвэр нь системийн горимд тогтворгүй нөлөө

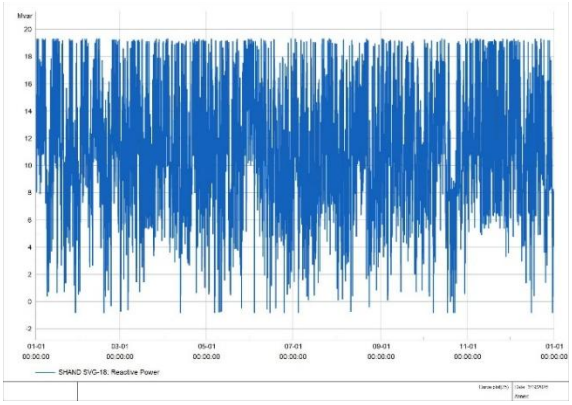
үзүүлж, хүчдэлийн зохицуулалт болон реактив чадлын удирдлагыг зайлшгүй шаардлагатай болгодгийг харуулж байна.

Салхин станцын үйлдвэрлэл жилийн туршид ихээхэн хэлбэлзэлтэй байгаа нь сэргээгдэх эх үүсвэрийн хувьсамтгай шинжийг тодорхой харуулж байна. Үйлдвэрлэлийн өсөлттэй үед Сайншанд чиглэлийн шугамын ачаалал нэмэгдэж 70-80% хүртэл ачаалагдаж байна.



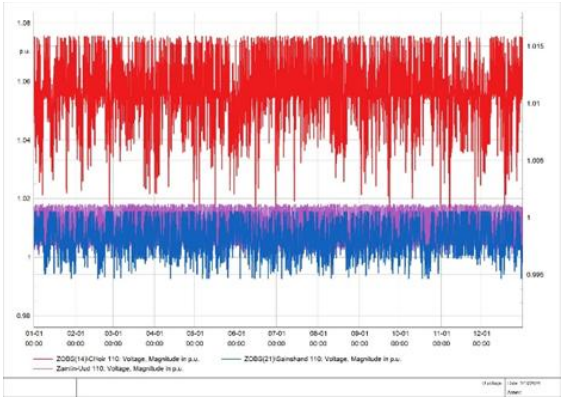
Зураг 11. Салхин станцын идэвхт чадал ба шугамын ачааллын жилийн өөрчлөлт

Салхин цахилгаан станцын үйлдвэрлэл 0–55 МВт хооронд хэлбэлзэж, дундаж утга нь ойролцоогоор 25 МВт (≈45% ашиглалт) байна. Үүний нөлөөгөөр Сайншанд чиглэлийн дамжуулах шугамын ачаалал 25–75% хооронд өөрчлөгдөж, дундаж нь 50% орчим байна. Харин Айраг чиглэлийн шугамын ачаалал 30-40% орчим тогтвортой байна.



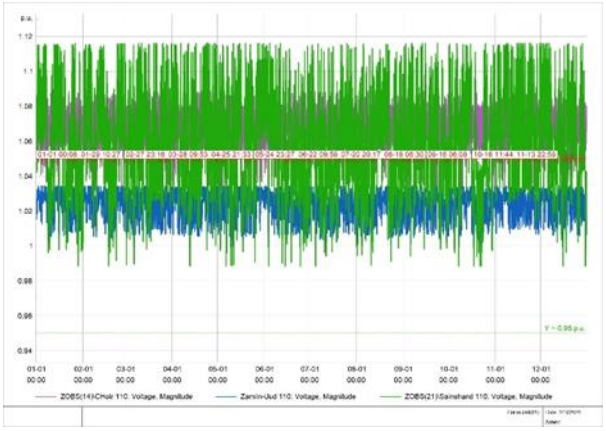
Зураг 12. Шандын 18 МВар-ын СВГ-ийн реактив чадлын хугацааны өөрчлөлт

Жилийн квази-динамик симуляцийн үр дүнгээс харахад Шандын 18 МВар-ын СВГ нь ихэнх хугацаанд реактив чадлын дээд хязгаарт ойр ажиллаж байгаа нь тухайн бүсийн сүлжээний реактив чадлыг шингээлт өндөр байгааг илтгэж байна. Мөн реактив чадлын огцом хэлбэлзэл нь сүлжээний хүчдэлийн тогтворжилт сул, тасралтгүй зохицуулалт шаардлагатай байгааг харуулж байна.



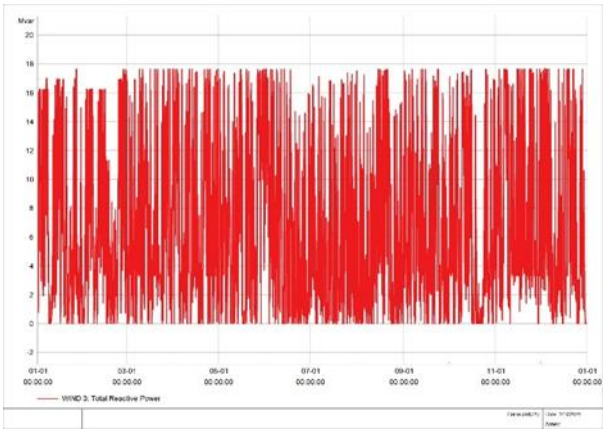
Зураг 13. Чойр, сайншанд, замын-үүд дэд станцуудын 110 кВ шинийн хүчдэлийн хугацааны өөрчлөлт

110 кВ-ын сүлжээнд хүчдэлийн хэлбэлзэл 0.94–1.08 х.н хүрээнд өөрчлөгдөж байгаа бөгөөд энэ нь сүлжээний реактив чадлын зохицуулалт хангалтгүй, мөн сэргээгдэх эх үүсвэрүүдийн хувьсамтгай үйлдвэрлэлээс хамааралтай байна.



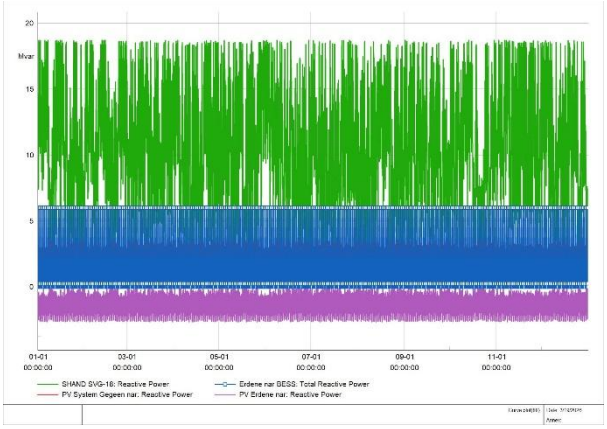
Зураг 14. Шандын 18 МВар-ын СВГ-г таслах үеийн Чойр, сайншанд, замын-үүд дэд станцуудын 110 кВ шинийн хүчдэлийн хугацааны өөрчлөлт

Сайншанд дэд станцын 110 кВ хүчдэл 0.99–1.12 х.н хооронд хэлбэлзэж, зарим үед зөвшөөрөгдөх дээд хязгаараас хэтэрч байна.



Зураг 15. Шандын 18 МВар-ын СВГ-г тасласан нөхцөлд СЦС-ын реактив чадлын тохируулгад оролцсон үеийн ачааллын өөрчлөлт

Салхин станцын реактив чадлын оролцоо нь хэмжээний хувьд СВГ төхөөрөмжийн компенсацийн түвшинтэй дөхөж байгаа нь сэргээгдэх эх үүсвэр өөрөө хүчдэлийн зохицуулалтад идэвхтэй оролцох боломжтойг харуулж байна.



Зураг 16. сэх-ний хувьсамтгай эх үүсвэрүүдийн реактив чадлын оролцооны хугацааны өөрчлөлт

Системийн реактив чадлын зохицуулалтад СВГ төхөөрөмжүүд гол үүрэг гүйцэтгэж, өргөн хүрээнд (5–18 МВар) динамик өөрчлөлт үзүүлж байна. Харин БХС болон нарны цахилгаан станцуудын реактив чадлын оролцоо харьцангуй бага, хязгаарлагдмал хэлбэлзэлтэй байна. Мөн зарим нарны эх үүсвэрүүд реактив чадал ($Q<0$) шингээж ажиллаж байгаа нь сүлжээний хүчдэлийн өсөлтийг бууруулах зохицуулалт хийгдэж байна.

Сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүд олноор холбогдсон нөхцөлд түүний нөлөөллийг квази-динамик симуляцын үр дүнгээр бүтэн жилийн өгөгдлийг ашиглан гүйцэтгэсэн. Үр дүнгээс харахад СВГ нь 10–18 МВар-ын хүрээнд реактив чадлын үндсэн зохицуулалтыг гүйцэтгэж байгаа бол Эрдэнэ нар БХС нь дунд зэргийн оролцоотой, НЦС-ууд харьцангуй бага хэмжээний реактив чадлын тохируулгад оролцоотой байна. Энэ нь инвертерт суурилсан эх үүсвэрүүдийн реактив чадлын боломж хязгаарлагдмал бөгөөд хүчдэлийн зохицуулалтад СВГ, СТАТКОМ болон синхрон компенсаторууд зэрэг нэмэлт төхөөрөмжүүдийн үүрэг чухал байгааг харуулж байна.

VI. Дүгнэлт

Энэхүү судалгаагаар ЦДҮС ТӨХК-ийн Зүүн-Өмнөд бүсийн салбарын цахилгаан шугам сүлжээний тогтсон горимыг DIgSILENT PowerFactory программын орчинд загварчилж, квази-динамик симуляцын аргаар 24 цаг болон жилийн үйлдвэрлэлийн өгөгдлүүдэд тооцоолов. Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд тус бүсийн сүлжээ нь ерөнхийдөө зөвшөөрөгдөх хүчдэлийн хязгаарт ажиллаж байгаа боловч ачаалын өсөлт, шугамын урт, СЭХ-ний хувьсамтгай эх үүсвэрүүдийн үйлдвэрлэлийн хэлбэлзэл, сүлжээний реактив чадлын урсгалын өөрчлөлтөөс шалтгаалан зарим зангилаанд хүчдэлийн хэлбэлзэл илүү мэдрэг байгаа нь харагдаж байна.

Мөн хоногийн ачааллын муруйн өөрчлөлт нь чадлын алдагдал, дамжуулах шугамын ачаалал, хүчдэлийн түвшин болон реактив чадлын баланст шууд нөлөөлж байгааг квази-динамик тооцоогоор тодорхойлов. Ялангуяа өглөөний болон оройн оргил ачааллын үед сүлжээний алдагдал өсөж, хүчдэлийн горимыг хэвийн түвшинд хадгалахад реактив чадлын зохицуулалтын үүрэг нэмэгдэж байгаа нь харагдаж байна. Нарны цахилгаан станц, батарейн хуримтлуурын систем, статик вар генераторын төхөөрөмж, шунтын реактор зэрэг төхөөрөмжүүд нь хүчдэлийн горим болон реактив чадлын балансыг тогтвортой барихад чухал нөлөөтэй байна.

Мөн сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн үйлдвэрлэлийн хэлбэлзэл болон БХС-ийн горим ажиллагаа нь системийн чадлын баланс барих, хүчдэлийн горимыг тогтворжуулахад эерэг нөлөө үзүүлж байгаа нь харагдаж байна.

Энэхүү судалгаа нь Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан шугам сүлжээний хоногийн горим ажиллагааг бодит өгөгдөлд тулгуурлан үнэлснээрээ онолын болон практикийн ач холбогдолтой бөгөөд цаашид сүлжээний хөгжлийн төлөвлөлт, реактив чадлын зохицуулалтын шийдэл боловсруулах, шинэ эх үүсвэрүүдийг системд холбох техникийн үндэслэлийг боловсруулахад ашиглах боломжтой юм.

Квази-динамик симуляцын үр дүнд сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэрүүд нь зөвхөн актив чадал үйлдвэрлэхээс гадна сүлжээний хүчдэлийн зохицуулалтад тодорхой хэмжээгээр реактив чадлаар оролцох боломжтой нь тогтоогдсон. Гэсэн хэдий ч эдгээр эх үүсвэрүүдийн үйлдвэрлэл нь цаг хугацааны хувьд ихээхэн хэлбэлзэлтэй (0–53 МВт) тул сүлжээний горимд тогтворгүй нөлөө үзүүлж, реактив чадлын тасралтгүй зохицуулалт шаардлагатайг харуулж байна.

Судалгаанаас харахад Сайншандын бүсэд реактив чадлын илүүдэл болон хүчдэлийн өсөлт ажиглагдаж байгаа бөгөөд энэ нь сул сүлжээ, урт дамжуулах шугам, мөн СЭХ-ний эх үүсвэрийн тархалттай холбоотой байна. Шандын 18 МВар-ын СВГ төхөөрөмж нь ихэнх хугацаанд дээд хязгаарт ойр ажиллаж байгаа нь тухайн бүсийн реактив чадлын үндсэн зохицуулалтыг дангаараа гүйцэтгэж байгааг илтгэж байна.

СВГ төхөөрөмжийг тасалсан нөхцөлд сүлжээний хүчдэлийн хэлбэлзэл эрс нэмэгдэж, хүчдэлийн хэт өсөлт үүсэж байгаа нь реактив чадлын зохицуулалт хангалтгүй байгааг тодорхой харуулж байна. Энэ үед СЦС өөрийн чадлын хувиргуурын боломжит хүрээнд реактив чадлаар оролцож байгаа боловч энэ нь системийн шаардлагыг бүрэн хангах хэмжээнд хүрэхгүй байна. Тус бүсийн СЭХ-ний эх үүсвэрүүдийн реактив чадлын оролцоог харьцуулбал:

- СВГ – үндсэн зохицуулагч (10–18 МВар, их нөлөөтэй),
- БХС – дунд зэргийн оролцоотой,
- НЦС – харьцангуй бага оролцоотой байна.

Иймээс инвертерт суурилсан сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг хүчдэлийн зохицуулалтад ашиглах боломжтой боловч тэдгээрийн реактив чадлын хүрээ хязгаарлагдмал тул дангаар нь системийн тогтвортой байдлыг хангах боломжгүй байна.

Сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг реактив чадлын зохицуулалтад үр ашигтай оролцуулахын тулд тэдгээрийг СВГ төхөөрөмжтэй уялдуулсан олон түвшний удирдлагын стратегид хамруулж, хүчдэлээс хамааралтай Q(U) характеристикт суурилсан зохицуулалтыг нэвтрүүлэх нь сул сүлжээний нөхцөлд хүчдэлийн тогтвортой байдлыг хангах оновчтой шийдэл болохоор байна.

Энэхүү судалгаанд квази-динамик симуляцын аргыг ашиглан сэргээгдэх эрчим хүчний хувьсамтгай эх үүсвэрүүдийн реактив чадлын зохицуулалтад оролцох боломжийг богино хугацааны (Хоногийн 24 цаг) болон жилийн (8760 цаг) өгөгдөлд тулгуурлан иж бүрэн байдлаар судалсан нь шинэлэг тал болсон болно. Ингэснээр уламжлалт статик эсвэл нэг агшны тооцооллоос ялгаатайгаар сүлжээний тогтсон горимд илүү бодит нөхцөлд үнэлэх боломжийг олгож байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] ЦДҮС ТӨХК-ийн ЗӨБС-ын 2025 оны өвлийн их ачааллын хяналт хэмжилтийн тайлан.

[2] ДҮТ ТӨХХК-ийн 2025-2026 оны ЭХС-ийн горим ажиллагааны төлөвлөлт.

[3] ЦДҮС ТӨХК-ийн ЗӨБС-ын горим ажиллагааны тухай тайлан.

[4] Х.Цагаан, М.Хуягдорж “Цахилгаан энергийн дамжуулалт хуваарилалт”, УБ. 2003 он

[5] Д.Содномдорж “Цахилгаан системийн горимын эрчим хүчний цогцолбор судлал ба математик загварилал шилмэл бүтээл 2012 он

[6] Ш.Гантөмөр “Цахилгаан шугам сүлжээ, систем”,УБ. 2017 он

[7] Нэгдсэн сүлжээний дүрэм

[8] Л.А.Солдаткина “Электрические сети и системы”. М.: Энергия, 1978. 7.

[9] Төвийн бүсийн нэгдсэн системийн 220 кВ-ын цахилгаан шугам сүлжээний горимын судалгаа 2022 он

[10] Ч.Улам-Оргил, Ц.Мөнхшүр “ТБНС-д их чадлын салхин цахилгаан станц холбогдох үед баримтлах сүлжээний дүрмийн давтамж ба актив чадлын шаардлага”, Renewable energy and advanced technology. 2018 УБ хот

[11] Баруун бүсийн эрчим хүчний системд сэргээгдэх эх үүсвэрүүдийн оролцооны үр ашгийн үнэлгээ

[12] Quasi-Dynamic Evaluation of High Solar PV Penetration Effects on Voltage Stability and Power Quality in Unbalanced Distribution Networks

[13] Modeling of high uncertainty photovoltaic generation in quasi dynamic power flow on distribution systems: A case study in Java Island, Indonesia

[14] J. Morren and S. W. H. de Haan, “Impact of wind power on power system dynamic performance,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 174–180, 2007.

[15] B. Kroposki, B. Johnson, Y. Zhang, and V. Gevorgian, “Achieving a 100% renewable grid: Operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 184–195, 2017.

[16] F. Katiraei and M. R. Iravani, “Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 1821–1831, 2006.

[17] Z. Chen, Y. Li, and M. Shahidehpour, “Time-series simulation of photovoltaic generation impact on voltage stability,”*Energies*, 2020.

[18] M. A. Hossain, H. R. Pota, M. J. Hossain, “Evolution of microgrids with converter-interfaced generations,” *Renewable Energy*, 2017.

[19] Д.Баяржаргал, Д.Анхбаяр, А.Ганбаатар, Э.Энхсайхан ЦДҮС ТӨХК-ийн Зүүн-Өмнөд бүсийн цахилгаан дамжуулах сүлжээний реактив чадлын тохируулгад нарны цахилгаан станцын үзүүлэх нөлөөлөл

ДАРХАН ХОТЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН ХЭТИЙН ТӨЛӨВ: ӨСӨН НЭМЭГДЭХ ХЭРЭГЛЭЭ БА ХОЁРДОГЧ ЭХ ҮҮСВЭРИЙН СОНГОЛТ

Батсайханы БАТ-ЭРДЭНЭ[1], Оросын ПҮРЭВЖАЛ[1], Эрдэнэбатын ЦЭНГҮҮЛ[2], Пашкагийн БЯМБАЦОГТ[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулааны хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: dds.baterdene.b@gmail.com[1], enguul_814@yahoo.com[2]

Хураангуй: **Сүүлийн жилүүдэд Дархан хотын дулаан хангамжийн системд холбогдох хэрэглэгчдийн тоо эрчимтэй өсөж, ойрын жилүүдэд 8.2-18.11 Гкал/ц-аар нэмэгдсэн үзүүлэлттэй байна. Дарханы Дулааны цахилгаан станц (ДЦС)-ын суурилагдсан хүчин чадал нь цаашид өсөн нэмэгдэж буй дулааны эрэлт хэрэгцээг хангах нөөцгүй ба дутагдалд орохоор байна. Энэхүү судалгаагаар Дархан хотын хойд хэсгийн өсөн нэмэгдэх хэрэглээг хангах, системийн найдвартай ажиллагааг дээшлүүлэх зорилгоор хоёрдогч эх үүсвэр барих техникийн боломжийг судалсан. Судалгааны үр дүнд хотын хойд талд шинэ эх үүсвэр байршуулж, К19-өөс хойших хэсгийн 155.13 Гкал/ц ачааллыг шинэ эх үүсвэрт шилжүүлэх оновчтой шийдлийг боловсруулав. Мөн дулааны станц (ДС) болон дулааны цахилгаан станцын (ДЦС) хувилбаруудыг техник-эдийн засгийн үзүүлэлтээр харьцуулахад, ДС нь хөрөнгө оруулалтын зардал 5 дахин бага, бүтээн байгуулалтын хугацаа богино зэрэг давуу талтай болохыг тодорхойлсон.**

Түлхүүр үг: дулааны эрэлт хэрэгцээ, төв шугам сүлжээ, технологийн харьцуулалт, техник-эдийн засгийн үндэслэл

I. УДИРТГАЛ

Дархан хотын дулаан хангамжийн эрэлт хэрэгцээ сүүлийн жилүүдэд эрчимтэй өсөж, одоо ажиллаж буй Дарханы дулааны цахилгаан станц нь ойрын ирээдүйд өсөн нэмэгдэх дулааны эрэлт хэрэгцээг бүрэн хангах техникийн нөөцгүй болохоор байна. Ялангуяа хотын хойд хэсгийн төгсгөлийн цэгүүдэд дулааны сүлжээний даралт болон температурын горим алдагдах асуудал үүсэж байгаа нь цаашид төлөвлөгдсөн орон сууцны хорооллуудыг төвлөрсөн системд холбох боломжийг хязгаарлах эрсдэлтэй юм. Энэхүү судалгааны зорилго нь Дархан хотын дулаан хангамжийн системийн найдвартай ажиллагааг дээшлүүлэх, агаарын бохирдлыг бууруулах зорилтын хүрээнд хоёрдогч эх үүсвэр барих техникийн шийдлийг боловсруулж, өсөн нэмэгдэх хэрэглээг хангах боломжийг тодорхойлоход оршино.

II. ДАРХАН ХОТЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙН ӨНӨӨГИЙН БАЙДАЛ СУДАЛГАА ТООЦОО

Энэхүү судалгаанд Дархан хотын төвлөрсөн дулаан хангамжийн системийн (ТДХС) өнөөгийн нөхцөл байдалд дүн шинжилгээ хийж, ирээдүйн ачааллын өсөлтийг тодорхойлох замаар хоёрдогч эх үүсвэрийн техникийн шийдлийг боловсруулах цогц аргачлалыг ашигласан.

Дулаан хангамжийн системийн дулааны ачаалал болон жилийн хэрэглээг тооцох аргачлалаар тооцоог гүйцэтгэсэн.

Дулааны ачаалал ба жилийн хэрэглээг тооцоолох, Гкал/ц

$$Q_{\text{д}} = q_{\text{д}} \cdot V_{\text{д}} \cdot \left(t_{\text{д}} - t_{\text{г.д}}\right) \qquad (1)$$

Хэрэглээний халуун усны системийн дулааны ачаалал, Гкал/ц

$$Q_{\text{хху}}^{\text{7.дунд}} = \frac{a \cdot m \cdot c \cdot \left(t_{\text{хал}} - t_{\text{хүй}}\right)}{T} \qquad (2)$$

Дулаацуулгын системийн жилийн хэрэглээ

$$Q_{\text{д}}^{\text{жил}} = Q_{\text{д}}^{\text{жил}} \cdot n_{\text{д}} = \overline{Q_{\text{д}}} \cdot Q'_{\text{д}} \cdot n_{\text{д}} \qquad (3)$$

Дулааны жилийн нийт хэрэглээ, Гкал/ц

$$Q_{\text{нийт}}^{\text{жил}} = Q_{\text{д}}^{\text{жил}} + Q_{\text{хху}}^{\text{жил}} + Q_{\text{а}}^{\text{жил}} \qquad (4)$$

Түлшний зарцуулалт, тн

$$B_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{нийт}}^{\text{жил}} \cdot 10^3}{Q_{\text{доод}}^{\text{аж}} \cdot n_{\text{зуух}}} \qquad (5)$$

Нүүрсхүчлийн хийн нийт ялгарал, тн

$$E_{co2} = M \cdot Q_{\text{доод}}^{\text{аж}} \cdot EF \cdot ce \cdot \frac{44}{12} \qquad (6)$$

2.1. Өгөгдөл цуглуулалт ба статистик боловсруулалт

Судалгааны суурь өгөгдөл болгож “Дарханы Дулааны Сүлжээ” ТӨХК болон “Дарханы ДЦС” ТӨХК-ийн 2013-2024 оны ашиглалтын статистик үзүүлэлтүүд, дулаан түгээлтийн бодит зарцуулалт болон сүүлийн жилүүдэд олгогдсон техникийн нөхцөлийн жагсаалтад дүн шинжилгээ хийсэн. Хотын хөгжлийн ерөнхий төлөвлөгөөтэй уялдуулан 2025-2030 он хүртэлх дулааны ачааллын таамгийг экстраполяцийн аргаар тодорхойлов.

“Дарханы дулааны сүлжээ” ТӨХК нь 2024-2025 оны дулаан хангамжийн системийн гидравлик горимоор 221,5 Гкал/ц-ийн тооцоот ачааллаар, 3782,8 тн/ц-ийн тооцоот зарцуулалттай, өгөх шугамын усны даралтын горимыг 1,2 МПа, буцах шугамын усны даралтыг 0,24 МПа-аар барихаар, сүлжээний усны урсгалын хурд 2,1 м/с, боломжит түрэлт 96 метр, байхаар горим бодож, үйлдвэр техникийн зөвлөлийн хуралд танилцуулан, өвлийн их ачааллын үеийн горим ажиллагааны саналыг боловсруулж, Эрчим хүчний яамаар батлуулан хэрэгжилтийг хангуулахаар ажилласан байна. 2024-2025 оны халаалтын улирлын бодогдсон горимоор:

дулаацуулгад - 173.38 Гкал/цаг буюу (2895,4 т/ц), хэрэгцээний халуун усанд – 43,4 Гкал/ц (789,8 т/ц), агааржуулалт - 4.7 Гкал/цаг буюу 78,49 т/ц, бүгд 221,5 Гкал/цаг (3782,8 тн/ц) байсан. 2024 оны дулааны оргил ачаалал 179.7 Гкал/ц байсан. Дархан хотын 2024-2025 оны халаалтын улиралд 45 хувийн орон сууц, 17 аж ахуйн нэгж байгууллага, 30 нийтийн зориулалттай орон сууцны барилга буюу нийт 19,51 Гкал/цаг бүхий ачаалалтай нийт 92 барилга объектыг төвлөрсөн дулаан хангамжийн системд шинээр нэмж холбосон байна. 2025 он “Дарханы дулааны сүлжээ” ТӨХК-иас олгосон техникийн нөхцөлтэй сүлжээнд холбогдохоор хүлээгдэж байгаа 80.7 Гкал/ц-ийн ачаалал бүхий 164 барилга байна. Эрчим хүчний яамнаас техникийн нөхцөл олгосон томоохон 14 хэрэглэгчийн дулааны сүлжээнд холбохоор хүлээгдэж байгаа ачаалал 144.7 Гкал/ц байна. 2024-2025 оны халаалтын улиралд холбоно гэж тооцвол эх үүсвэрийн дулаанжуулалтын тоноглол /1-р секцийн өргөтгөл/-ын өргөтгөлийг хийсэн ч 39.59 Гкал/ц-ийн дутагдалд орохоор тооцоо, судалгааны үр дүн гарсан. Иймд эх үүсвэрийн хүчин чадлыг нэмэгдүүлэх, Дархан-Уул аймгийн өсөн нэмэгдэх хэрэглээ, хэтийн төлөвтэй уялдуулан бага чадлын 200-400 Гкал/ц-ийн тооцоот ачаалалтай хэрэглэгчийг дулааны эрчим хүчээр хангах хоёрдогч эх үүсвэрийг шинээр барих ажлыг эхлүүлэх нь нэн түрүүнд тулгамдаж байна. Өсөн нэмэгдэх хэрэглээтэй уялдуулан сүлжээний усны зарцуулалтыг тооцвол 1278 тн/ц-аар нэмэгдэхээр байна.

ДАРХАН ХОТЫН ДУЛААНЫ ЭХ ҮҮСВЭРИЙН ЧАДАЛ, ДУЛААН БОЛОВСРУУЛАЛТ, ТҮГЭЭЛТ, ХЭРЭГЛЭЭНИЙ ӨСӨЛТ, ХЭТИЙН ТӨЛӨВИЙН ТААЦ

1-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлтүүд	ААНБ	Нэгж	Тоо хэмжээ	Тайлбар
Дулааны эрчим хүч				
Суурилагдсан хүчин чадал (анхны-усаар): Бойлерын секц: II, III	ДДЦС	Гкал/ц	232/**179***	1965-2023 онд: Ачаалал бүрэн тулсан
Суурилагдсан хүчин чадал (бүрэн-усаар): Бойлерын секц: I, II, III	ДДЦС	Гкал/ц	307/**235***	2025 оноос 60Гкал/ц нэмэгдэнэ. Залуус II хороолол 58Гкал/ц авна. Дулааны үйлдвэрлэл хязгаартаа тулна.
Оргил ачаалалын горим (max 130/70)	ДДЦС	°C	116/68	2023.12.21-нд -14°C дутуу барьсан
ДЭХ нийт боловсруулалт	ДДЦС	мян.Гкал	668,9	2023 онд Түүхэн дээд
ДЭХ нийт түгээлт	ДДЦС	мян.Гкал	647,4	2023 онд ЭХС-т эзлэх хувь: 5.4%
Үүнээс: усаар	ДДЦС	мян.Гкал	631,9	2020 он: 548 мян.Гкал 2021 он: 554 мян.Гкал 2022 он: 586 мян.Гкал
Үүнээс: уураар	ДДЦС	мян.Гкал	15,5	
Жишмэл түлшний хувийн зарцуулалт	ДДЦС	кг/Гкал	189.8	ЭХС-ийн дундаж: 178.2
Нүүрс нийт хэрэглээ:	ДДЦС	мян.тн	580.8	Төмөр зам 2.8 сая.тн боломжтой
Шарын голын уурхайгаас:	ДДЦС	мян.тн	416.4	3676 ккал/ц
Багануурын уурхайгаас:	ДДЦС	мян.тн	164.4	3260 ккал/ц
Дулааны эрчим хүч түгээлт	ДДС	мян.Гкал	218.03	15921 айл өрх, 1713 аж ахуй
Дулаан дамжуулах шугам	ДДС	км	23.7	
Дулаан түгээх шугам	ДДС	км	91.4	
ДДЦС-К12 магистраль (тооцоот/бодит)	ДДС	Гкал/ц	238/218.3	Ф800 мм
	ДДС	тн/ц	3650/3640	Ф800 мм
ДЭХ-ний хэрэглээний өсөлт	ДДС	Гкал/ц	12.8	2023-2024 оны халаалтын улиралд
ДЭХ-ний хэрэглээний өсөлт олон жилийн дундаж	ДДС	Гкал/ц	4.5	Сүүлийн 6 жилийн
Дулааны техникийн нөхцөл олгогдсон	ДДС	Гкал/ц	76.5	2024 оны байдлаар
ДЭХ-ний хэрэглээний таац 2030 онд	ДДС	мян.Гкал	829.5	2035 он: 969 мян.Гкал (394 Гкал/ц)
Хүлэмжийн хийн ялгаруулалт				
Хүлэмжийн хийн ялгаруулалт CO2-оор	ДДЦС	сая.тн	0.96	ЭХС-т III байранд

Дархан хотод нийт 196 орон сууцны барилга дулааны шугам сүлжээнд холбогдсоноос хэрэглээний халуун усыг 174 барилга буюу 88.8 % нь хаалттай, 22 барилга буюу 11.2 % нь нээлттэй системээр, дулаацуулгын системийн хувьд хамааралтай схемээр 117 орон сууц буюу 59.7 %, хамааралгүй схемээр 79 орон сууц буюу 40.3 % нь холбогдсон байна.

Бие даасан тустаа узельтэй хэрэглэгчдийн дулааны тоолуурыг тавьсан ба нийт 1062 аж ахуйн нэгжийн 428 нь буюу 40.3 хувь нь, 621 хувийн орон сууцны 64 нь буюу 10.3 хувь нь дулааны тоолууртай байна. Хэрэглээний халуун усны хувь 1669 аж ахуйн нэгжийн 928 нь буюу 55.6 хувь, 13697 айл өрхийн 11739 нь хэрэглээний халуун усны тоолууртай байна.

2.2. Гидравлик горимын тооцоо

Дархан хотын дулаан дамжуулах сүлжээний К1-ээс К63 хүдаг хүртэлх магистраль шугамын гидравлик горимыг 130/70°С-ийн температурын графиктайгаар тооцоолсон. Ингэхдээ:

- Сүлжээний усны температурын уналтыг зайн хамаарлаар тооцох;
- Төгсгөлийн хэрэглэгчдэд очих боломжит түрэлтийг гидравлик тооцооны аргаар шалгах;
- К19 хүдгаас хойших ачааллыг шинэ эх үүсвэрт шилжүүлэх үеийн сүлжээний даралтын өөрчлөлтийг 27 өөр төрлийн сэлгэмлээр туршилт хийж гүйцэтгэв.

2.3. Техник-эдийн засгийн харьцуулсан дүн шинжилгээ

Хоёрдогч эх үүсвэрийн оновчтой хувилбарыг сонгохдоо дараах хоёр загварт харьцуулалт хийсэн:

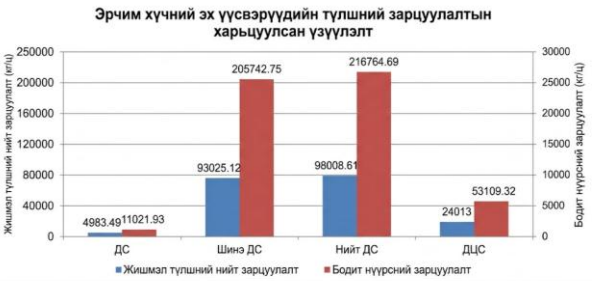
Дулааны Станц хувилбар: КВ ТС-20 маркийн эргэлтэт буцламтгай үет шаталтын технологи бүхий ус халаалтын зуух ашиглах.

Дулааны Цахилгаан Станц хувилбар: Т-50/60-130 төрлийн турбинтэй, цахилгаан ба дулааныг хослон үйлдвэрлэх технологи.

Харьцуулалтыг хөрөнгө оруулалтын зардал, ашиглалтын зардал, түлшний хувийн зарцуулалт болон төслийн хэрэгжих хугацаа гэсэн үндсэн шалгуур үзүүлэлтүүдээр гүйцэтгэв.

ЦАХИЛГААН, ДУЛААНЫ ТҮЛШНИЙ ХУВИЙН ЗАРЦУУЛАЛТ

1-Р ГРАФИК



Эх үүсвэрүүдийн нэмэлт үзүүлэлтүүд	ДС	Шинэ ДС	Нийт ДС	ДЦС
Чадал (Гкал/ц)	30	250	250	250
Жишмэл түлшний хувийн зарцуулалт (кг/Гкал)	166.116	166.116	166.116	40.7

2.4. Байршил сонголт ба дэд бүтцийн үнэлгээ

Шинэ эх үүсвэрийн байршлыг сонгохдоо түлш тээвэрлэлтийн (төмөр замын холболт), ус хангамжийн эх үүсвэр, цахилгаан дамжуулах

агаарын шугамд холбогдох боломж болон инженерийн геологийн нөхцөл байдлыг иж бүрэн үнэлэх арга зүйг ашигласан. Түүнчлэн агаарын бохирдлын тархалтыг салхины зонхилох чиглэлтэй уялдуулан тооцож, байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийг урьдчилан үнэллээ.

III. ДУЛААНЫ ШИНЭ ЭХ ҮҮСВЭРИЙН СОНГОЛТ

3.1. Дулааны ачааллын өсөлт

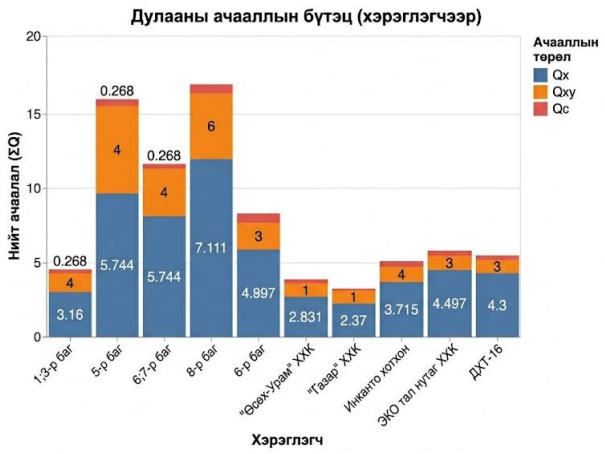
Дархан хотын дулааны хэрэглээ 2022-2024 онуудад 8.2-18.11 Гкал/ц-аар огцом нэмэгдсэн нь хотын ерөнхий төлөвлөгөөний дагуу шинэ суурьшлын бүсүүд ашиглалтад орж байгаатай шууд холбоотой юм. 2024-2025 оны халаалтын улиралд Дарханы ДЦС-ын дулаанжуулалтын тоноглолын өргөтгөлийг хийсэн хэдий ч системийн хэмжээнд 39.59 Гкал/ц-ийн чадлын дутагдал үүсэхээр байна.

Сүлжээний гидравлик тооцоогоор төгсгөлийн цэгүүд (К63 худаг) дээрх температур 82/49°С болж буурсан нь стандарт горимоос (130/70°С) 30-40%-иар доогуур байгаа бөгөөд энэ нь системийн алслагдсан хэрэглэгчид техникийн шаардлага хангасан дулаан авч чадахгүй байгааг харуулж байна.

Шинэ эх үүсвэрт холбогдох дулааны ачаалал Дулааны шугам сүлжээний (ДШС) схемээр К19-өөс хойших хэсгийг шинэ эх үүсвэрт холбох боломжтой гэж үзэв. Энэ хэсэгт холбогдсон дулааны ачаалал 2024-2025 оны халаалтын улирлын байдлаар 95,904 Гкал/ц байна. Дархан хотын хөгжлийн хэтийн төлөвөөр тус хотод нийт 140 Гкал/ц дулааны ачаалал нэмэгдэх бөгөөд үүний 40 орчим хувь буюу 59,226 Гкал/ц дулааны ачаалал шинэ эх үүсвэрийн шугамд уягдах боломжтой. Энэ тохиолдолд шинэ эх үүсвэрээс хангагдах хэрэглэгчдийн дулааны тооцоот ачаалал 155,13 Гкал/ц байх болно.

ШИНЭЭР НЭМЭГДЭХЭЭР ХҮЛЭЭГДЭЖ БУЙ ДУЛААНЫ АЧААЛАЛ, ГКАЛ/Ц

2-Р ГРАФИК



Тэмдэглэгээ:

Qх-халаалтын дулаан, Гкал/ц;

Qху-хэрэглээний халуун усны дулаан Гкал/ц;

Qс-агааржуулалтын дулаан Гкал/ц;

ΣQ-нийт дулаан, Гкал/ц;

ДХ-шинэ хэрэглэгчдийн холбогдох дулааны худгийн дугаар.

3.2. Хоёрдогч эх үүсвэрийн байршил, ачаалал шилжүүлэлт

Судалгаагаар шинэ эх үүсвэрийг хотын хойд хэсэгт байршуулах нь техникийн хувьд хамгийн үр ашигтай болох нь тогтоогдлоо. Дулааны шугам сүлжээний К19 худгаас хойших хэсгийг шинэ эх үүсвэрт холбосноор:

Одоогийн шилжүүлэх ачаалал: 95.9 Гкал/ц;

Ирээдүйн өсөн нэмэгдэх ачаалал: 59.2 Гкал/ц;

Нийт төлөвлөсөн хүчин чадал: 155.13 Гкал/ц байна.

Энэхүү шийдэл нь Дарханы дулааны цахилгаан станцаас гарч буй үндсэн магистраль шугамын ачааллыг 40 орчим хувиар хөнгөлж, "Шинэ Дархан" орчмын хэрэглэгчдийг найдвартай эх үүсвэрээр хангах нөөц боломжийг бүрдүүлнэ.

3.3. Эх үүсвэрийн хувилбаруудын харьцуулсан дүн шинжилгээ

Судалгааны хүрээнд Дулааны станц болон Дулааны цахилгаан станцын техник-эдийн засгийн үзүүлэлтүүдийг харьцуулан хэлэлцэв.

Техник ажиллагаа: Дулааны цахилгаан станцын хувьд дулаан болон цахилгааныг хослон үйлдвэрлэх технологи нь түлшний ашиглалтын коэффициентыг 80-85%-д хүргэж, нүүрсний зарцуулалтыг дулааны станцтай харьцуулахад жилд 163.6 тонноор бууруулах боломжтой.

Эдийн засаг: Хөрөнгө оруулалтын зардлын хувьд дулааны цахилгаан станц нь 1.46 их наяд төгрөг байгаа нь дулааны станцаас (254.2 тэрбум төгрөг) даруй 5 дахин өндөр байна. Энэ нь төслийн өгөөжийн хугацаа болон улсын төсвийн ачаалалд шууд нөлөөлөх хүчин зүйл юм.

ИЖИЛ ДУЛААНЫ ЧАДАЛТАЙ ДУЛААНЫ СТАНЦ БОЛОН ДУЛААНЫ ЦАХИЛГААН СТАНЦ ЗАРДАЛ, САЯ ТӨГРӨГ

2-Р ХҮСНЭГТ

ДЦС болон ДС-ын чадал	150 МВт чадалтай ДЦС	232 МВт чадалтай Дулааны станц
Хөрөнгө оруулалтын зардал. ам доллар	405.0	742.8
Хөрөнгө оруулалтын зардал. төгрөг	1,417,500.0	260,000.0

IV. ДҮГНЭЛТ

1. Дархан хотын дулаан хангамжийн систем "критик" түвшинд хүрсэн бөгөөд 2027 он гэхэд дулааны хэрэглээ 893.5 мян.Гкал-д хүрч, одоогийн эх үүсвэрийн дээд хязгаараас давахаар байна.

2. Техникийн оновчтой шийдэл нь К19 худгаас хойшхи ачааллыг бие даасан хоёрдогч эх үүсвэрт шилжүүлэх явдал мөн. Ингэснээр Дархан хотын хойд болон урд бүсүүд тусдаа эх үүсвэрээс гидравлик хамааралгүйгээр ажиллаж, системийн найдвартай байдал 2 дахин өснө.

3. Хөрөнгө оруулалтын зардлын хэмжээ болон бүтээн байгуулалтын хугацааг (2-3 жил) харгалзан үзвэл, нэн тэргүүнд Дулааны станц барих нь стратегийн хувьд зөв шийдэл юм. Хэдийгээр Дулааны цахилгаан станц нь эрчим хүчний хэмнэлттэй боловч хөрөнгө оруулалтын зардал 5 дахин их байгаа нь төслийг хэрэгжүүлэхэд санхүүгийн өндөр эрсдэл дагуулж байна.

4. Шинэ эх үүсвэрт эргэлтэт буцламтгай үет шаталтын технологийг нэвтрүүлснээр байгаль орчинд хаях хорт хийн хэмжээг олон улсын стандартын түвшинд барьж, Дархан хотын агаарын бохирдлыг бууруулах нийгмийн ач холбогдолтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Монголын Эрчим Хүчний Ассоциацийн ДДС/2015-1 дугаартай төсөл, Дархан хотын дулаан хангамжийн системийг найдваржуулан сайжруулах судалгаа, дэвшилтэд технологид шилжүүлэх урьдчилсан ТЭЗҮ

[2] Б. Намхайням “Дулаан хангамжийн систем” Улаанбаатар, 2019 он

[3] С. Батмөнх, “Дулаан нэвтрүүлэлт, дулаан дамжуулалт” Улаанбаатар, 2007 он

[4] “Дарханы дулааны сүлжээ” ТӨХК 2013-2025 он хүртэлх өсөн нэмэгдэж буй хэрэглээний судалгаа

[5] “Дарханы дулааны сүлжээ” ТӨХК 2025 он хүртэлх ТЭЗҮ-үүдийн судалгаа

[6] Дархан хотын ирээдүйн хэрэглээ, өсөн нэмэгдэх хүн амын судалгаа

[7] Дархан хотын ерөнхий болон хэсэгчилсэн төлөвлөлт

[8] “Дарханы дулааны сүлжээ” ТӨХК-ийн дулаан дамжуулах, түгээх сүлжээний схем, холболт

УЛААНБААТАР ХОТЫН ДУЛААНЫ АЧААЛЛЫН ТООЦООЛОЛ, ҮР ДҮНГИЙН ШИНЖИЛГЭЭ

Халзангийн ЦОЛМОН[1], Сэрээтэрийн БАТМӨНХ[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан цахилгаан станцын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: kh.tsolmon@must.edu.mn[1]

Хураангуй: **Энэхүү судалгаагаар Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулааны хангамжийн сүлжээнд (ТДХС) холбогдсон нийт барилгын дулааны ачааллыг Excel ба MATLAB программчлалаар тооцоолж, орон зайн тархалт, бүтцийн шинжилгээг хийсэн. GIS-KML форматын барилгын түвшний геомэдээллийн сангаас дулаацуулга, агааржуулалт, хэрэгцээний халуун ус хангамж гэсэн гурван бүрэлдэхүүний ачааллыг тооцоолов. Нийт дулааны ачаалал 3,609.66 Гкал/ц (~4,198 МВт) байгаагаас дулаацуулгын ачаалал 77.6%, хэрэгцээний халуун ус хангамж 20.6%, агааржуулалт 1.8%-ийг тус тус эзэлж байна. ХУД хамгийн их (29.1%), ЧД хамгийн бага (5.2%) ачаалалтай; СБД нэгж барилгад ногдох дундаж ачааллаар хамгийн өндөр (0.279 Гкал/ц) байгаа нь хотын төв дүүрэгт олон нийтийн том барилга төвлөрсөнтэй холбоотой. Excel ба MATLAB-ийн тооцооны үр дүн бүрэн нийцсэн (<0.1% зөрүү); GUM (ISO/IEC 98-3:2008) аргачлалаар үнэлсэн нийт тодорхойгүй байдал ±23% (95%-ийн найдвартай интервал) бөгөөд зонхилох алдааны эх үүсвэр нь q_0 коэффициентын хүрээ (±12.5%) болно. Судалгааны гол хязгаарлалт нь оргил ачааллын статик загвар ашигласан, динамик дулааны хуримтлалыг тооцоогүйд оршино. Цаашид энэхүү суурь мэдээллийг ашиглан дулааны сүлжээний гидравлик загварчлал, 4-р үеийн дулаан хангамжийн систем (4GDH) рүү шилжих техник-эдийн засгийн боломжийн шинжилгээ, сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн оновчтой байршлыг тодорхойлох судалгааг үргэлжлүүлэх юм.**

Түлхүүр үг: Дулааны ачаалал, Төвлөрсөн дулаан хангамж, GIS, 4GDH, Алдааны үнэлгээ

I. УДИРТГАЛ

Улаанбаатар хот нь дэлхийн хамгийн хүйтэн нийслэлүүдийн нэг бөгөөд өвлийн тооцооны гадна агаарын температур нь -39°C хүрдэг. Иймд төвлөрсөн дулааны хангамжийн систем (ТДХС) нь хотын амьдралын чанар, эрүүл мэнд, эдийн засгийн тогтвортой байдалд шийдвэрлэх ач холбогдолтой. Одоогоор Улаанбаатар хотын ТДХС нь Дулааны цахилгаан станц (ДЦС-2, ДЦС-3, ДЦС-4), Амгалан дулааны станц зэрэг эх үүсвэрүүдээс бүрдэх нэгдсэн дулааны сүлжээгээр хотын барилгуудыг дулаанаар хангаж байна [1, 2].

Дулааны ачааллыг үнэн зөв тооцоолох нь дулааны сүлжээний оновчлол, хүчин чадлын төлөвлөлт, мөн ирээдүйн 4-р үеийн дулаан хангамжийн систем (4GDH) рүү шилжих шилжилтийн суурь мэдээлэл болдог [5, 6]. 4GDH системийн нэг гол давуу тал нь бага температуртай дулааны сүлжээгээр дамжуулан сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийг (нар, газрын гүний дулаан, дулааны насос г.м.) интеграцчлах боломжтой байдал юм [7]. Гэвч энэ шилжилтийг хэрэгжүүлэхийн тулд одоо байгаа системийн дулааны ачааллын нарийвчилсан мэдээлэл, орон зайн тархалт зайлшгүй шаардлагатай.

Олон улсын хэмжээнд дулааны ачааллын газрын зураглал нь өргөн ашиглагдаж байгаа бөгөөд Данийн Heat Atlas [8], Европын Heat Roadmap Europe [9] төсөл зэрэг нь дулааны ачааллыг орон зайн хэмжээнд нарийвчлан тодорхойлж, дулаан хангамжийн системийн стратегийн төлөвлөлтөд ашиглаж ирсэн [10, 11]. Эдгээр судалгаанууд нь барилга тус бүрийн GIS өгөгдөлд суурилан дулааны ачааллын нягтшилын зургийг боловсруулж, сүлжээний оновчлол болон сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн байршлыг тодорхойлоход практик үр дүнтэй болохыг харуулсан. Гэвч Улаанбаатар хотын нөхцөлд мөн адил барилгын түвшний (building-level) GIS мэдээлэлд суурилсан иж бүрэн дулааны ачааллын зураглал, орон зайн шинжилгээ одоог хүртэл хийгдэж, нийтэд хүртээмжтэй болгоогүй байна.

Тодруулбал, дараах дөрвөн чиглэлийн судалгааны цоорхой (research gap) оршиж байна. **Нэгдүгээрт,** Монголын дулааны тооцооны аргачлалыг ТДХС-д холбогдсон бүх барилгад — 16,000-аас дээш объектод — нэгэн зэрэг, системтэйгээр хэрэглэж, тооцооны нийцлийг олон улсын аргачлалтай харьцуулан баталгаажуулсан судалгаа дотоодод байхгүй байна. **Хоёрдугаарт,** Улаанбаатар хотын дулааны ачааллын нягтшилын орон зайн тархалт барилгын түвшинд тодорхойлогдоогүй тул дүүрэг хоорондын ялгааг тооны баримтаар нотлох боломж хязгаарлагдмал байсан. **Гуравдугаарт,** Excel болон MATLAB зэрэг хоёр өөр програмчлалын хэрэгслийн тооцооны нийцлийг нэг өгөгдлөөр шалгаж, хоёр аргын давуу болон сул талыг инженерийн практикт тулгуурлан харьцуулсан ажил хийгдэж байгаагүй. **Дөрөвдүгээрт,** 4GDH шилжилтийн техник-эдийн засгийн боломжийг үнэлэхэд зайлшгүй шаардлагатай дулааны ачааллын суурь мэдээлэл тоо баримтаар нотлогдоогүй байгаа нь төлөвлөлтийн ажилд саад болж байв.

Иймд дээрх судалгааны цоорхойг нөхөх зорилгоор энэхүү судалгааг хийсэн бөгөөд гол зорилго нь: (1) Улаанбаатар хотын ТДХС-д холбогдсон нийт барилгын дулааны ачааллыг Excel ба MATLAB-аар тооцоолж, хоёр аргын нийцлийг баталгаажуулах; (2) тооцооны үр дүнг дүүрэг,

хороо, ачааллын төрлөөр задлан шинжлэх; (3) орон зайн тархалтыг тодорхойлж, барилгын түвшний дулааны ачааллын нягтшилын газрын зургийг боловсруулах; (4) Excel ба MATLAB аргуудын давуу болон сул талыг Монголын инженерийн практикт нийцүүлэн харьцуулан үнэлэх зэрэг болно.

Энэхүү судалгааны **шинэлэг хувь нэмэр** нь ашигласан аргачлалд биш, харин тооцооллын цар хүрээ, өгөгдлийн нарийвчлал, болон бий болгосон мэдлэгийн шинэ чанарт оршино. Тодруулбал: **Нэгдүгээрт,** Улаанбаатар хотын ТДХС-д холбогдсон 16,057 барилгыг барилгын түвшинд нэгэн зэрэг, автоматаар тооцоолж, дүүрэг болон хорооны нарийвчлалд хүртэл задалсан дулааны ачааллын нягтшилын газрын зургийг анх удаа бий болгосон нь дотоодын судалгааны практикт урьд өмнө хийгдэж байгаагүй ажил юм. **Хоёрдугаарт,** Монголын инженерийн аргачлал [3]-ийг Excel болон MATLAB хэрэглүүрт нэгэн зэрэг хэрэгжүүлж, GUM (ISO/IEC 98-3:2008) стандартаар тодорхойгүй байдлыг тооцоолсон нь тооцооны найдвартай байдлыг дотоодын судалгаанд анх баримтжуулсан туршлага болно. **Гуравдугаарт,** гаргасан үр дүн нь цаашид 4GDH шилжилтийн техник-эдийн засгийн боломжийн шинжилгээ, дулааны сүлжээний гидравлик загварчлал, сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн оновчтой байршлыг тодорхойлох судалгаанд шаардагдах баталгаажсан суурь мэдээллийг анх удаа нийтэд хүртээмжтэй болгож байна.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТ

Судалгааны объект нь Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулааны хангамжийн сүлжээнд холбогдсон нийт 16,000 гаруй барилга юм. Эдгээр барилгууд нь хотын 6 дүүрэг (Хан-Уул, Баянзүрх, Баянгол, Сүхбаатар, Сонгинохайрхан, Чингэлтэй)-ийн 134 хороонд тархан байрлаж, нэгдсэн сүлжээгээр дулаанаар хангагддаг.

Барилга тус бүрийн газар зүйн мэдээллийн санг GIS KML форматаар бүрдүүлсэн бөгөөд энэхүү өгөгдлийн сан нь Улаанбаатар хотын Засаг даргын Тамгын газрын Хот байгуулалтын газар [16], Улаанбаатарын Дулааны УСУГ-ийн [17] барилгын бүртгэлийн мэдээлэл болон ШУТИС-ийн судалгааны зорилгоор цуглуулсан нэмэлт мэдээллийн санг нэгтгэн боловсруулсан болно. Өгөгдлийн суурь он нь 2023–2024 оны байдлаар авсан мэдээлэлд тулгуурласан. Өгөгдлийн чанарын шалгалтыг гараар гүйцэтгэсэн бөгөөд давхардсан бичлэг, хоосон ачааллын утга болон координатын логик нийцлийг шалган баталгаажуулсан. Өгөгдлийн сан нь газарзүйн координат (уртраг 106.733°–107.022°, өргөрөг 47.835°–47.960°), хорооны код (KH_MON), дулаацуулгын ачаалал (Qo_r), агааржуулалтын ачаалал (Qsv_r), хэрэгцээний халуун ус хангамжийн ачаалал (ctp_hhu) зэрэг мэдээллийг агуулна. Өгөгдлийн сан нь барилгын зориулалт, давхрын тоо, ашиглалтад орсон он зэрэг нэмэлт мэдээллүүдийг багтаасан болно.

III. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН АРГА ЗҮЙ

1. Дулааны ачааллын тооцоо

Барилгуудын дулааны ачааллыг гурван үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгээр тооцоолно. Дулаацуулгын дулааны ачааллыг дараах томьёогоор тодорхойлно:

$$Q_{\text{дул}} = q_0 \cdot V \cdot (t_{\text{дот}} - t_{\text{гад}}) \quad (1)$$

Энд: q_0 — барилгын дулааны алдагдлын коэффициент [Вт/(м³·°C)], барилгын зориулалт болон ашиглалтад орсон оноор авна: орон сууц: 0.38–0.56 Вт/(м³·°C), нийтийн барилга: 0.41–0.64 Вт/(м³·°C) [3]; V — барилгын гадна хэмжээгээр тооцсон эзлэхүүн [м³]; $t_{\text{дот}}$ — дотор агаарын тооцоот температур, орон сууц +18°C, нийтийн барилга +20°C [3]; $t_{\text{гад}}$ — гадна агаарын тооцоот температур, Улаанбаатар хотын хувьд −39°C [4].

Агааржуулалтын дулааны ачаалал:

$$Q_{\text{аг}} = 0.337 \cdot n \cdot q_0 \cdot V_{\text{өр}} \cdot (t_{\text{дот}} - t_{\text{гад}}) \quad (2)$$

Энд: 0.337 — агаарын нягт болон изобар хувийн дулааны багтаамжийн үржвэр: ρ × c^p = 1.2 кг/м³ × 0.281 Вт·ц/(кг·°C) ≈ 0.337 Вт·ц/(м³·°C); n — агааржуулалтын эрчим [удаа/ц]: орон сууц 0.5–1.5, нийтийн барилга 1–3, үйлдвэрийн барилга 4–10 удаа/ц [3]; $V_{\text{өр}}$ — агааржуулалтын өрөөний дотор хэмжээний эзлэхүүн [м³] (гадна хэмжээнээс 0.75–0.80 коэффициентоор хөрвүүлнэ).

Хэрэгцээний халуун ус хангамжийн дулааны ачаалал:

$$Q_{\text{ХХУ}} = 1.163 \cdot \text{m} \cdot \text{a} \cdot (t_{\text{хал}} - t_{\text{хүйт}}) \quad (3)$$

Энд: 1.163 — усны хувийн дулааны багтаамжийн хөрвүүлгийн коэффициент: $c^{p,ус}$ = 4186 Ж/(кг·°C) ÷ 3600 с/ц = 1.163 кВт·ц/(кг·°C); m — хэрэгцээний халуун усны зарцуулалт [кг/ц]: орон сууцны барилгад нэг хүнд 105–120 л/хоног, нийтийн барилгад зориулалтаас хамааран тус тусад нь тооцно [3]; a — хоногийн жигд бус байдлын коэффициент: орон сууц = 1.8–2.0, нийтийн барилга = 1.2–1.5, үйлдвэр = 1.1–1.3 [3]; $t_{\text{хал}}$ — халаасан усны температур (+55°C); $t_{\text{хүйт}}$— хүйтэн усны температур (+5°C).

Нийт дулааны ачааллыг дараах хэлбэрээр тодорхойлно:

$$Q_{\text{нийт}} = Q_{\text{дул}} + Q_{\text{аг}} + Q_{\text{ХХУ}} \quad (4)$$

Энэхүү судалгаанд q_0 утгыг барилгын зориулалт болон ашиглалтад орсон онд үндэслэн сонгосон: (1) 2010 оноос өмнө баригдсан хуучин орон сууц — q_0 = 0.49–0.56 Вт/(м³·°C); (2) 2010 оноос хойш баригдсан шинэ орон сууц — q_0 = 0.38–0.44 Вт/(м³·°C); (3) нийтийн болон олон нийтийн барилга — q_0 = 0.41–0.64 Вт/(м³·°C) [3]. GIS-KML өгөгдлийн санд барилгын зориулалт, ашиглалтад орсон он тус бүрийн мэдээлэл бүрдсэний үндсэн дээр тус тусын q_0 утгыг автоматаар оноосон тул нэгдсэн дундаж утга ашиглаагүй болно.

Европын EN 12831 [14] стандартын аргачлалтай харьцуулалтыг Хүснэгт 3-т нэгтгэн үзүүлэв. EN 12831 нь барилгын бүрхүүлийн элемент тус бүрийн дулаан дамжуулалтын коэффициент (U-утга), цонх болон үүдний нэвчилтийн алдагдал, дотоод дулааны ялгарлыг тусад нь тооцдог нарийвчилсан аргачлал юм. Харин энэхүү судалгаанд ашигласан q_0 коэффициентод суурилсан аргачлал [3] нь барилгын зориулалт болон ашиглалтад орсон оноор ангилсан нэгтгэсэн коэффициентыг хэрэглэх тул тооцооны хурд болон өгөгдлийн хэрэгцээний хувьд давамгай давуу талтай — тухайлбал, 16,057 барилгыг нэгэн зэрэг автоматаар тооцоолоход шаардлагатай U-утгын нарийвчилсан мэдээлэл ТДХС-ийн одоогийн өгөгдлийн санд бүрэн бүрдээгүй байна. Олон улсын судалгааны туршлагаас үзэхэд томоохон хотын хэмжээнд дулааны ачааллын орон зайн зураглал хийхэд q_0 буюу үүнтэй дүйцэхүйц хялбаршуулсан аргачлал өргөн хэрэглэгддэг бөгөөд Heat Roadmap Europe [9] төсөлд ч мөн адил аргачлалыг баримталсан байдаг. Гэхдээ энэ аргачлал нь EN 12831-д суурилсан барилга тус бүрийн нарийвчилсан баталгаажуулалтыг орлохгүй бөгөөд ±23%-ийн тодорхойгүй байдал нь үүнийг тоон байдлаар илэрхийлж байна.

2. Өгөгдөл боловсруулалтын арга зүй

Excel-д боловсруулалт: KML файлаас задалсан өгөгдлийг Excel хүснэгтэд импортолж, дүүрэг/хорооны кодоор бүлэглэн, SUMIFS, AVERAGEIFS, COUNTIFS зэрэг функцүүдийг ашиглан нэгтгэл, статистикийг тооцоолсон. Тооцооны алхам бүрийг тус тусын ажлын хуудсанд байршуулж, дундын үр дүнг хянах боломж олгосон.

MATLAB-д боловсруулалт: KML/Excel өгөгдлийг MATLAB орчинд readtable() функцээр оруулж, нийт барилгыг нэг дор векторчилсан (vectorized) тооцоогоор боловсруулсан. groupsummary() функцээр дүүрэг, хорооны түвшний нэгтгэл хийж, histogram(), scatter(), boxplot() зэрэг визуализацийн хэрэгслүүдийг ашиглан графикуудыг бэлтгэсэн. Хоёр аргын тооцооны үр дүнгийн нийцэл, хугацаа, визуализацийн чадавх, параметр солих уян хатан байдал зэрэг шалгууруар харьцуулалт хийв [12].

Хоёр аргын тооцооны зөрүү (<0.1%) нь гол төлөв q_0 коэффициентыг барилга бүрд оноох дараалын ялгаанаас үүдэлтэй. Excel-д томьёог нүд тус бүрд хэрэглэх явцад үүсэх дугуйралтын алдаа болон MATLAB-ийн векторчилсан тооцооны дугуйралтын ялгаагаас ХУД-ийн дүүрэгт ±0.08%, БЗД-д ±0.06% хүртэл хэлбэлзэл ажиглагдсан. Жишээ нь, q_0 = 0.49 Вт/(м³·°C) утгыг 2,451 орон сууцны барилгад давтан хэрэглэхэд Excel-д тус тусад нь тооцсон нийлбэр болон MATLAB-д нэг дор векторчилсан тооцооны нийлбэр хооронд 0.003 Гкал/ц-ийн хязгаарт зөрүү гарсан нь хоёр аргын нийт зөрүү <0.1% болохыг нотолж байна. Бодит хэмжилттэй тулгалт хийх боломж энэхүү судалгааны хүрээнд хязгаарлагдмал байсан тул энэ нь цаашдын калибрацийн судалгааны зорилт болно.

IV. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ҮР ДҮН

Дүүргийн дулааны ачааллын шинжилгээ

Улаанбаатар хотын 6 дүүргийн дулааны ачааллын нэгтгэлийг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв. Нийт барилгын дулааны ачаалал 3,609.66 Гкал/ц буюу ойролцоогоор 4,198 МВт байна.

ДҮҮРГҮҮДИЙН ДУЛААНЫ АЧААЛЛЫН НЭГТГЭЛ

1-Р ХҮСНЭГТ.

Дүүрэг	Барилга тоо	Q_{o_r} [Гкал/ц]	Q_{sv_r} [Гкал/ц]	ctp_{hhu} [Гкал/ц]	Нийт Q [Гкал/ц]
ХУД	4,331	802.29	28.31	218.60	1,049.21
БЗД	3,900	676.55	11.19	193.16	880.90
БГД	3,570	568.07	4.44	135.55	708.06
СБД	1,800	386.48	12.84	102.92	502.24
СХД	1,668	223.50	3.54	55.86	282.90
ЧД	788	143.30	4.99	38.07	186.36
НИИТ	**16,057**	**2,800.18**	**65.31**	**744.17**	**3,609.66**

1-р хүснэгтээс харахад Хан-Уул дүүрэг нь 4,331 барилгатай, нийт дулааны ачааллын 29.1%-ийг (1,049.21 Гкал/ц) эзэлж хамгийн өндөр ачаалалтай дүүрэг байна. Баянзүрх дүүрэг 24.4%-ийг, Баянгол дүүрэг 19.6%-ийг тус тус эзэлж байна. Чингэлтэй дүүрэг хамгийн бага ачаалалтай (5.2%, 186.36 Гкал/ц) бөгөөд энэ нь барилгын тоо (788) бага байгаатай шууд холбоотой.

2. Ачааллын бүтцийн шинжилгээ

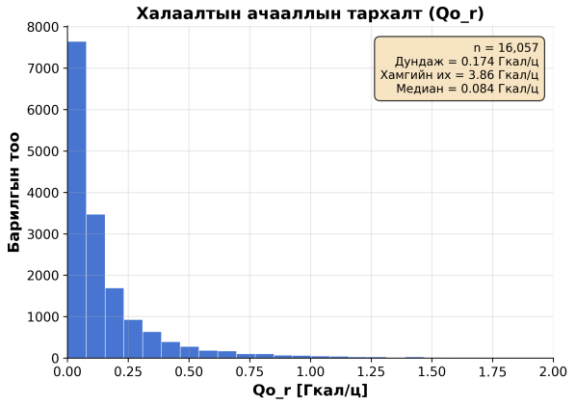
Нийт дулааны ачааллын бүтцийг бүрэлдэхүүн хэсгээр нь авч үзвэл: дулаацуулгын ачаалал (Qo_r) 2,800.18 Гкал/ц буюу нийтийн 77.6%-ийг эзэлж, давамгай байр суурь эзэлж байна. Хэрэгцээний халуун ус хангамжийн ачаалал (ctp_hhu) 744.17 Гкал/ц буюу 20.6%-ийг эзэлж хоёрдугаарт ордог бол агааржуулалтын ачаалал (Qsv_r) зөвхөн 65.31 Гкал/ц буюу 1.8%-ийг эзэлж байна. Агаарын температур -39°C хүрэх хэт хүйтэн уур амьсгалтай нөхцөлд дулаацуулгын ачаалал зонхилдог болно.

ХУД-д агааржуулалтын ачаалал (Qsv_r = 28.31 Гкал/ц) бусад дүүргээс хамаагүй өндөр байгаа нь тус дүүрэгт үйлдвэрлэлийн бүс нутаг, том үйлдвэрийн барилгууд байгаатай холбоотой. Үйлдвэрийн барилгуудад агааржуулалтын коэффициент (n) өндөр (4–10 удаа/ц) байдаг нь энэ ялгааг тайлбарлана.

Дүүргүүд хоорондын энэ ялгааг бүтцийн хүчин зүйлүүд тайлбарлана. ХУД хамгийн их ачаалалтай (29.1%, 1,049.21 Гкал/ц) байгаа нь тус дүүрэгт барилгын тоо хамгийн их (4,331) байгаатай шууд холбоотой бөгөөд нэмэлтээр үйлдвэрийн бүс нутаг зонхилдог тул агааржуулалтын коэффициент *n* өндөр (4–10 удаа/ц) байдаг нь нийт ачааллыг нэмэгдүүлж байна. Харин Чингэлтэй дүүрэг хамгийн бага ачаалалтай (5.2%, 186.36 Гкал/ц) байгаа нь барилгын тоо бага (788) болон дүүрэгт жижиг орон сууцны барилга давамгайлж байгаатай нийцнэ — ийм барилгуудын нэгж эзлэхүүнд ногдох q_0 утга харьцангуй бага байдаг.

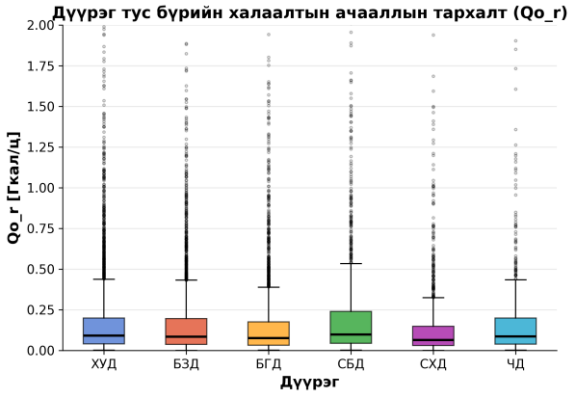
3. Статистик тархалтын шинжилгээ

Барилгуудын дулаацуулгын ачааллын (Q_{o_r}) статистик тархалтыг шинжлэхэд хамгийн бага утга 0 Гкал/ц, хамгийн их утга 3.86 Гкал/ц, дундаж утга 0.174 Гкал/ц байна. Гистограммыг MATLAB-аар дүрслэхэд барилгуудын дийлэнх нь 0–0.5 Гкал/ц хүрээнд байрлаж байгаа нь тархалт баруун тийш хазайсан (right-skewed) хэлбэртэй болохыг харуулна. 1 Гкал/ц-аас дээш ачаалалтай барилга нийт барилгын 2%-иас бага хувийг эзэлж байна.



1-р зураг. Барилгуудын дулаацуулгын ачааллын (Q_{0_r}) гистограмм тархалт

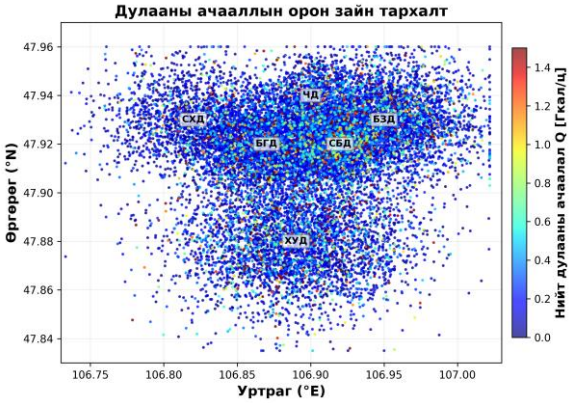
Дүүрэг тус бүрийн Q_{0_r} утгын box plot нь СБД-ийн медиан болон дээд квартилын утга бусад дүүргээс өндөр байгааг харуулна. ХУД, БЗД, БГД зэрэг дүүрэгт хэт өндөр утга олон тохиолдож байгаа нь эдгээр дүүрэгт онцгой том барилгууд байгааг илтгэнэ.



2-р зураг. Дүүрэг тус бүрийн Q_{0_r} утгын box plot диаграмм

4. Орон зайн тархалтын шинжилгээ

Барилгуудын газарзүйн координатад суурилан дулааны ачааллын нягтшилын газрын зургийг MATLAB scatter функцээр боловсруулсан. Хотын төвийн дүүргүүд болох СБД, ЧД өндөр нягттай бөгөөд нэгж талбайд ногдох дулааны ачаалал их байна. Захын дүүргүүд болох СХД харьцангуй бага нягттай бөгөөд барилгуудын хоорондох зай их, жижиг барилга зонхилж байна.



3-р зураг. Дулааны ачааллын нягтшилын орон зайн газрын зураг

5. Нэгж барилгад ногдох дундаж ачааллын харьцуулалт

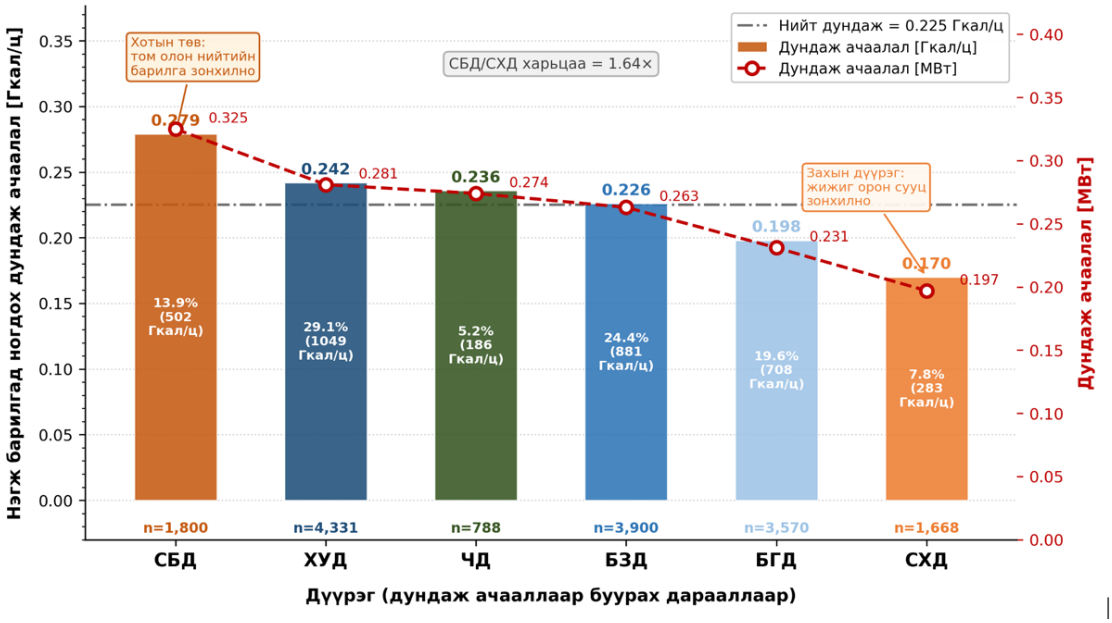
ДҮҮРЭГ ТУС БҮРИЙН НЭГЖ БАРИЛГАД НОГДОХ ДУНДАЖ ДУЛААНЫ АЧААЛАЛ

2-Р ХҮСНЭГТ.

Дүүрэг	Барилгын тоо	Нийт Q [Гкал/ц]	Дундаж Q [Гкал/ц]	Дундаж Q [МВт]
СБД	1,800	502.24	0.279	0.325
ХУД	4,331	1,049.21	0.242	0.282
ЧД	788	186.36	0.236	0.274
БЗД	3,900	880.90	0.226	0.263
БГД	3,570	708.06	0.198	0.231
СХД	1,668	282.90	0.170	0.197
НИЙТ	**16,057**	**3,609.66**	**0.225**	**0.262**

2-р хүснэгтээс харахад СБД нэгж барилгад ногдох дундаж ачаалал хамгийн өндөр (0.279 Гкал/ц = 0.325 МВт) бөгөөд энэ нь хотын төв дүүрэг учраас засгийн газрын байгууллага, худалдааны том төвүүд, зочид буудал зэрэг олон нийтийн том барилга магадлалтайгаар төвлөрсөнтэй холбоотой. СХД нь 0.170 Гкал/ц-ийн хамгийн бага дундажтай бөгөөд тус дүүрэгт жижиг орон сууцны барилга зонхилж байна.

СБД-д нэгж барилгын дундаж ачаалал өндөр (0.279 Гкал/ц) байгаа нь энэ дүүрэгт засгийн газрын байгууллага, зочид буудал, худалдааны том төвүүд зонхилдогтой холбоотой — ийм барилгуудад q_0 утга болон дулаацуулах нийт эзлэхүүн аль аль нь өндөр байдаг. Тухайлбал, 5 давхраас дээш нийтийн барилгын q_0 = 0.41–0.64 Вт/(м³·°C) нь орон сууцны барилгын 0.38–0.56 Вт/(м³·°C)-аас дээд утгаараа 14%-иар өндөр байдаг нь СБД-ийн дундаж ачааллыг нэмэгдүүлдэг гол шалтгаан болно. Харин СХД-ийн бага ачаалал (0.170 Гкал/ц) нь тус дүүрэгт 2000-иад оноос хойш баригдсан харьцангуй шинэ, хэмнэлттэй орон сууцны барилга зонхилдогтой нийцнэ — шинэ барилгад q_0 = 0.38–0.44 Вт/(м³·°C) гэж доод утгаар авдаг.



4-р зураг. Нэгж барилгад ногдох дундаж ачааллын харьцуулалт

6. Excel ба MATLAB тооцооллын аргуудын харьцуулалт

EXCEL БА MATLAB ТООЦООЛЛЫН АРГУУДЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

3-Р ХҮСНЭГТ.

Шалгуур үзүүлэлт	Excel	MATLAB	Давуу тал
Тооцооны зөрүү	Суурь утга	<0.1% зөрүү	Тэнцүү
Тооцооны хурд	> 20 минут	3–5 секунд	MATLAB
Өгөгдөл оруулах	Copy-paste	readtable() функц	Excel
Бүлэглэлт	SUMIFS, AVGIFS	groupsummary()	MATLAB
Визуализаци	Хязгаарлагдмал	scatter, heatmap, boxplot	MATLAB
Параметр солих	Гараар, удаан	Кодоор хялбар	MATLAB
Дахин ашиглах	Хүснэгтэд хамаарал	Скрипт дахин ажиллуулах	MATLAB
Өргөтгөх чадвар	Хязгаарлагдмал	Сая мөрийн өгөгдөл	MATLAB
Санах ойн ачаалал	Их (16k мөрт удаашрал)	Векторчилсан — хурдан	MATLAB
Хянах боломж	Нүд тус бүр	Код уншлагаар	Excel
Хэрэглэхэд хялбар	Маш хялбар	Програмчлал шаардана	Excel
Давуу тал	**Ойлгомжтой, хянах**	**Хурд, автоматжуулалт**	**Хослол**

3-р хүснэгтээс харахад тооцооны хугацааны хувьд хамгийн мэдэгдэхүйц ялгаа ажиглагдана: Excel дээр нийт барилгын өгөгдлийг бүлэглэн нэгтгэхэд 15–20 минут зарим тохиолдолд түүнээс их хугацаа зарцуулах бол MATLAB дээр бүхэн тооцоо хийх хугацаа 3–5 секунд байна. Инженерийн практикт хоёр аргыг хослуулан ашиглах нь зүйтэй ба Excel-ээр өгөгдөл бэлтгэж, баталгаажуулж, MATLAB-аар дэвшилтэт шинжилгээ, визуализаци хийх стратеги оновчтой юм.

Шинэ барилгуудын хувьд (2010-аас хойш баригдсан) q_0 утга харьцангуй бага бол хуучин барилгуудын хувьд q_0 илүү өндөр байдаг. EN 12831 [14] стандартын аргачлалтай харьцуулахад СНиП-ийн арга нь q_0-д суурилсан байгаа хэдий ч манай нөхцөлд хангалттай нарийвчлалтай, практикт өргөн хэрэглэгддэг.

Энэхүү суурь мэдээлэл нь Улаанбаатар хотын дулааны хангамжийн системийг ирээдүйн 4GDH систем рүү шилжүүлэх боломжийн судалгааны үндэс болно. Дулааны ачааллын орон зайн тархалт нь сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийг оновчтой байршуулах, бага температуртай дулааны сүлжээний хэсгийг тодорхойлоход ашиглагдана [5, 7]. Дулааны ачааллын орон зайн мэдээлэл нь дулааны сүлжээний гидравлик оновчлолд мөн шууд ашиглагдана.

V. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

1. Олон улсын судалгаатай харьцуулалт

Энэхүү судалгааны нийт дулааны ачааллын тооцооны үр дүнг олон улсын ижил төстэй судалгаатай харьцуулахад хэд хэдэн чухал ялгаа ажиглагдана. Данийн Heat Atlas [8] болон Heat Roadmap Europe [9] төслүүд нь барилгын түвшний GIS өгөгдөлд суурилан дулааны ачааллын нягтшлын зургийг боловсруулдгаараа энэхүү судалгаатай аргачлалын хувьд ижил суурьтай. Гэвч Скандинавын орнуудын хотуудтай харьцуулахад Улаанбаатарын дулааны ачааллын онцлог ялгаа нь дараах хүчин зүйлүүдээс үүдэлтэй байна.

Нэгдүгээрт, гадна агаарын тооцооны температур. Улаанбаатарын −39°C нь Скандинавын нийслэлүүдтэй (Осло −15°C, Хельсинки −22°C) харьцуулахад 1.8–2.6 дахин хүйтэн бөгөөд нэгж эзлэхүүнд ногдох дулаацуулгын ачааллыг

мэдэгдэхүйц нэмэгдүүлдэг. Тооцоогоор Улаанбаатарын барилгын дундаж дулааны ачаалал 0.225 Гкал/ц нь Heat Roadmap Europe-ийн дунд Европын хотуудын үзүүлэлтээс 1.4–1.7 дахин өндөр байгаа нь энэ нөхцөлтэй нийцнэ [9].

Хоёрдугаарт, барилгын хөгжлийн үе. Улаанбаатарын ТДХС-д холбогдсон барилгуудын дийлэнх нь 1960–1990-ээд онд баригдсан зөвлөлтийн үеийн дулааны тусгаарлалт сул барилгууд байгаа нь нийт ачааллын бүтцэт дулаацуулга 77.6% давамгайлахад шийдвэрлэх нөлөө үзүүлж байна. Харин Скандинавын орнуудад сүүлийн 20–30 жилд барилгын дулааны гүйцэтгэлийн стандарт ихсэж, энэ харьцаа 50–60% хүртэл буурсан байдаг [10].

Гуравдугаарт, хэрэгцээний халуун ус хангамжийн эзлэх хувь. Энэхүү судалгааны 20.6% нь Европын хотуудын 15–25%-ийн хүрээтэй нийцэж байгаа нь Монголын дулааны хангамжийн системийн ус халаалтын горим олон улсын хэм хэмжээтэй дүйцэж байгааг харуулна.

2. Тодорхойгүй байдлын үнэлгээ

GUM аргачлалаар тооцоолсон ±23%-ийн нийт тодорхойгүй байдал (95%-ийн найдвартай интервал) нь дулааны сүлжээний практик төлөвлөлтөд хэд хэдэн чухал үр дагавартай. Нийт 3,609.66 Гкал/ц-ийн ачааллыг ±23%-ийн хүрээнд авч үзэхэд бодит ачаалал 2,779–4,440 Гкал/ц хооронд байж болохыг харуулна. Энэ нь дулааны эх үүсвэрийн нөөц хүчин чадлыг тооцоолохдоо дор хаяж 23%-ийн нөөц (reserve capacity) заавал тусгах шаардлагатайг илэрхийлнэ. Тодорхойгүй байдлын зонхилох эх үүсвэр болох q_0 коэффициентын хүрээний алдаа (±12.5%) нь барилгын паспортжуулалт болон бодит дулааны хэрэглээний хэмжилтийн мэдээллийн санг баяжуулснаар мэдэгдэхүйц бууруулах боломжтой. Ирээдүйд ухаалаг дулааны тоолуурын өгөгдлийг ашиглан ±10–12% хүртэл бууруулж болзошгүй бөгөөд энэ нь 4GDH системийн оновчтой удирдлагад шийдвэрлэх ач холбогдолтой.

3. 4GDH шилжилт

Энэхүү судалгааны үр дүн нь Улаанбаатар хотын 4GDH рүү шилжих судалгааны суурь мэдээлэл болж чадна. Дүүрэг тус бүрийн дулааны ачааллын нягтшилын газрын зураг нь шугаман нягтралын шалгуурын дагуу 4GDH шилжилтэд тэргүүн ээлжид тохиромжтой бүс нутгийг тодорхойлоход шаардлагатай суурь мэдээлэл болно [6, 7]. Тухайлбал, СБД-ийн өндөр нягтшил (нэгж барилгад 0.279 Гкал/ц) нь нам температурын горимд (70/40°C буюу түүнээс доош) шилжих техникийн боломжтой бүс гэж урьдчилан үнэлэх үндэслэлийг бүрдүүлж байна. Мөн барилгуудын орон зайн тархалтын мэдээлэл нь дулааны хуримтлуурын (TES) байршлыг оновчтой тодорхойлох болон сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэр (нарны дулаан, дулааны насос)-ийн интеграцчлалын боломжийг дүгнэхэд шаардлагатай мэдээллийн суурь болж чадна [5].

4. Судалгааны хязгаарлалт ба цаашдын чиглэл

Арга зүйн хувьд гурван үндсэн хязгаарлалт оршиж байна. **Нэгдүгээрт,** бодит хэмжилтийн өгөгдлөөр тулган тохируулалт (calibration) хийгдээгүй. Одоогоор Улаанбаатарын ТДХС-ийн дэд станцын түвшний бодит дулаан хэрэглээний цуврал мэдээлэл нийтэд хүртээмжтэй байдаггүй тул барилга тус бүрийн тооцооны ачааллыг бодит хэмжилттэй тулгах боломж хязгаарлагдмал байсан. Цаашид ухаалаг дулааны тоолуурын өгөгдлийг нэгтгэсэн нарийвчилсан калибрацийн судалгаа зайлшгүй шаардлагатай. **Хоёрдугаарт,** статик оргил ачааллын загвар ашигласан нь дулааны хуримтлал болон цаг хугацааны өөрчлөлтийг тооцоогүй гэсэн үг юм. NASA POWER цаг уурын цуврал өгөгдлөөр нэмэгдүүлсэн EnergyPlus-д суурилсан динамик загварчлалаар энэ хязгаарлалтыг нөхөх боломжтой. **Гуравдугаарт,** EN 12831 [14] стандарттай барилга тус бүрийн нарийвчилсан харьцуулалт хийгдээгүй нь энэхүү судалгааны загварын инженерийн баталгаажилтыг хязгаарлаж байна — гэхдээ ±23%-ийн тодорхойгүй байдлын тооцоо нь энэ хязгаарлалтын тоон хэмжүүр болж байна.

VI. ХЯЗГААРЛАЛТ БА АЛДААНЫ ҮНЭЛГЭЭ

1. Алдааны тархалтын шинжилгээ (Uncertainty Propagation)

Энэхүү судалгааны дулааны ачааллын тооцооны алдааг ISO/IEC 98-3:2008 буюу GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) аргачлалын дагуу үнэлсэн. Тооцоонд орох параметрүүдийн тодорхойгүй байдал нь томьёогоор нэгдсэн байдлаар дамждаг тул олон хувьсагчийн алдааны тархалтыг квадратын язгуурын нийлбэрийн (RSS) аргаар тооцоолов.

$Q_{дул} = q_o \cdot V \cdot \Delta t$ томьёоны харьцангуй стандарт тодорхойгүй байдлыг хэсэгчилсэн уламжлалын аргаар тооцвол:

$$u_{rel}(Q_{дул}) = \sqrt{[u_{rel}(q_0)^2 + u_{rel}(V)^2 + u_{rel}(\Delta t)^2]} \quad (5)$$

Энд: $u_{rel}(q_0)$ = ±12.5% — хүснэгтийн утгын хүрээ болон барилгын ангилалд хамаарах сонголтын алдаа; u_{rel} (V)=±6.5% — GIS-KML форматын геомэдээллийн хэмжилтийн алдаа (2D гадаргын проекцоос 3D эзлэхүүн тооцоолоход үүсэх систематик алдаа); $u_{rel}(\Delta t)$ = ±2°C / 57°C ≈ ±3.5% — Улаанбаатар хотын цаг агаарын тооцооны температурын хэмжилтийн тодорхойгүй байдал. Иймд $u_{rel}(Q_{дул})$ = √(12.5² + 6.5² + 3.5²) = ±14.5% (k=1, 68%), буюу U($Q_{дул}$)=±29.0% (k=2, 95%-ийн найдвартай интервал).

$Q_{аг}$ томьёонд агааржуулалтын эрчим n-ийн тодорхойгүй байдал (±17.5%) зонхилж, $u_{rel}(Q_{аг})$ = ±19.0% (k=1) болно. Гэхдээ $Q_{аг}$ нийт ачааллын зөвхөн 1.8%-ийг эзэлдэг тул нийт алдаанд оруулах хувь нөлөөлөл бага болно. Q_{XXY}-ийн хувьд хэрэглэгчийн хэрэглээний тодорхойгүй байдал (m: ±10%, a: ±8%) зонхилж, $u_{rel}(Q_{XXY})$ = ±13.4% (k=1) болно.

ДУЛААНЫ АЧААЛЛЫН ТООЦООНЫ АЛДААНЫ ЭХ ҮҮСВЭРИЙН НЭГДСЭН ҮНЭЛГЭЭ

4-Р ХҮСНЭГТ.

Ачааллын төрөл	Алдааны эх үүсвэр	u_rel(q₀/m)	u_rel(V)	u_rel(Δt)	u_rel (k=1, 68%)	U (k=2, 95%)
$Q_{хал}$	q_0	±12.5%	±6.5%	±3.5%	±14.5%	±29.0%
$Q_{аг}$	n (агааржуулалт)	—	±6.5%	±3.5%	±19.0%	±38.0%
$Q_{ХХУ}$	m, a (хэрэглээ)	—	—	±4.0%	±13.4%	±26.8%
$Q_{нийт}$	**Нэгдсэн (RSS)**	**—**	**—**	**—**	**±11.6%**	**±23% (±838 Гкал/ц)**

u_{rel} — харьцангуй стандарт тодорхойгүй байдал (k=1, 68%); U — өргөтгөсөн тодорхойгүй байдал (k=2, 95%). Нийт алдааг RSS аргаар тооцоолов.

$$u_{rel}(Q_{нийт}) = \sqrt{[(2800.18\times0.145)^2 + (65.31\times0.190)^2 + (744.17\times0.134)^2]} / 3609.66 = \pm11.6\%.$$

Нийт дулааны ачааллын үнэлгээний эцсийн үр дүн 95%-ийн найдвартай интервалтайгаар дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$Q_{нийт} = 3,609.66 \pm 838 \text{ Гкал/ц (95\%), буюу } 4,198 \pm 974 \text{ МВт.}$$

Энэ нь ±23%-ийн харьцангуй тодорхойгүй байдалтай тохирч, GIS-суурилсан хялбаршуулсан аргачлалын хувьд олон улсын зөвшөөрөгдсөн ±15–30%-ийн хэмжээнд байна [15, 13].

Excel ба MATLAB программаар тооцооллын хоёр аргын тооцооны зөрүү <0.1% (<3.6 Гкал/ц) байгаа нь нийт тодорхойгүй байдлын зөвхөн 0.9%-ийг бүрдүүлж байгаа тул программчлалын техникийн алдаа нийт алдаанд мэдэгдэхүйц нөлөөлөхгүй гэж дүгнэнэ.

2. Аргачлалын хязгаарлалт

Энэхүү судалгааны арга зүй нь дараах таван үндсэн хязгаарлалттай:

1. Статик тооцооны загвар: Тооцоолол нь тооцооны гадна температурт (-39°C) харгалзах оргил ачааллыг тооцдог бөгөөд барилгын дулааны хуримтлал, хэрэглэгчийн зан байдлын цаг хугацааны хэлбэлзэл, дулааны алдагдлын динамик өөрчлөлтийг тооцоогүй. Иймд тооцоолсон утга нь жилийн дундаж ачааллаас 15–25%-иар өндөр байж болзошгүй.

2. q_0 коэффициентын хялбаршуулалт: Хүснэгтийн утгыг ашигласан тул бодит барилга бүрийн дулаалгын чанар, ханын нэвтрэлтийн тоо зэрэг бодит параметрүүдийг тооцоогүй. EN 12831 стандартын нарийвчилсан аргатай харьцуулахад энэ хялбаршуулалт нийт алдааны гол шалтгаан болж байна.

3. Гэр хороолол болон бие даасан систем: ТДХС-д холбогдоогүй гэр хороолол болон бие даасан халаалтын системтэй барилгуудыг судалгааны хамрах хүрээнд оруулаагүй. Тиймээс тооцооны үр дүн нь Улаанбаатар хотын нийт дулааны хэрэглээний бус, ТДХС-ийн хэрэглэгчдийн ачааллыг илэрхийлнэ.

4. Хэрэгцээний халуун усны загварчлал: $Q_{ХХУ}$ тооцоонд хэрэглэгчийн дундаж зарцуулалт m болон жигд бус байдлын коэффициент a-ийн нэгдсэн утгыг ашигласан. Бодит хэрэглэгчийн зан байдлын хэлбэлзэл, улирлын өөрчлөлт, барилгын зориулалтаас хамаарсан ялгааг нарийвчлан тооцоогүй.

5. Ирээдүйн өөрчлөлтүүд: Тооцоо нь одоогийн барилгын нөхцөлд үндэслэсэн бөгөөд цаашид барилгын дулаалгын сайжруулалт, нэмэлт барилгын баригдалт, хүн амын нүүдэл, хотжилтын өөрчлөлт зэрэг хүчин зүйлийг тооцоогүй. Иймд тооцооны үр дүнг 2030 ба 2040 оны төлөвлөлтийн үзүүлэлт болгон ашиглахад холбогдох нэмэлт тодотгол шаардлагатай.

VII. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар Улаанбаатар хотын ТДХС-д холбогдсон нийт барилгын дулааны ачааллыг Excel ба MATLAB ашиглан тооцоолж, дараах үр дүнд хүрсэн.

Нэгдүгээрт, нийт дулааны ачаалал 3,609.66 Гкал/ц байгаагаас дулаацуулгын ачаалал 77.6%, хэрэгцээний халуун ус хангамж 20.6%, агааржуулалт 1.8%-ийг тус тус эзэлж байна.

Хоёрдугаарт, дүүргүүдийн дулааны ачааллын тархалт жигд бус бөгөөд ХУД (29.1%), БЗД (24.4%), БГД (19.6%) нийт ачааллын 73.1%-ийг эзэлж байна. СБД нэгж барилгад ногдох дундаж ачааллаар хамгийн өндөр (0.279 Гкал/ц) байна.

Гуравдугаарт, Excel ба MATLAB тооцооны үр дүн бүрэн нийцсэн (<0.1% зөрүү). MATLAB нь хурд, визуализаци, өргөтгөх зэрэгт давуу талуудтай бол Excel нь өгөгдөл бэлтгэх, хянахад тохиромжтой.

Дөрөвдүгээрт, дулааны ачааллын орон зайн тархалтын газрын зураг нь хотын дулааны нягтшилын бүсүүдийг тодорхой харуулж, цаашид хийгдэх сүлжээний оновчлол, 4GDH шилжилтийн суурь мэдээлэл болж байна. Судалгаа нь оргил ачааллын статик загвар ашигласан, гэр хороолол болон ТДХС-д холбогдоогүй барилгуудыг хамраагүй гэсэн хязгаарлалттай тул цаашдын судалгаанд нэмж тооцох шаардлагатай.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Улаанбаатар хотын дулаан хангамжийн мастер төлөвлөгөө, УБДС ТӨХК, 2019.

[2] Б. Энхжаргал, "Улаанбаатар хотын төвлөрсөн дулааны хангамжийн системийн одоогийн байдал ба хөгжлийн чиг хандлага," Эрчим хүчний салбарын ЭШ хурал, 2022, хуу 65-70.

[3] МНС 4601:2016, "Барилга байгууламжийн дулааны техник. Тооцооны арга," Стандарт, хэмжил зүйн газар, Улаанбаатар, 2016.

[4] СНиП 2.04.07-86*, "Тепловые сети. Нормы проектирования," Госстрой СССР, Москва, 1986 (2003 оны нэмэлт өөрчлөлттэй).

[5] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire et al., "4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems," Energy, vol. 68, pp. 1–11, 2014.

[6] H. Lund, P.A. Østergaard, M. Chang et al., "The status of 4th generation district heating: Research and results," Energy, vol. 164, pp. 147–159, 2018.

[7] S. Werner, "International review of district heating and cooling," Energy, vol. 137, pp. 617–631, 2017.

[8] B. Möller and H. Lund, "Conversion of individual natural gas to district heating: Geographical studies of supply costs and consequences for the Danish energy system," Applied Energy, vol. 87, no. 6, pp. 1846–1857, 2010.

[9] D. Connolly, H. Lund, B.V. Mathiesen et al., "Heat Roadmap Europe: Combining district heating with heat savings to decarbonise the EU energy system," Energy Policy, vol. 65, pp. 475–489, 2014.

[10] U. Persson and S. Werner, "Heat distribution and the future competitiveness of district heating," Applied Energy, vol. 88, no. 3, pp. 568–576, 2011.

[11] D. Connolly, H. Lund, B.V. Mathiesen, "Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 60, pp. 1634–1653, 2016.

[12] MathWorks Inc., "MATLAB Documentation: Data Analysis and Visualization," 2024. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/matlab/.

[13] ISO/IEC Guide 98-3:2008, "Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)," International Organization for Standardization, Geneva, 2008.

[14] EN 12831:2003, "Heating systems in buildings – Method for calculation of the design heat load," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2003.

[15] S. Frederiksen and S. Werner, District Heating and Cooling, 1st ed., Studentlitteratur AB, Lund, Sweden, 2013.

[16] Улаанбаатар хотын Засаг даргын Тамгын газар, Хот байгуулалтын газар, "Барилгын кадастрын мэдээллийн сан," 2023–2024 оны тайлан, Улаанбаатар, Монгол улс.

[17] Улаанбаатарын Дулаан УСУГ, "ТДХС-д холбогдсон барилгын техникийн мэдээллийн сан," 2023 он, Улаанбаатар, Монгол улс.

ЭСРЭГ ОСМОСЫН МЕМБРАН ДАХЬ ХАГЖИЛТЫГ ОЭДФ ХҮЧЛИЙН БОСГО УТГААР ОНОВЧЛОХ АСУУДАЛ

Даваасүрэнгийн АНУДАРЬ[1], Батсүхийн ОЮУНСУВД[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Дулааны цахилгаан станцын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: anudari.d@must.edu.mn[1], oyunsuvd@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Эрдэнэтийн ДЦС-ын ус бэлтгэлийн системд ашиглагдаж буй эсрэг осмосын төхөөрөмжийн мембран элементийн гадаргууд эрдэсжилтийн тунадас буюу хаг тогтох нь системийн ашигт үйлийн коэффициентыг бууруулж, ашиглалтын зардлыг нэмэгдүүлж буй гол хүчин зүйл болж байна. Одоо ашиглаж буй хаг хурдас эсэргүүцэх оксиэтилидендифосфон (ОЭДФ-)ы хүчлийн тун 5 гр/ц байгаа нь хагжилтын кинетик процессыг дарангуйлахад хангалтгүй байна. Иймээс түүхий усны химийн найрлагад үндэслэн ОЭДФ хүчлийн тунгийн босго утгыг ашиглан хагжилтыг хянах технологийн оновчтой горимыг тогтоож, техник-эдийн засгийн үр ашгийг тодорхойлсон. Судалгаагаар ОЭДФ-ийн тунг 0.1 мг/л болгон нэмэгдүүлснээр хаг үүсэх процессыг 95-98% дарангуйлах боломжтойг батлав. Технологийн оновчлолын үр дүнд мембраны ашиглалтын хугацаа 1.5 жилээс 3.5 жил хүртэл уртасч, мембран солих зардлаас 61.7 сая төгрөгийг шууд хэмнэх боломжтойг тогтоов.**

Түлхүүр үг: Эсрэг осмос, ОЭДФ хүчил, Ланжелийн хагжилтын индекс, босго утга

I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд ДЦС-ын зуухны тэжээлийн нэмэлт усыг боловсруулахад эсрэг осмосын (ЭО) технологийг өргөн хэрэглэх болсон [1-3]. Энэхүү технологи нь химийн хортой бодис ашиглахгүйгээр усыг гүн давсгүйжүүлэх боломжтой боловч түүний мембраны гадаргуу дээр хэт ханасан уусмалаас шалтгаалж кальци, магни болон цахиур хүчлийн давс тунаж хаг үүсгэн төхөөрөмжийн ажиллагаанд хүндрэл учруулж байна [1-12].

Эсрэг осмосын ажиллагааны явцад цэвэршсэн ус мембранаар нэвчин гарах үед ууссан бодисууд концентрацлагддаг. Концентратын ханалтын зэрэг нь бохирдол үүсгэдэггүй бодисуудын концентрацийн циклээр илэрхийлэгддэг бөгөөд энэхүү цикл өндөр байх үед муу уусдаг давснууд хаг хурдас үүсгэх хандлага эрс нэмэгддэг [2]. Органик бус бохирдол буюу хагжилт нь ЭО давсгүйжүүлэх процесст зайлшгүй тохиолддог бөгөөд энэ нь мембраны шүүх чадварыг бууруулж, мембраныг илүү ойр ойрхон цэвэрлэх эсвэл солих шаардлагыг үүсгэн, улмаар усны гарцыг багасгаж, зардлыг нэмэгдүүлдэг сөрөг нөлөөтэй үзэгдэл юм [3]. Мембран элементийн гадаргуу дээрх хагжилтыг хянах хамгийн үр дүнтэй арга нь хаг хурдас эсэргүүцэх антискалантыг оновчтой тунгаар, тасралтгүй тунлах явдал байдаг [2, 4-6]. Антискалант нь эсрэг осмосын давсгүйжүүлэх процесст өргөн хэрэглэгддэг ус боловсруулалтын бодисуудын нэг бөгөөд хелат үүсгэх, дисперсийн үзэгдэл, талстын бүтцийн эвдрэл, босго нөлөө зэрэг механизмд тулгуурлан хаг үүсэлтийг сааруулдаг ба үүний үр дүнд мембраны хагжилтыг бууруулж, мембраны шүүх чадварыг сайжруулдаг [3-5]. ЭО системд ашиглагддаг 100 гаруй төрлийн антискалант бодис байдаг ба хэрэглэгчид тухайн усны нөхцөлд тохирсон, өндөр үр ашигтай антискалант бодисыг сонгон хэрэглэх шаардлагатай [2, 6]. Энэхүү сонголтыг харьцуулсан туршилтад үндэслэн хийх бөгөөд ижил усны нөхцөлд өөр өөр антискалантуудын хаг үүсэлтийг дарангуйлах үр нөлөөг туршиж, гүйцэтгэлд нь тулгуурлан тохиромжтой бодисыг сонгон авна [2]. Иймээс антискалант бодисыг үнэлэхэд ашиглагддаг аргуудыг судлах нь практик ач холбогдолтой бөгөөд эдгээр аргууд нь эсрэг осмосын системийн ажиллагаанд үүсэх асуудлыг оношлох, шийдвэрлэхэд чухал үүрэг гүйцэтгэдэг [2-6].

Бодит нөхцөлд антискалант хэрэглэсэн ч хаг хуримтлалыг бүрэн зогсоох боломжгүй тул мембраны бохирдсон хэсгүүдийг цэвэрлэхийн тулд механик болон химийн цэвэрлэгээг ихэвчлэн хэрэглэдэг [3, 7-8]. Иймээс хагжилтын үзэгдэл үүсэх магадлалыг урьдчилан таамаглах боломж нь чухал хүчин зүйл болдог. Кальцийн карбонатын мембраныг бохирдуулах хандлагыг үнэлэхэд Ланжелийн индексийг ашигладаг.

Эсрэг осмосын процессийн үед мембран дээр тунадас хуримтлагдах магадлалыг урьдчилан таамаглахын тулд эмпирик тэгшитгэл болон тоон загварчлалын аргуудыг ашигладаг [3, 9]. Эмпирик томъёог ашигласнаар ус боловсруулах процессын үед мембраны гадаргуу дээр үүсэж болох чиг хандлагыг ойролцоогоор үнэлэх боломжтой бол тоон загварчлал ашиглах нь тунадас үүсэх үзэгдлийг илүү нарийвчлалтай урьдчилан таамаглах боломжийг олгодог [9].

Эрдэнэтийн ДЦС-ийн хими цех нь оксиэтилидендифосфоны (ОЭДФ) хүчлийг хаг хурдас эсэргүүцэх бодис болгон ашигладаг. Хаг хурдас эсэргүүцэх бодисын босго нөлөө гэдэг нь хаг үүсгэгч ионуудын (Ca^{2+}, Mg^{2+}) концентрацитай харьцуулахад маш бага тунтай (стехиометрийн бус) бодис нь хэт ханасан уусмалаас талст тунаж, тунах процессыг зогсоох эсвэл үлэмж хэмжээгээр саатуулах үзэгдлийг хэлнэ [10-11]. Ердийн химийн урвалд бодисууд тодорхой харьцаагаар нэгдэж тунадас үүсгэдэг бол босго нөлөөний үед 1 молекул ОЭДФ хүчил нь хэдэн мянган кальцийн ионыг уусмал дотор барьж, талст болж бөөгнөрөхөөс нь

сэргийлдэг. Хаг хурдас эсэргүүцэх бодис ОЭДФ-ийн молекул нь талстжилтын процессыг дараах гурван үе шаттайгаар дарангуйлдаг:

Талстын бөөмийг саатуулах:

Хэт ханасан уусмалд ионууд хоорондоо нэгдэж бичил бөөм үүсгэх үед ОЭДФ-ийн молекулууд тэдгээрийн идэвхтэй цэгүүд дээр адсорбцилогдож, дараагийн ионууд нэгдэх замыг хаадаг [12].

$[Ca^{2+}]$ + $[CO_3^{2-}]$ ОЭДФ Тогтворжсон ион

Талстын бүтцийн эвдрэл

Хэрэв талст үүсэж эхэлбэл ОЭДФ бодис талстын өсөлтийн ирмэг дээр бэхлэгдэж, түүний ердийн геометрийн бүтцийг эвддэг. Ингэснээр талст нь бат бөх бус, жигд бус хэлбэртэй болж, мембраны гадаргуу дээр наалдах чадваргүй болдог [2,4].

Комплекс үүсгэх:

ОЭДФ-ийн найрлага дахь фосфоны бүлгүүд нь металлын ионуудтай бат бөх комплекс нэгдэл үүсгэдэг. Кальцийн ионтой дараах байдлаар харилцан үйлчлэлд орно [5].

$$C_2H_8O_7P_2 + Ca^{2+} \leftrightarrow [Ca \cdot C_2H_6O_7P_2]^2 + 2H^+$$

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Судалгааны ажилд Эрдэнэтийн ДЦС-ын ус бэлтгэлийн хэсгийн 2025 оны бодит өгөгдөл, түүхий усны химийн шинжилгээний үр дүнг ашиглав. Энэхүү судалгааны ажлын арга зүй нь ДЦС-ын эсрэг осмосын системийн ажиллагааны бодит өгөгдөлд дүн шинжилгээ хийх, ОЭДФ бодисын тунг оновчлох гэсэн үндсэн үе шатаас бүрдэнэ.

1. Өгөгдөл цуглуулах ба дүн шинжилгээний арга

Түүхий усны ерөнхий шинжилгээний дүн болон техникийн үзүүлэлтүүдийг 1 ба 2-р хүснэгтүүдэд тус тус үзүүлэв.

ТҮҮХИЙ УСНЫ ЕРӨНХИЙ ШИНЖИЛГЭЭ

1-Р ХҮСНЭГТ

Сар	Ерөнхий хатуулаг, мг-экв/л	Кальцийн хатуулаг, мг-экв/л	Ерөнхий шүлтлэг мг-экв/л,	Давслаг, мг/л	pH
01	3.79	3.039	2.73	260.87	6.38
02	4.09	3.28	3.8	287.62	6.27
03	4.32	3.464	2.86	291.33	6.3
04	4.48	3.59	2.86	302.5	6.35
05	4.76	3.82	2.99	303.2	6.49
06	3.95	3.17	2.9	255.06	6.49
07	4.43	3.55	2.86	280.0	6.48
08	4.54	3.64	3.02	309.58	6.78
09	4.41	3.54	3.12	316.0	6.8
10	4.38	3.51	3.08	243.8	6.74
11	4.35	3.49	2.98	248	6.4
12	4.45	3.57	2.99	275	6.5

ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Тэмдэглэгээ	Нэгж	Хэмжээ
Орох усны зарцуулалт	Q	тн/ц	110
Пермеат (цэвэр ус)	$Q_б$	тн/ц	80
Концентрат (хаягдал ус)	$Q_х$	тн/ц	30
Боловсруулсан ус	Y	%	72.7
ОЭДФ хүчлийн одоогийн тунлалт	D	мг/л	0.045

2. Концентрацийн туйлшрал ба хагжилтын индекс тооцох арга

Мембраны гадаргуу дээрх ионы концентрацийн туйлшралыг тодорхойлохдоо экспоненциал хамаарлын аргыг ашиглав [13-15].

1. Туйлшралын коэффициент β:

$$\beta = exp\ (0.7 \cdot Y) \quad (1)$$

Дээрх томьёогоор мембран гадаргуу дээрх концентрацийн өсөлтийг тооцсон.

2. Бодит концентраци (Cm):

$$c_m = \beta \cdot c_i \quad (2)$$

Түүхий усны ионы агууламжийг β коэффициентоор үржүүлж, мембран дээрх хаг үүсэх бодит нөхцөлийг тогтоосон.

3. Ланжелийн хагжилтын индекс (LSI):

Хаг тогтох термодинамик магадлалыг үнэлэхдээ PHREEQC программ болон эмпирик тэгшитгэлүүдийг ашиглав. Мембран гадаргуу дээрх pH, температур болон кальцийн агууламжид тулгуурлан хаг тогтоох термодинамик магадлалыг дараах томьёогоор үнэлнэ [16].

$$LSI_m = pH - pH_s \quad (3)$$

Энд: pH — бодит pH

pH_s — $CaCO_3$-ийн ханалтын pH

3. ОЭДФ бодисын босго утга-г оновчлох арга зүй

Антискалантын тунг оновчлохдоо босго утга болон талстын бүтцийн эвдрэл гэсэн онолын механизмуудыг ашиглан хяналтын ба оновчлох аргыг боловсруулав. Одоогийн ашиглаж буй 5 гр/ц (0.045 мг/л) тунг суурь утга болгон авч, даралтын уналт болон нэвчилтийн өөрчлөлтийг ажиглах замаар хяналт хийв. Хагжилтын идэвхийг 95%-иас дээш дарангуйлах 0.1 мг/л тунг онолын тооцооллоор тогтоож, системийн термодинамик тогтворжилтыг хангах тунлалтын загварыг боловсруулсан.

III. ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

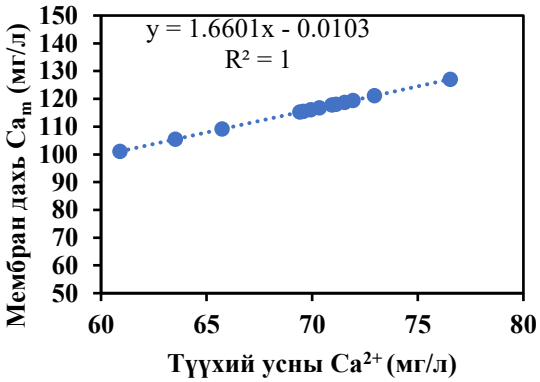
Эрдэнэтийн ДЦС-ын 2025 оны түүхий усны шинжилгээний бодит өгөгдөл болон өгөгдөл (Y=72.7%, β=1.66) дээр тулгуурлан концентрацийн туйлшрал болон Ланжелийн хагжилтын индексийг тооцож, 3-р хүснэгтэд үзүүлэв.

ЛАНЖЕЛИЙН ХАГЖИЛТЫН ИНДЕКС

3-Р ХҮСНЭГТ

Сар	Түүхий усны Ca^{2+} (мг/л)	Мембран дахь Ca_m (мг/л)*	Түүхий усны LSI_b	Мембраны LSI_m	Хагжилтын эрсдэл
01	60.9	101.09	-0.32	0.98	Дунд
02	65.73	109.11	-0.18	1.12	Өндөр
03	69.42	115.24	-0.12	1.18	Өндөр
04	71.94	119.42	-0.05	1.25	Маш өндөр
05	76.55	127.07	0.12	1.42	Маш өндөр
06	63.53	105.46	-0.15	1.15	Өндөр
07	71.14	118.09	0.02	1.32	Маш өндөр
08	72.95	121.1	0.25	1.55	Маш өндөр
09	70.94	117.76	0.18	1.48	Маш өндөр
10	70.34	116.76	0.1	1.4	Маш өндөр
11	69.94	116.1	-0.08	1.22	Өндөр
12	71.54	118.76	-0.02	1.28	Маш өндөр
Дундаж	69.58	115.5	-0.02	1.28	Шохойлогхагжилтын бүс

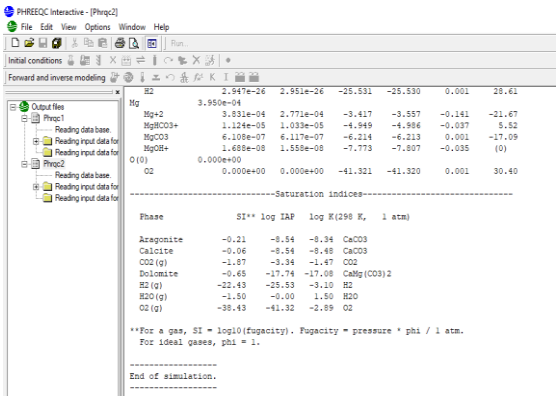
2-р хүснэгтээс харахад түүхий усны кальцийн агууламж дунджаар 69.58 мг/л байгаа боловч мембраны гадаргуу дээр туйлшралын нөлөөгөөр 115.50 мг/л болж огцом өсөж байна. Энэ нь хагжилтын кинетик процессыг эрчимжүүлэх үндсэн шалтгаан болж байна. Түүхий усны Ланжелийн хагжилтын индекс дунджаар -0.02 (тогтвортой шахуу) байгаа боловч мембран дээр +1.28 болж өөрчлөгдсөн нь систем хэт ханасан төлөвт шилжиж, талст аяндаа тунах термодинамик нөхцөл бүрдсэнийг баталж байна.



1-р зураг. Түүхий усны кальцийн агууламж ба мембран гадаргуу дахь бодит кальцийн концентрацийн хамаарал

График дээрх шугамын тэгшитгэл нь $y = 1.6601x - 0.0103$ байна. Үүнээс харахад өмнө тооцоолсон концентрацийн туйлшралын коэффициент буюу $\beta = 1.66$ гэсэн утгатай нийцэж байна.

PHREEQC программ нь янз бүрийн гидрогеохимийн процессуудыг тооцоолох зорилгоор ашиглагддаг [3, 17-18]. Ланжелийн хагжилтын индексийг энэхүү программаар тооцоолоход түүхий усны $LSI_b = -0.06$, мембраны $LSI_m = 1.09$ гарч байгаа нь мембраны хэсэгт кальцийн карбонатын хагжилт үүсэх хандлага илүү өндөр байгааг харуулж байна.



2-р зураг. PHREEQC программ дээр түүхий усны Ланжелийн хагжилтын индексийг тооцсон симуляцийн үр дүн

Хаг хурдас үүсэх үзэгдэл үүсэх магадлалыг үнэлэхийн тулд антискалант нэмсэн усны физик-химийн шинжилгээний үр дүнг PHREEQC программд оролтын параметр болгон ашигласан бөгөөд эдгээрийг SOLUTION_SPECIES хэсэгт оруулсан болно.

Хаг үүсэх эрсдэлийг дараах томьёогоор үнэлнэ [19, 20]:

$$SI = \log\left(\frac{IAP}{K_{sp}}\right) \quad (4)$$

Энд: IAP — Усан дахь ионуудын идэвхтэй концентрацийн үржвэр;

K_{sp}— Тухайн температурт тунадас үүсэх онолын хязгаар.

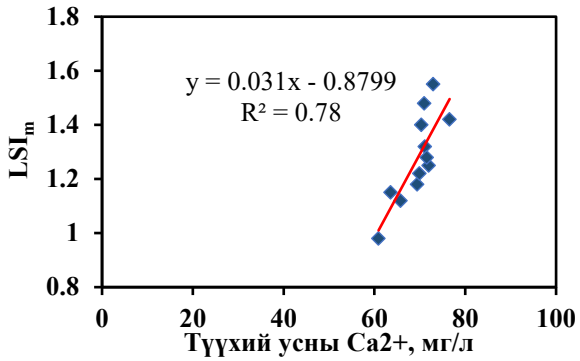
Тооцооллын үр дүнд антискалант нэмээгүй үед $SI = 1.68$ гарч байгаа нь мембран хаг хурдас үүсэх эрсдэл өндөр байгааг харуулж байна.

Phase	SI**	log IAP	log K(298 K, 1 atm)	
Aragonite	1.53	-6.80	-8.34	CaCO3
Calcite	1.68	-6.80	-8.48	CaCO3
CH4(g)	-18.63	-21.43	-2.80	CH4
CO2(g)	-0.85	-2.32	-1.47	CO2
Dolomite	2.59	-14.49	-17.08	CaMg(CO3)2
H2(g)	-10.92	-14.03	-3.10	H2
H2O(g)	-1.50	-0.00	1.50	H2O
O2(g)	-61.44	-64.33	-2.89	O2

3-р зураг. PHREEQC программын хаг үүсэх эрсдэлийг тооцсон симуляцийн үр дүн

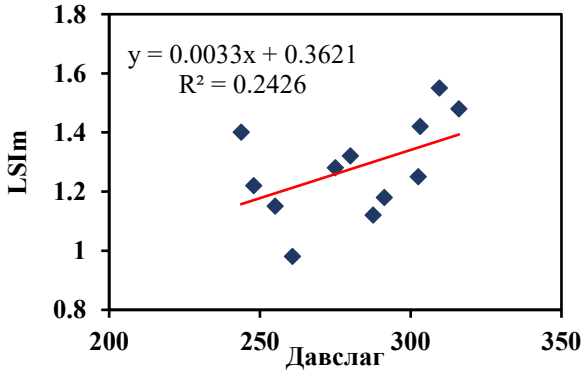
Антискаланттай үед энэхүү программ нь effective гэж тодорхойлж байгаа нь хаг үүсэх нөхцөл байгаа хэдий ч тунадасжихгүй гэдгийг харуулж байна.

1-3-р хүснэгтүүдийн өгөгдлийг ашиглан үзүүлэлтүүдийн хоорондын хамаарлыг шугаман регрессийн аргаар шинжилсэн үр дүнг 4-6-р зурагт харуулав.



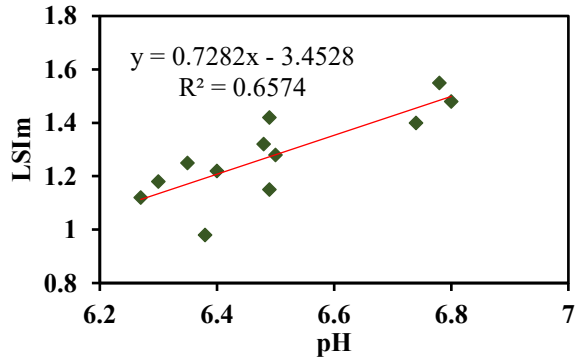
4-р зураг. Ланжелийн хагжилтын индекс болон түүхий усны кальцийн агууламжийн корреляцийн хамаарал

4-р зургаас харахад $R^2 = 0.66$ гарсан ба Ланжелийн хагжилтын индексийн өөрчлөлтийн 66% нь түүхий усанд агуулагдах кальцийн агууламжаас хамаардаг болохыг илэрхийлж байна. Корреляциийн коэффициент $r = 0.82$ гарсан ба энэ нь дээрх 2 үзүүлэлт хоорондоо хүчтэй эерэг хамааралтай болохыг харуулж байна.



5-р зураг. Ланжелийн хагжилтын индекс болон түүхий усны давслагийн агууламжийн корреляцийн хамаарал

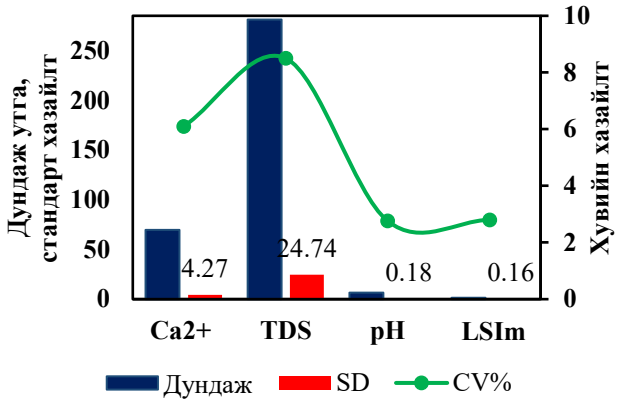
5-р зургаас харахад дээрх 2 үзүүлэлтүүд нь эерэг хамааралтай боловч хагжилтын индексийн 24.2% нь л түүхий усанд агуулагдах давслагийн хэмжээтэй холбоотой болох нь харагдаж байна.



6-р зураг. Ланжелийн хагжилтын индекс болон түүхий усны pH-ийн корреляцийн хамаарал

6-р зургаас харахад мембранд хаг үүсэхэд түүхий усанд агуулагдах кальцийн агууламж болон pH-ийн утга хоёул ижил хэмжээний нөлөө үзүүлдэг болох нь харагдаж байна.

Судалгааны үндсэн үзүүлэлтүүдийн статистик тархалтыг 7-р зурагт харуулав.



7-р зураг. Үзүүлэлтүүдийн дундаж, стандарт хазайлт болон хувийн хазайлтын харьцуулал.

7-р зургаас харахад кальцийн агууламжийн стандарт хазайлт $SD = 4.27$ байгаа нь усны эх үүсвэрийн найрлага харьцангуй тогтвортой байгааг илтгэх байна. Бүх үзүүлэлтүүдийн хувийн хазайлт 20%-иас бага байгаа тул өгөгдлийг найдвартай гэж үзэж болно.

Одоогийн ОЭДФ бодисын тун 5 гр/ц буюу 0.045 мг/л байгааг 0.1 мг/л болтол нэмэгдүүлэхэд хаг эсэргүүцэх бодисын үр ашиг хэрхэн өөрчлөгдөхийг дараах үндсэн томьёогоор тооцоолон үр дүнг 4-р хүснэгтэд үзүүлэв [18].

$$I = \frac{[Ca^{2+}]tr - [Ca^{2+}]untr}{[Ca^{2+}]total - [Ca^{2+}]untr} \cdot 100\% \qquad (5)$$

Энд: I — Хагжилтыг сааруулах идэвх (%);

$[Ca^{2+}]tr$ — Антискалант тунласны дараах уусмал дахь кальцийн ионы концентраци;

$[Ca^{2+}]untr$ — Антискалантгүй үед тунадас үүссэний дараах уусмал дахь кальцийн ионы концентраци;

$[Ca^{2+}]total$ — эхэн үеийн уусмал дахь кальцийн ионы нийт концентраци.

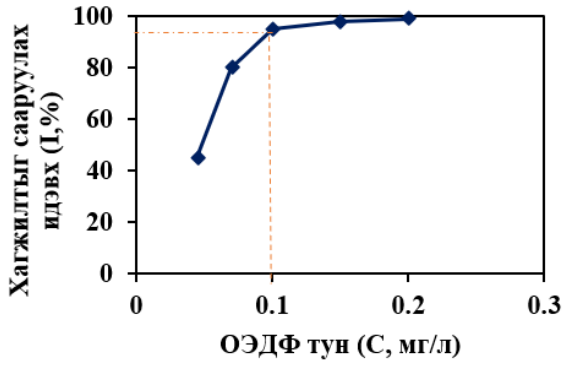
ХАГ ЭСЭРГҮҮЦЭХ БОДИСЫН ҮР АШИГ

4-Р ХҮСНЭГТ

Сар	Мембран дахь Ca^{2+} (мг/л)	Одоогийн ОЭДФ тун (0.045 мг/л) Идэвх (I,%)	Оновчилсон ОЭДФ тун (0.1 мг/л) Идэвх (I,%)	Идэвхийн зөрүү (ΔI,%)
01	101.09	48.2	96.5	48.3
02	109.11	46.5	95.8	49.3
03	115.24	45.1	95.2	50.1
04	119.42	44.3	94.8	50.5
05	127.07	42.8	94.1	51.3
06	105.46	47.3	96.1	48.8
07	118.09	44.5	94.9	50.4
08	121.1	43.9	94.6	50.7
09	117.76	44.6	95.0	50.4

Сар	Мембран дахь Ca^{2+} (мг/л)	Одоогийн ОЭДФ тун (0.045 мг/л) Идэвх (I,%)	Оновчилсон ОЭДФ тун (0.1 мг/л) Идэвх (I,%)	Идэвхийн зөрүү (ΔI,%)
10	116.76	44.8	95.1	50.3
11	116.1	45.00	95.2	50.2
12	118.76	44.4	94.9	50.5
Дун даж	115.5	44.7	95.2	50.5

Хагжилтыг сааруулах идэвхийг тооцоолсон 4-р хүснэгтээс харахад концентрацийн туйлшралын (β=1.66) нөлөөгөөр мембраны гадаргуу дээр үүсэж буй бодит кальцийн хаг 101-127 мг/л болж өсөж, хаг үүсэх маш эрсдэлтэй бүс үүссэнийг харуулж байна. Одоогийн тун (0.045 мг/л) байгаа нь хагжилт сааруулах идэвхийг 44.7%-иар л бууруулж байна. Энэ нь кальцийн ионуудын талаас илүү хувь нь мембран дээр тунадасжиж, хаг болон тогтож байгааг илтгэнэ. Оновчилсон тунг 0.055 мг/л-ээр нэмэхэд (0.1 мг/л хүргэхэд) хаг үүсэх эрсдэл 50% -иар буурч байна. Өөрөөр хэлбэл ОЭДФ бодисын босго утга идэвхжиж, талстын бөөм үүсэхийг молекулын түвшинд зогсоож чадаж байгаагийн баталгаа юм. 2-р зурагт хаг хурдас эсэргүүцэх бодисын тун ба хагжилтыг сааруулах идэвхийн хоорондын хамаарлыг харуулав.



4-р зураг. ОЭДФ бодисын тун ба хагжилтыг сааруулах идэвхийн хамаарал

Графикаас харахад бодисын тунг 0.1 мг/л-т хүргэхэд муруй огцом өгсөж, идэвх 95.2%-д хүрч байна. Энэхүү огцом хугарал бүхий цэгийг антискалантын босго утга юм. Бодисын тунг цаашид 0.15 мг/л эсвэл 0.2 мг/л хүртэл нэмэгдүүлэхэд идэвх ердөө 98-99% болж маш багаар өсөж байна. Энэ нь эдийн засгийн хувьд ашиггүй бөгөөд 0.1 мг/л нь хамгийн оновчтой цэг болохыг баталж байна.

ДҮГНЭЛТ

Тооцоо, судалгааны үр дүнгээс харахад Эрдэнэтийн ДЦС-ын эсрэг осмосын системд ашиглагдаж буй ОЭДФ хүчлийн тунг 0.1 мг/л болгон оновчлох нь хагжилтыг сааруулах идэвхийг одоогийн түвшнээс 50.2%-иар нэмэгдүүлж, 95.2%-д хүргэх боломжтойг нотоллоо. Хаг хурдас эсэргүүцэх ОЭДФ хүчлийн стехиометрийн бус буюу босго утга нь 0.1 мг/л концентрацид идэвхжиж буйг харуулж байна. Ингэснээр мембран гадаргуу дээрх кальцийн карбонатын талстын бөөм үүсэх кинетик процессыг молекулын түвшинд дарангуйлж, мембраны ашиглалтын хугацааг 2.3 дахин уртасгах техник-эдийн засгийн үндэслэлийг бүрдүүлж байна. Хагжилтыг сааруулах идэвх 95%-иас дээш гарч байгаа нь мембраны гадаргуу дээрх талстжилтын эрчмийг эрс бууруулна. Ингэснээр мембраныг химийн аргаар угаах угаалгын тоо цөөрнө. ОЭДФ бодисын тунг нэмэгдүүлснээр бодисын зардал жилд 1 сая орчим төгрөгөөр өсөж байгаа ч, мембран солих зардлаас 61.7 сая төгрөгийг шууд хэмнэж байна. Эдийн засгийн үр ашгаас гадна осмосын төхөөрөмжийн даралтын уналт тогтворжиж, цахилгаан эрчим хүчний зарцуулалт 3-5%-иар буурах боломж бүрдэнэ.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Yuting Xu, Yongchao Sun, Zhun Maa, Rong Wanga, Xiuju Wang, Jian Wangc, Liguo Wang, Xueli Gaod, Jun Gaoa “Response surface modeling and optimization of electrodialysis for reclamation of RO concentrates in coal-fired power plants”, Separation Science and Technology, volume 55, 2020.

[2] Jiaqiang Wei, Juan Liu, Maodong Li, Lin Yang, Baiqing Zhou “The use of the drainage gradient method for evaluating reverse osmosis membrane anti-scalants”, Desalination 344, 357-361, 2014.

[3] Barbara Tomaszewskaa, Ewa Kmiecik, Katarzyna Wątor, Magdalena Tyszer “Use of numerical modelling in the prediction of membrane scaling. Reaction between antiscalants and feedwater”, Desalination, volume 427, pp. 27-34, 2018.

[4] Wei Yu , Wei Chen , Hu Yang “Evaluation of structural effects on the antiscaling performance of various graft cellulose-based antiscalants in RO membrane scaling control”, Journal of Membrane Science, volume 620, 2020.

[5] Mahmoud A. Ahmed, Ashraf A. Mohamed “Evaluation and optimization of antiscalant substances for enhanced reverse osmosis performance”, Journal of Saudi Chemical Society, volume 28, 2024.

[6] M. Nasir Mangal, Sergio G. Salinas-Rodriguez, Jos Dusseldorp, Antoine J.B. Kemperman, Jan C. Schippers, Maria D. Kennedy, Walter G.J. van der Meer “Effectiveness of antiscalants in preventing calcium phosphate scaling in reverse osmosis applications”, Journal of Membrane Science, volume 623, 2021.

[7] A.J. Karabelas, A. Karanasiou, S.T. Mitrouli “Incipient membrane scaling by calcium sulfate during desalination in narrow spacer-filled channels”, Desalination, volume 345, 2014.

[8] В.А. Головесов, А.Г. Петров, Г.Д. Сухов, Г.Я. Рудякова “Влияние выбора антискаланта на величину эксплуатационных затрат для установок обратного осмоса”, Инженерные системы в строительстве, Том.15, 2020.

[9] Hongshan Zhang, Jiaqiang Wei, Kecheng Liu, Xiao Long “Study of Screening Reverse Osmosis Menmbrane Anti-scaltants by Drainage Gradient Method”, Applied Mechanics and Materials, volume 737, pp. 588-593, 2015.

[10] Ke Cao, Jingyi Huang, Yuming Zhoua, Guangqing Liu, Huchuan Wang, Qingzhao Yao, Yahui Liu, Wei Sun, Wendao Wu “A multicarboxyl antiscalant for calcium phosphate and calcium carbonate deposits in cooling water systems”, Desalination and Water Treatment, volume 52, 2014.

[11] L.A. Melnik, D.D. Kucheruk, G.N. Pshinko “Antiscalants in the Process of Reverse Osmosis: Antiscaling Mechanism and Modern Problems of Application”, Journal of Water Chemistry and Technology, volume 42, pp. 450-464, 2021.

[12] M. A1-Shammiri, M. Safar, M. A1-Dawas “Evaluation of two different antiscalants in real operation at the Doha research plant”, Desalination, volume 128, 2000.

[13] Ismail Koyuncu, Mark R. Wiesner “Morphological Variations of Precipitated Salts on NF and RO Membranes”, Environmental Engineering Science, volume 24, 2007.

[14] Bahar Ozbey Unal “Membrane autopsy study to characterize fouling type of RO membrane used in an industrial zone wastewater reuse plant”, Desalination, volume 529, 2022.

[15] Ignatius Shahonya, Mutiu Erinosho, “Brief Review: Scaling and Fouling of Reverse Osmosis (RO) Membrane”, 3rd International Multi-Topic Conference on Engineering and Science (IMCES), 2020.

[16] Tushar Jain, Edgar Sanchez, Emily Owens-Bennettá, Rhodes Trussellá, Sharon Walke, Haizhou Liu “Impacts of Antiscalants on the Formation of Calcium Solids: Implication on Scaling Potential of Desalination Concentrate”, Environmental Science Water Research and Technology, issue 7, 2019.

[17] Zhenbo He, Li Zhang, Lihong Wang, Qiang Zhang, Lingyu Luan “Anti-Scale Performance and Mechanism of Valonia Tannin Extract for Calcium Carbonate in Circulating Cooling Water System”, Sustainability, volume 15, 2023.

[18] Sangho Lee, Jaehong Kim, Chung-Hak Lee “Analysis of $CaSO_4$ scale formation mechanism in various nanofiltration modules”, Journal of Membrane Science, volume 163, 1999.

[19] N.R. Sarker, P. Cherukupally, I. Gourevich, J. Wilbur, S.D. Jons, A.M. Bilton “Multi-scale visualization of incipient $CaCO_3$ scaling on the polyamide layer of reverse osmosis membranes”, Desalination, volume 539, 2022.

[20] Mohammed Saleh Al Ansar “SHMP as Antiscalant for Treating Brackish Water using Reverse Osmosis”, International Journal of Sciences, volume 10, 2021.

ХИЙМЭЛ ОЮУН УХААНЫГ ЭМБЭДДЭД СИСТЕМТЭЙ ХОСЛУУЛАН РОБОТ ЗОХИОН БҮТЭЭХ НЬ

Дагдандоржийн ЧИНГҮН[1], Мягмаржавын ЦОЛМОН[2]

[1.2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим Хүчний Инженерчлэлийн Сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим, Үйлдвэрийн робот, хиймэл оюун ухаан хөгжүүлэлтийн лаборатори

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: dchingun1030@gmail.com[1] , tsolmon@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Энэхүү судалгааны ажлаар Orange Pi Zero 3 ба ESP32-C3 дээр суурилсан, Монгол хэлээр харилцдаг, хиймэл оюун ухаан суулгагдсан эмбэддэд системтэй роботын программ хангамж болон техник хангамжийн цогц шийдэл боловсруулав. Уг роботын тооцоолох болон хиймэл оюун ухааны үндсэн хэсгийг Orange Pi Zero 3 дээр суулгасан. Монгол хэлний яриа таних (STT-Speech To Text), яриаг боловсруулах (LLM-Large Language Model), хиймэл оюун ухааны өгсөн Монгол хариултыг яриа болгох (TTS-Text To Speech) системийг холбож техник хангамж руу тушаал өгөх зэрэг цогц системийг нэгтгэсэн. Техник хангамжийн удирдлагыг ESP32-C3 микроконтроллёр ашиглаж, PCA9685 серво мотор драйвераар 4 тэнхлэгийн механик хөдөлгөөнийг удирдаж, Thin Film Transistor - TFT дэлгэц ба TTP223, RCWL-0516 мэдрэгчүүдийн уялдаа холбоотой ажиллагааг хангав. Уг ажлын үр дүнд Orange Pi дээрх хиймэл оюун ухааны тушаалууд нь ESP32-оор дамжин роботын хөдөлгөөн болон дэлгэц дээрх нүүр царай хэрэгжиж байгаа нь батлагдсан ба энэхүү эмбэддэд системтэй хосолсон бүтэц найдвартай ажиллаж, их хэмжээний тооцооллыг хурдан хугацаанд хийх боломжийг олгож байна.**

Түлхүүр үг: Orange Pi Zero 3, ESP32-C3, Эмбэддэд систем, Хиймэл оюун ухаан, STT/LLM/TTS.

I. УДИРТГАЛ

Хиймэл оюун ухаан (AI-Artificial Intelligence) гэдэг нь суралцах, тайлбарлах, асуудал шийдвэрлэх, аливааг ойлгох, шийдвэр гаргах зэрэг хүний сэтгэн бодохтой холбоотой үйлдлийг орлуулан хийдэг компьютер тооцооллын систем юм [1]. Орчин үед хиймэл оюун ухаан асар хурдтай хөгжиж байгаа нь хүн төрөлхтний амьдралд маш том хувь нэмэр оруулж байна [2]. Хиймэл оюун ухааныг хүн болгон өдөр тутмын амьдралдаа ашиглаж байгаа нь аль хэдийнээ бидний хүрээлэн буй орчинд нэвтэрсэн нь харагдана [3]. Мөн үүнтэй зэрэгцээд хиймэл оюун ухаан дээр суурилсан хүнтэй харилцан ярилцдаг роботууд өндөр хөгжилтэй улс орнуудад зохион бүтээгдэх болсон [4].

Монгол улсын хувьд “Чимэгэ Системс” ХХК нь байгалийн хэл боловсруулалт (NLP-Natural Language Processing) технологийг хиймэл оюун ухааны тусламжтайгаар Монгол хэл дээр хөгжүүлж буй анхны стартап компани юм [5]. Энэхүү технологи нь Монгол хэл дээр харилцах чадвартай системүүдийг хөгжүүлэх боломжийг олгож байна. Энэ боломжийг ашиглан Монгол хүнд зориулсан, хиймэл оюун ухааныг эмбэддэд системтэй хослуулсан харилцагч робот (Companion robot) зохион бүтээх санаа гарч уг судалгааны ажлыг гүйцэтгэв.

Энэхүү роботыг амь оруулж буй гол үүргийг гүйцэтгэх хэсэг дээр Orange Pi Zero 3 микропроцессор сонгож авсан. Orange Pi Zero 3 нь бусад Pi моделиудаас үнийн хувьд хямд, овор хэмжээ бага, Linux үйлдлийн систем дэмждэг тул программчлах, микроконтроллёрт тушаал өгөх зэрэг үйлдлийг хийх боломжтой жижиг бие даасан компьютер юм [6]. Энэ хэсэгт “Чимэгэ Системс”-ийн хэрэглээний программчлалын интерфейс (API-Application Programing Interface) ашиглан яриаг текст рүү хөрвүүлэх (STT), “Google Gemini 2.5 Flash lite” Хиймэл оюун ухааны API ашиглан ярианаас текст болсон бичвэрт анализ хийж, хариулт боловсруулан текст хэлбэрээр өгөх, “Чимэгэ Сонур” төслийн хүрээнд танилцуулсан текстийг яриа болгох хөрвүүлэгч (TTS) [7] зэргийг суулгаж өгсөн.

Харин роботын техник хангамж, механик хөдөлгөөн болон мэдрэгчүүдийн удирдлагыг ESP32-C3 микроконтроллёр ашиглаж гүйцэтгэх нь Orange Pi Zero 3-д ирэх тооцоолол болон гүйдлийн ачааллыг багасгаж роботын найдвартай ажиллагааг хангана. ESP32-C3 нь Orange Pi дээрээс ирэх тушаалыг хүлээн авч тухайн тушаалаас хамааран механик хөдөлгөөнийг удирдах PCA9685 серво мотор драйверт дохио илгээх, хүрэх үед мэдрэх TTP223 мэдрэгчээс ирсэн дохиог Orange Pi-руу дамжуулах, орчны хөдөлгөөн мэдрэх RCWL-0516 мэдрэгчээс ирсэн дохиогоор унтах горимд байсан роботыг асаах зэрэг логик үйлдлүүдийг гүйцэтгэнэ.

Эдгээр программ хангамж болон техник хангамжийн эмбэддэд системийг цогц хослуулснаар уг робот бий болно.

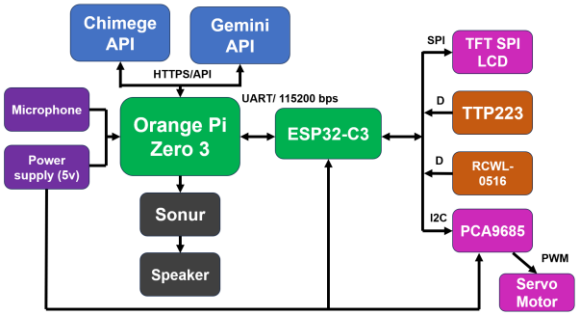
II. СИСТЕМИЙН БҮТЭЦ БА ТЕХНИК ШИЙДЭЛ

Уг судалгааны ажлын хүрээнд роботын системийг тархмал тооцооллын системээр зохион бүтээсэн. Энэхүү системийн микроконтроллёр болон микропроцессор нь хоорондоо техник хангамжийн хувьд UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) протоколын дагуу RXD, TXD интерфейсээр холбогдож [8] уялдаа холбоотой ажиллан нэг нэгнээсээ харилцан хамааралтай болж байна.

1. Системийн ерөнхий архитектур

Роботын дотоод бүтцийг тархмал тооцооллын системээр зохион байгуулсан нь найдвартай ажиллагаа болон уян хатан байдлыг нэмэгдүүлэх ач холбогдолтой. Уламжлалт Master-Slave системээс татгалзаж дараах давуу талыг олгоно. Системийн ерөнхий холболтын бүдүүвчийг 1-р зурагт үзүүлэв.

- Orange Pi Zero 3: Системийн хиймэл оюун ухаан, танин мэдэхүйн хэсгийг хариуцан ажиллаж интернэтээр API ашиглан LLM болон STT-тэй холбогдож ирсэн мэдээлэлд анализ хийн дараагийн үйлдлийг тодорхойлно.
- ESP32-C3: Системтэй холбогдсон мэдрэгчүүдээс ирж буй дохиог хянаж, шаардлагатай үед хиймэл оюун ухааны хэсэг рүү дохио явуулж, хиймэл оюунаас ~~түүнд~~ тохирсон хариултаа хүлээж авна. Эсвэл Orange Pi дээрээс ирсэн тушаалын дагуу TFT дэлгэц дээрх роботын нүүрний хувирал, серво моторын хөдөлгөөн зэргийг нарийвчлан удирдана.



1-р зураг. Системийн ерөнхий бүтэц

2. Техник хангамжийн сонголт

Роботын техник хангамжийг сонгохдоо овор хэмжээ, үнэ ханш болон тооцоолох хурдыг нь гол үзүүлэлт болгон авсан [9] [10] [11]. 1-р хүснэгтэд бүрэлдэхүүн хэсгүүдийн нэгдсэн үзүүлэлтийг харуулав.

ТЕХНИК ХАНГАМЖИЙН ҮНДСЭН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

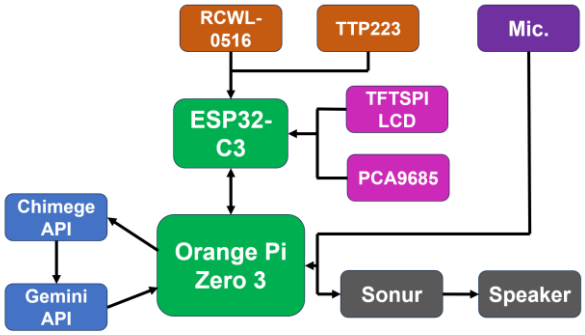
1-Р ХҮСНЭГТ

№	Бүрэлдэхүүн хэсэг	Үүрэг	Техникийн онцлог
1	Orange Pi Zero 3	Төв процессор	2GB RAM, Linux OS, үнэ хямд
2	ESP32-C3	Техник хангамжийн удирдлага	Овор хэмжээ жижиг, UART/SPI, үр ашигтай
3	PCA9685	Серво мотор драйвер	16 PWM, I2C
4	TFTSPI LCD	Нүүрний хувирал дүрслэх	2.0 SPI LCD
5	RCWL-0516	Хөдөлгөөн мэдрэгч	Microwave radar технологи
6	TTP223	Хүрэлцэх мэдрэгч	Дижитал сигнал

2.3 Программ хангамжийн алгоритм

Роботын ажиллагааны үндсэн логикийг 2-р зурагт үзүүлэв.

1. Сэрэх горим: RCWL-0516 мэдрэгч нь орчныхоо хөдөлгөөнийг тасралтгүй хянаж, хөдөлгөөн мэдэрсэн тохиолдолд ESP32-C3 микроконтроллёр луу дохио явуулах ба уг контроллёр нь Orange Pi Zero 3-г унтах горимоос сэрэх горим руу шилжүүлнэ.
2. Яриа боловсруулах: Orange Pi нь микрофоноос ирж буй яриаг Chimege API-руу илгээж текст (STT) болгон хөрвүүлж авна.
3. Хиймэл оюун ухааны дүгнэлт: Chimege-ээс хөрвүүлсэн текстийг хиймэл оюун ухаан руу API-аар илгээж тухайн нөхцөлд тохирсон хариултыг хүлээн авна.
4. Гүйцэтгэл: Хүлээж авсан хариултаа Sonur-аар дамжуулан яриа (TTS) болгон тоглуулах ба зэрэгцээ UART-аар дамжуулан хөдөлгөөн болон дүрсний тушаалыг ESP32-C3-руу илгээнэ.
5. Хариу үйлдэл: ESP32-C3 нь тушаалыг хүлээж авсны дараа тухайн тушаалын дагуу серво моторын хөдөлгөөн болон TFT дэлгэц дээр гарах роботын эмоцийг удирдана.



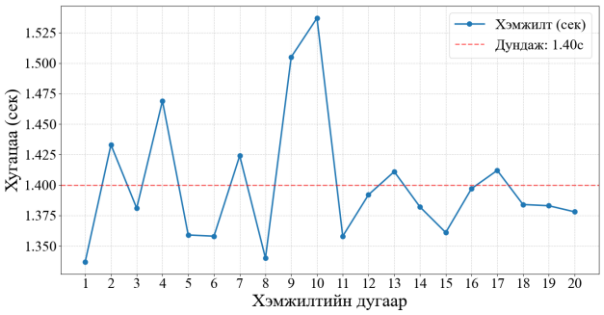
2-р зураг. Системийн үндсэн логик

III. Туршилт, Үр дүн

Уг судалгааны ажлын үр дүнг баталгаажуулахын тулд хиймэл оюун ухааны ажиллах хугацаа болон техник хангамжийн цахилгаан хэрэглээнд туршилт хийн, дүн шинжилгээ боловсруулж, тэжээлийн блокийнхоо чадлыг сонгов. Тэжээлийн блокийн чадлыг сонгохдоо туршилтаас гарган авсан гүйдлүүдийн оргил утгыг сонгон авснаар систем илүү найдвартай ажиллах боломжоор хангагдсан

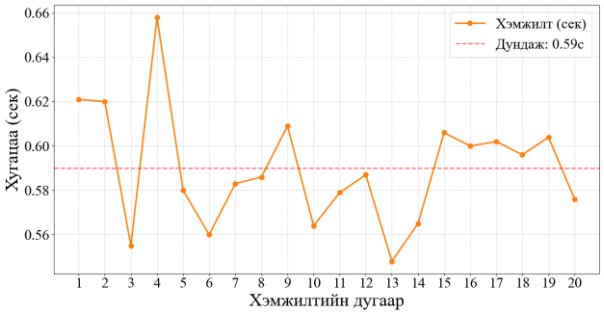
1. Системийн хариу үйлдэл хийх хугацаа

Энэ хэсэгт STT, LLM, TTS дээр зарцуулж буй хугацааг хэмжилт хийн авч нийт хугацааг олж найдвартай ажиллагаа дээр анализ хийсэн. Роботын харилцан ярих хурд нь хэрэлцэгчдэд бодит мэт мэдрэмж төрүүлэх ёстой [12]. Уг туршилтыг бодитоор тус бүр 20 удаа туршиж гүйцэтгэв.



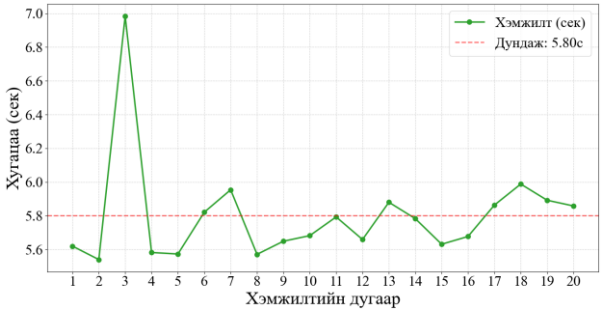
3-р зураг. STT хэсэгт зарцуулж буй хугацаа

3-р зурагт хэрэглэгчийн яриаг Chimege API-руу илгээж текст болгон хөрвүүлж, хөрвүүлэгдсэн текстийг хиймэл оюун ухаан руу илгээж байгаа үеийн хугацааг оруулав. Нийт 20 туршилтаас хамгийн бага утга нь 1.33 секунд, хамгийн их утга нь 1.53 секунд байсан ба 1.4 секунд дундаж утгатай байна.



4-р зураг. LLM хэсэгт зарцуулж буй хугацаа

4-р зурагт Chimege API-аас ирж буй текстийг хиймэл оюун ухаан анализ хийн хамгийн оновчтой хариултыг текст хэлбэрээр боловсруулан микропроцессор руу илгээх хугацааг оруулав. Нийт 20 туршилтаас хамгийн бага утга нь 0.54 секунд, хамгийн их утга нь 0.65 секунд байсан ба 0.59 секунд дундаж утгатай байна.



5-р зураг. TTS хэсэгт зарцуулж буй хугацаа

5-р зурагт хиймэл оюун ухаанаас ирж буй текст хариултыг Sonur систем яриа болгож буй хугацааны туршилтыг оруулав. Нийт 20 туршилтаас хамгийн бага утга нь 5.5 секунд, хамгийн их утга нь 6.9 секунд байсан ба 5.8 секунд дундаж утгатай байна.

Эдгээр туршилтын хугацааны дундаж утгыг боловсруулан нийт хугацааг олж 2-р хүснэгтэд оруулав. Нийт хиймэл оюун ухаан ажиллах хугацаа нь 7.79 секунд байгаа нь Sonur систем ажиллахдаа бага зэргийн хүлээлт үүсгэж буй шалтгааны улмаас удааширч байгаа ч Sonur систем текстийг бүрэн боловсруулахаас өмнө эхний боловсруулсан яриаг тоглуулах арга хэмжээ авснаар бууруулах боломжтой [13].

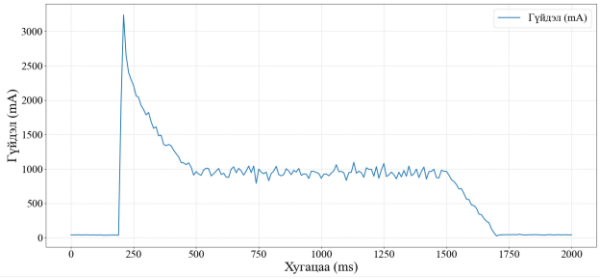
ПРОГРАММ ХАНГАМЖИЙН БОЛОВСРУУЛАЛТЫН ХУГАЦАА

2-Р ХҮСНЭГТ

Үйлдэл	Ашиглаж буй технологи	Дундаж хугацаа (с)
STT	Chimege API	1.4
LLM	Google Gemini 2.5 flash lite	0.59
TTS	Sonur	5.8
Нийт	-	7.79

2. Серво моторуудын гүйдлийн хэрэглээ

Роботын системийг ажиллагааг хянахын тулд INA219 гүйдэл болон хүчдэл хэмжигч мэдрэгч ашигласан [14]. Техник хангамжийн хэсэгт серво мотор байгаа учраас гүйдлийн хэрэглээ нь бусад мэдрэгчүүд болон хэрэгслүүдээс онолын хувьд их байх ёстой [15]. Үүнийг туршилтаар батлахын тулд дөрвөн серво моторын тэжээлийн оролтын өмнө гүйдэл болон хүчдэл хэмжигч мэдрэгчээ суурилуулж, гүйдлийн оргил утгын үр дүнг 6-р зурагт харуулав.

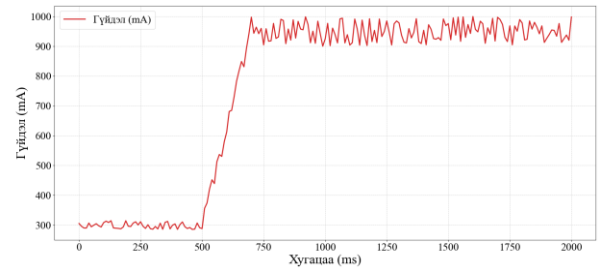


6-р зураг. Серво моторуудын гүйдлийн оргил утга

Үр дүнгээс харвал серво моторуудын гүйдлийн оргил утга нь 3.2А хүрээд аажмаар тогтворжиж байна. Энэ утгыг цаашдын тооцоонд ашиглах болно.

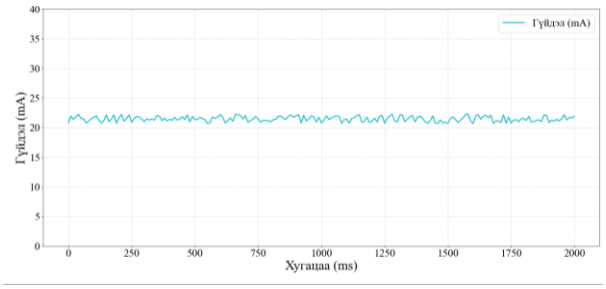
3. Тооцоолох хэсгийн гүйдлийн хэрэглээ

Orange Pi Zero 3 болон ESP32-C3-ын ашиглаж буй гүйдлийн утгыг олохын тулд өмнөх INA219 мэдрэгч ашигласан. Эдгээр гүйдлийн утгыг тодорхойлсноор найдвартай ажиллагааг нь давхар баталгаажуулах болно.



7-р зураг. Orange Pi Zero 3-ын гүйдлийн хэрэглээ

Уг графикаас харвал Orange Pi-ийн оргил гүйдлийн утга нь 0.99А≈1А байна. Энэ утгыг цаашдын тооцоонд ашиглах болно.



8-р зураг. ESP32-C3-ын гүйдлийн хэрэглээ

ESP32-C3 сонгох гол шалтгааны нэг болох цахилгаан зарцуулалтын үр ашигтай байдал нь энэ туршилтаар баталгаажиж байна. Гүйдлийн оргил утга нь 22.3 мА (0.022 А), Энэ утгыг цаашдын тооцоонд ашиглах болно.

4. Дүн шинжилгээ

Системийн найдвартай ажиллагааг хангахын тулд бүрэлдэхүүн тус бүрийн гүйдлийн хэрэглээг хэмжиж, үр дүнг 3-р хүснэгтэд харуулав.

СИСТЕМИЙН ГҮЙДЛИЙН ХЭРЭГЛЭЭНИЙ НЭГДСЭН ҮР ДҮН

3-Р ХҮСНЭГТ

Бүрэлдэхүүн	Ажилын төлөв	Гүйдлийн оргил утга (А)	Ажилах хүчдэл (V)
Orange Pi Zero 3	LLM	1	5
ESP32-C3	Хяналт	0.022	5
Серво Мотор (x4)	Идэвхтэй хөдөлгөөн	3.2	5
Мэдрэгч ба дэлгэц	Ажиллах горим	0.08	5
Нийт	Бүрэн ачаалал	4.3	5

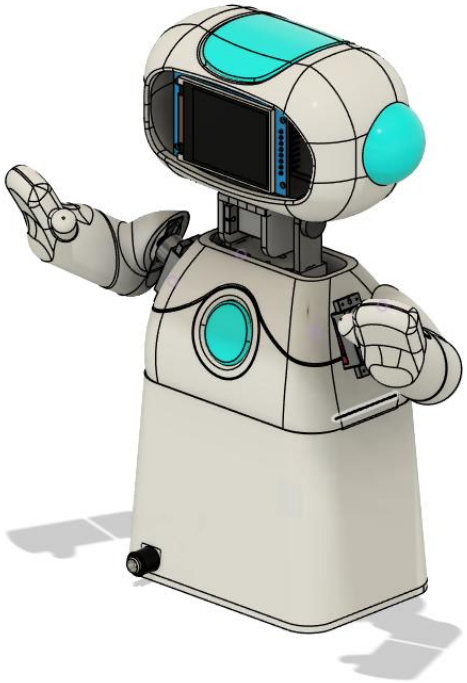
Туршилтаас харахад системийн нийт оргил гүйдэл 4.3А хүрч байгаагийн 74.4% нь серво моторууд зарцуулж байна. ESP32-C3 контроллёр нь эсрэгээрээ 22.3 мА гүйдэл хэрэглэж байгаа нь цахилгаан хэрэглээний хувьд үр ашигтай болохыг харуулж байна. Мөн Orange Pi Zero 3-ыг хэрэгтэй үед нь ачаалуулж байгаа нь цахилгаан хэрэглээг оновчтой болгож байна. Энэ туршилтыг хийж байх үедээ тэжээлийн блок ашиглан гүйдэл болон хүчдэл өгч байсан бол, хэмжилтийн утгаа авч найдвартай ажиллаж байгааг баталсны дараа 5V, 7A, 35W техникийн үзүүлэлттэй адаптер сонгож авсан [16].

Программ хангамжийн боловсруулалт хийж буй хугацаа нь дунджаар 7.79 с гарч байгаагийн дийлэнх хэсгийг TTS эзэлж байгаа нь Sonur ажиллахдаа хүлээлт үүсгэж байгааг илтгэж байна.

5. Роботын механик бүтэц ба 3D загварчлал

Роботын их бие ба механик хийцийг боловсруулахдаа Autodesk Fusion 360 программыг ашиглан 3D загвар дээр ажиллав. Уг роботын анхны дизайныг Энэтхэг улсад төвтэй EducationWood компани загварчилсан [17] ба тухайн компанийн албан ёсны зөвшөөрөлтэйгөөр өөрийн шаардлагад нийцүүлэн их биеийн бүтцийг засаж дараах өөрчлөлтийг хийсэн болно.

- Дотоод бүтцийн хувьд Orange Pi Zero 3 болон ESP32-C3 байрлуулах суурь хэсгийг Fusion 360 программ дээр шинээр төлөвлөж ахин загварчлан их биеийн доторх хэсэгт ухалт хийсэн.
- PCA9685 серво драйвер болон тэжээл залгагдаж буй хэсгийн зайг нэмэгдүүлж, холбогч утаснуудыг эмх цэгцтэй байлгах суваг гаргаж өгсөн.
- Роботын нүүрний хэсэгт TFTSPI LCD дэлгэц суурилуулах зай гаргаж чанга яригч саадгүй байршуулагдаж болохоор ухалтыг хийн зассан.
- RCWL-0516 болон TTP223 мэдрэгчийг мэдэрч чадах хамгийн оновчтой зайнаас дохио авч болохоор их биеийн хэсгүүдэд байрлуулсан.



9-р зураг. Fusion 360 программ дээрх роботын 3D загвар

Ийнхүү Orange Pi Zero 3-ын тооцоолол дээр ESP32-C3 техник хангамжийн удирдлагатай хослуулан, Fusion 360 программ дээр механик их биеийг угсарснаар Монгол хэлээр харилцах чадвартай, бие даасан эмбэддэд систем бүхий робот бэлэн болсон.

IV. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар Orange Pi Zero 3 болон ESP32-C3 контроллёруудыг тархмал тооцооллын зарчмаар холбож, Монгол хэлээр харилцах чадвартай хиймэл оюун ухаан бүхий роботыг амжилттай зохион бүтээв. Системийн танин мэдэхүйн болон аналитик үйлдлүүдийг Gemini 2.5 flash lite болон Chimege API-уудыг ашиглан Orange Pi дээр, харин техник

хангамжийн удирдлага, мэдрэгчүүдийн хяналтыг ESP32 дээр суурилан гүйцэтгэсэн нь системийн найдвартай ажиллагааг хангах оновчтой шийдэл болсон ~~боллоо~~. Туршилтаар серво моторууд хөдөлж эхлэх үед гүйдэл 3.2A хүртэл огцом өсөж байгаа нь тэжээлийн хэлхээг салгаж тусгаарлах шаардлагатайг техникийн талаас баталсан бөгөөд нийт 7.79 секундийн саатал гарч буй нь цаашид TTS системийн хурдыг оновчлох шаардлагатайг илтгэж байна. Түүнчлэн Fusion 360 программ дээр засаж боловсруулсан их биеийн загвар нь системийн эд ангиудыг эмх цэгцтэй байрлуулж, роботыг бие даасан байдлаар ажиллах боломжийг олгосон бөгөөд энэхүү ажил нь Монгол хэл дээрх үйлчилгээний болон харилцагч роботын суурь судалгаа болох ач холбогдолтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Russell, Stuart j.; Norvig Peter (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Hoboken: Pearson. ISBN 978-0-1346-1099-3. LCCN 20190474

[2] A. Bertina, "15 reasons why artificial intelligence is the most important development in human history," *Medium*, 2018. [Online]. Available: https://medium.com/@abertina/15-reasons-why-artificial-intelligence-is-the-most-important-development-in-human-history-4692537e0976

[3] Govpilot, "8 ways you are already using AI in everyday life," 2023. [Online]. Available: https://www.govpilot.com/blog/ways-you-are-already-using-ai-in-everyday-life-govpilot

[4] Built In, "Humanoid robots: What they are and how they work," 2023.[Online].Available: https://builtin.com/robotics/humanoid-robots

[5] Chimege Systems LLC, "Chimege Systems E-book." chimege.com.[Online].Available: https://chimege.com/en/ebook/

[6] Orange Pi, "Orange Pi Zero 3 Product Details," orangepi.org. [Online].Available: http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/Orange-Pi-Zero-3.html

[7] Chimege Systems LLC, "Sonur - Text To Speech Project," sonur.chimege.com.[Online].Available: https://sonur.chimege.com/

[8] Nordic Semiconductor, "UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) Documentation," docs.nordicsemi.com. [Online].Available: https://docs.nordicsemi.com/bundle/ps_nrf52833/page/uart.html

[9] S. Santos, "Getting Started with ESP32-C3 Super Mini," Random NerdTutorials.[Online].Available: https://randomnerdtutorials.com/getting-started-esp32-c3-super-mini/

[10] Adafruit, "PCA9685 16-Channel 12-bit PWM/Servo Driver," adafruit.com.[Online].Available: https://www.adafruit.com/product/815

[11] https://www.sparkfun.com/tft-lcd-display-module-screen-2-0in-240x320-spi-interface.html

[12] MacArthur et al., "Proximity and speed: A study on human-robot interaction," *UCF Research*, 2016. [Online]. Available: https://mit.ucf.edu/wp-content/uploads/sites/11/2016/11/MacArthur-et-al-2016-Proximity-and-speed.pdf

[13] ElevenLabs, "Enhancing conversational AI latency with efficient TTS pipelines," 2023. [Online]. Available: https://elevenlabs.io/blog/enhancing-conversational-ai-latency-with-efficient-tts-pipelines

[14] Adafruit, "INA219 High Side DC Current Sensor Breakout," adafruit.com.[Online].Available: https://www.adafruit.com/product/904

[15] ProtoSupplies, "Servo Motor Micro MG90S Continuous Rotation," protosupplies.com. [Online]. Available: https://protosupplies.com/product/servo-motor-micro-mg90s-continuous-rotation/

[16] Millikan, Robert A,; Bishop, E. S. (1917). Elements of Electricity. American Technical Society. P54

[17] EducationWood, "Mechanical Design Works - Robot Body CAD,"GrabCAD.[Online].Available: https://grabcad.com/educationwood.mechanical.design.works-1 https://www.educationwood.com/

БАГА ЧАДЛЫН ХИЙН ТҮЛШЭЭР АЖИЛЛАХ ЭХ ҮҮСВЭРИЙГ СУМЫН ТӨВИЙН ДУЛААН ХАНГАМЖИД АШИГЛАХ БОЛОМЖИЙН СУДАЛГААНЫ ЗАРИМ ҮР ДҮН

Батсайханы УГТАХБАЯР[1], Батсамбуугийн ӨЛЗИЙБАДРАХ[2]

[1, 2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль,

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: batsaikhanugtahaa@gmail.com[1]

Хураангуй: **Монгол Улсын эрчим хүчний салбар нүүрсэнд суурилсан бүтэцтэй бөгөөд аймаг, сумын төвүүдийн дулаан хангамжийн ихэнхийг бага оврын нүүрсээр ажилладаг ус халаах зуухнууд хангаж байна. Ийм төрлийн эх үүсгүүрүүд нь ашиглалтын үр ашиг бага, түлшний хэрэглээ их, мөн байгаль орчинд сөрөг нөлөө үзүүлэх сул талтай. Архангай аймгийн Ихтамир сумын төв нь одоогоор 1.2 МВт хүчин чадалтай нүүрсээр ажилладаг халаалтын зуухаар 10 гаруй барилга байгууламжийг дулаанаар хангаж байгаа бөгөөд нийт дулааны ачаалал ойролцоогоор 1.1 МВт байна. Түлшийг алслагдсан уурхайгаас тээвэрлэн нийлүүлэх шаардлагатай байдаг нь эдийн засгийн болон логистикийн хүндрэл үүсгэдэг.Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь сумын төвийн дулаан хангамжийн системийн өнөөгийн байдлыг судалж, нүүрсэнд суурилсан дулааны эх үүсгүүрийг илүү үр ашигтай, байгаль орчинд ээлтэй технологиор орлуулах боломжийг тодорхойлох явдал юм. Судалгаанд бага чадлын хийн түлшээр ажилладаг дулаан, цахилгаан хослон үйлдвэрлэх системийн боломжийг авч үзсэн. Хийн түлшээр ажилладаг эх үүсвэр нь шаталтын явцад ялгарах хорт бодис бага, ашиглалтын үр ашиг өндөр, автоматжуулалтын түвшин сайтай зэрэг давуу талтай. Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд сумын төвийн дулаан хангамжийг шинэ технологид тулгуурлан сайжруулах нь түлшний хэрэглээг бууруулах, системийн найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлэх, мөн байгаль орчны бохирдлыг бууруулах боломжтой болох нь тогтоогдлоо.**

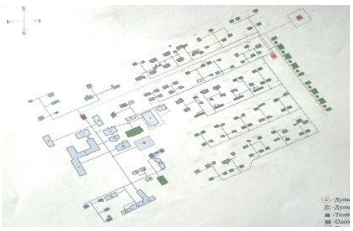
Түлхүүр үг: Дулаан хангамж, хийн түлш, дулаанжуулалт, хослон үйлдвэрлэл

I. УДИРТГАЛ

Монгол Улсын эрчим хүчний салбарын дулаан үйлдвэрлэл ихэвчлэн нүүрсэнд тулгуурласан байдаг. Ялангуяа аймаг, сумын төвүүдэд ашиглагдаж буй бага оврын халаалтын зуухнууд нь ашиглалтын үр ашиг бага, түлшний хэрэглээ их, байгаль орчинд үзүүлэх нөлөө өндөр зэрэг асуудлуудтай байдаг. Архангай аймгийн Ихтамир сумын төвийн дулаан хангамжийн систем нь мөн нүүрсэнд суурилсан эх үүсгүүр дээр ажиллаж байна. Сүүлийн жилүүдэд эрчим хүчний салбарт илүү цэвэр, үр ашигтай технологи нэвтрүүлэх шаардлага нэмэгдэж байгаа тул бага чадлын хийн түлшээр ажилладаг эх үүсгүүрийг ашиглах боломжийг судлах нь чухал ач холбогдолтой юм.

II. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ

Энэхүү судалгааны объект нь Архангай аймгийн Ихтамир сумын төвийн дулаан хангамжийн систем юм. Тус сум нь Улаанбаатар хотоос ойролцоогоор 510 км зайд, Архангай аймгийн төвөөс 27 км зайд оршдог бөгөөд нийт 993 мянган га нутаг дэвсгэртэй, ойт хээрийн бүсэд хамаарах уулархаг нутаг юм. Сумын төвийн дулаан хангамжийг 1.2 МВт хүчин чадалтай нүүрсээр ажилладаг ус халаах зуухаар хангаж, нийт 2237 метр урт дулаан дамжуулах шугам сүлжээгээр дамжин сургууль, цэцэрлэг, эмнэлэг болон төрийн байгууллагууд зэрэг 10 гаруй барилга байгууламжийг дулаанаар хангаж байна [1]. Одоогийн системийн нийт дулааны ачаалал ойролцоогоор 1.1 МВт байна. 1 дүгээр зурагт дулаан хангамжийн системийг дүрслэн үзүүллээ.



1-р зураг. Дулаан хангамжийн систем

III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Судалгааны ажлыг дараах үндсэн арга зүйд тулгуурлан гүйцэтгэсэн. Үүнд:

- Сумын төвийн дулаан хангамжийн системийн өнөөгийн байдлын судалгаа;
- Дулааны ачааллын тооцоолол;
- Нүүрсэнд суурилсан болон хийн түлшээр ажиллах эх үүсвэрүүдийн харьцуулсан шинжилгээ;
- Байгаль орчинд үзүүлэх нөлөөллийн үнэлгээ.

Эдгээр судалгааны аргуудыг ашиглан дулаан хангамжийн системийг илүү үр ашигтай, байгаль орчинд ээлтэй технологид шилжүүлэх боломжийг тодорхойлсон.

Дараах тооцооны аргачлалаар тооцоолно [2]. Үүнд:

- Дулааны ачаалал ба жилийн хэрэглээг тооцоолох, Гкал/ц

$$Q_{\text{д}} = q_{\text{д}} \cdot V_{\text{д}} \cdot \left(t_{\text{д}} - t_{\text{г.д}}\right) \quad (1)$$

- Хэрэгцээний халуун усны системийн дулааны ачаалал, Гкал/ц

$$Q_{\text{ххү}}^{\text{7-дүнд}} = \frac{a \cdot m \cdot c \cdot \left(t_{\text{хал}} - t_{\text{хүй}}\right)}{T} \quad (2)$$

- Дулаацуулгын системийн жилийн хэрэглээ

$$Q_{\text{д}}^{\text{жил}} = Q_{\text{д}}^{\text{жил}} \cdot n_{\text{д}} = \overline{Q_{\text{д}}} \cdot Q'_{\text{д}} \cdot n_{\text{д}} \quad (3)$$

- Дулааны жилийн нийт хэрэглээ, Гкал/ц

$$Q_{\text{нийт}}^{\text{жил}} = Q_{\text{д}}^{\text{жил}} + Q_{\text{ххү}}^{\text{жил}} + Q_{\text{а}}^{\text{жил}} \quad (4)$$

- Түлшний зарцуулалт, тн

$$B_{\text{Т}} = \frac{Q_{\text{нийт}}^{\text{жил}} \cdot 10^3}{Q_{\text{доод}}^{\text{аж}} \cdot n_{\text{зуух}}} \quad (5)$$

1 дүгээр хүснэгтэд бага чадлын хийн түлшээр ажилладаг технологийн харьцуулалтыг, 2 дугаар хүснэгтэд бага чадлын хийн генераторын үзүүлэлтийг тус тус харуулав.

ХИЙН ТЕХНОЛОГИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ [3, 4]

1-Р ХҮСНЭГТ

Системийн төрөл	Ажиллах зарчим	АҮК	Давуу тал	Хэрэглэх нөхцөл
Зөвхөн цахилгаан үйлдвэрлэх систем	Генератор зөвхөн цахилгаан үйлдвэрлэнэ	30 – 40 %	Систем энгийн	Алслагдсан суурин, нөөц эх үүсвэр
Дулаан цахилгаан хосолсон систем (CHP)	Генераторын хаягдал дулааныг дулаан хангамжид ашиглана	70 – 90 %	Түлшний хэрэглээ багасна	Хот, сумын дулаан хангамж
Микро-сүлжээний систем	Генератор + нар + салхи + батарей	60 – 90 % (системээс хамаарна)	Найдвартай байдал нэмэгдэнэ, түлш багасна	Алслагдсан бүс

БАГА ЧАДЛЫН ХИЙН ГЕНЕРАТОРЫН ЖИШИГ ҮЗҮҮЛЭЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ

№	Үзүүлэлт	Утга
1	Чадал	10 – 500 кВт
2	Хүчдэл	400 В
3	Давтамж	50 Гц
4	Түлш	Байгалийн хий / LPG / Биохий
5	Цахилгаан үр ашиг	30 – 40 %
6	CHP системийн нийт үр ашиг	80 – 90 %

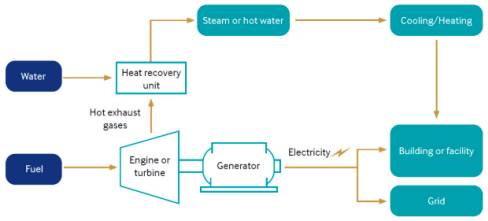
Бага чадлын хийн түлшээр ажилладаг дулаан болон цахилгаан хослон үйлдвэрлэх системийг ашиглах нь дараах давуу талуудтай. Үүнд:

- Түлшний шаталтын үр ашиг өндөр;
- Агаарын бохирдол болон хүлэмжийн хийн ялгаралт бага;
- Автоматжуулалтын түвшин өндөр;
- Найдвартай ажиллагаа сайтай.

IV. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

Судалгааны үр дүнд сумын төвийн дулаан хангамжийн системд ашиглагдаж буй нүүрсэн зуух нь түлшний зарцуулалт их, ашиглалтын үр ашиг харьцангуй бага, мөн агаарын бохирдолд тодорхой хэмжээгээр нөлөөлж байгааг тогтоов. Түлшийг алслагдсан уурхайгаас тээвэрлэн нийлүүлэх шаардлагатай байгаа нь эдийн засгийн зардлыг нэмэгдүүлж байна.

Тиймээс Ихтамир сумын төвийн дулааны ачаалалд уялдуулан 1.1 МВт хийн когенерацийн буюу дулаан, цахилгааныг хослон үйлдвэрлэх (combined Heat Power) системийг сонгох нь техникийн болон эдийн засгийн хувьд хамгийн тохиромжтой шийдэл юм. 500 кВт чадалтай хоёр хийн генератор бүхий CHP системийг ашигласнаар сумын төвийн дулаан болон цахилгааны хэрэгцээг нэгэн зэрэг хангах боломж бүрдэнэ. Энэ систем нь цахилгаан үйлдвэрлэх явцад үүсэх утааны хийн дулааныг дулаан хангамжид ашигладаг тул түлшний ашиглалтын үр ашиг 70–90 хувьд хүрч, уламжлалт зөвхөн цахилгаан, дулаан үйлдвэрлэх системээс илүү өндөр үр ашигтай байдаг. Мөн хоёр генератор ашиглах нь ачааллыг уян хатан тохируулах, нэг төхөөрөмжид засвар үйлчилгээ хийх үед нөгөөгөөр нь системийг хэвийн ажиллуулах боломж олгодог. Үүнээс гадна нүүрсний хэрэглээг бууруулж, агаарын бохирдлыг багасгах, орон нутгийн эрчим хүчний хангамжийн найдвартай байдлыг нэмэгдүүлэх давуу талтай тул энэхүү хувилбар нь Ихтамир сумын нөхцөлд оновчтой шийдэл гэж үзэж байна. 2 дугаар зурагт CHP технологийн ажиллагааны зарчмын схемийг, 3-р хүснэгтэд Ихтамир сумын дулаан хангамжийн системд тохирох хувилбаруудыг харууллаа.



2-р зураг. CHP ажиллагааны зарчмын схем

ТОХИРОМЖТОЙ ХУВИЛБАРЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

3-Р ХҮСНЭГТ

Хувилбар	Систем	Нийт чадал	Давуу тал
Хувилбар 1	500 кВт × 2 хийн генератор (CHP)	1 МВт	Найдвартай ажиллагаа, ачаалалд уян хатан
Хувилбар 2	1 МВт хийн когенерацийн станц	1 МВт	Дулаан ба цахилгааныг хамтад нь үйлдвэрлэнэ, түлш зарцуулалт багасна

Мөн цаашид сумын төвийн хүн амын өсөлт, барилга байгууламжийн нэмэгдэлтэй холбоотойгоор дулааны ачаалал нэмэгдэх боломжтой тул шинэ технологид суурилсан эх үүсвэр ашиглах шаардлага үүсэх болно.

V. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд Архангай аймгийн Ихтамир сумын төвийн дулаан хангамжийн системийн өнөөгийн байдлыг судалж, нүүрсэнд суурилсан дулааны эх үүсвэрийг орлуулах боломжийг авч үзлээ.

Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд бага чадлын хийн түлшээр ажилладаг эх үүсвэрийг ашиглах нь дулаан хангамжийн системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, түлшний хэрэглээг бууруулах, мөн байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөөг багасгах боломжтой юм.

Иймд цаашид сумын төвийн дулаан хангамжийн системийг шинэчлэхдээ илүү цэвэр, үр ашигтай технологид тулгуурласан шийдлийг судалж, хэрэгжүүлэх шаардлагатай байна. Бага чадлын хийн түлшээр ажилладаг үүсгүүр нь алслагдсан суурин болон сумын төвийн дулаан, цахилгаан хангамжид ашиглах боломжтой үр ашигтай технологи юм. Дулаан ба цахилгаан хослон үйлдвэрлэх когенерацийн системийг ашигласнаар түлшний хэрэглээг бууруулж, системийн нийт үр ашгийг 80–90% хүртэл нэмэгдүүлэх боломжтой.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Архангай аймгийн статистикийн эмхэтгэл, 2024.

[2] Б.Намхайням “Дулаан хангамжийн систем” Улаанбаатар хот, 2015 он

[3] Чувашев В.Н. Применение газогенераторных установок в сельскохозяйственном производстве 2017 г.

[4] Б.Намхайням, Н.Цолмон “Эрчим хүчний үр ашиг ногоон технологи” Улаанбаатар хот, 2023 он

СИНХРОН ГЕНЕРАТОРЫН ӨДӨӨЛТИЙН СИСТЕМИЙН СУДАЛГАА

Баатармөнхийн ТҮШИГ-ЭРДЭНЭ[1], Баясгалангийн ЗАГДХОРОЛ[2]

[1.2]Монгол Улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: B211050625@must.edu.mn[1], zagdkhorol@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Дулааны цахилгаан станцын турбогенераторын өдөөлтийн систем нь генераторын төгсгөлийн хүчдэл, реактив чадал болон эрчим хүчний системийн тогтвортой ажиллагааг хангах үндсэн үүрэгтэй. Иймээс өдөөлтийн системийн бүтэц, ажиллагааны зарчим, динамик хариу үйлдлийг зөв тодорхойлох нь генераторын найдвартай ажиллагаа, шилжилтийн үеийн тогтвортой байдал, ашиглалтын горимын үнэлгээнд чухал ач холбогдолтой. Энэхүү өгүүлэлд Монгол Улсын Дулааны дөрөвдүгээр цахилгаан станцын турбогенераторын өдөөлтийн системийн бүтэц, ажиллагааны үндсэн зарчим болон автомат хүчдэлийн тохируулгын системийн нөлөөг судлав. Нээлттэй техникийн мэдээлэлд тус станцын генераторын өдөөлтийн системийг Тиристор төрөл гэж тэмдэглэсэн боловч түүний нарийвчилсан үйлдвэрлэгчийн өгөгдөл, параметр болон яг тохирох IEEE загварын төрөл тодорхойгүй байсан тул судалгаанд IEEE 421.5 стандартын AC1A загварыг суурь төлөөлөх модель болгон сонгож, ST2A загвартай харьцуулсан шинжилгээ хийв.**

Түлхүүр үг: ***Хүчдэлийн автомат тохируулга AVR, AC1A загвар, ST2A загвар, динамик шинжилгээ, математик загварчлал, Simulink, хүчдэлийн тогтворжилт.***

I. УДИРТГАЛ

Орчин үеийн цахилгаан эрчим хүчний системийн үндсэн эх үүсвэрүүдийн дийлэнх нь синхрон генераторт тулгуурладаг бөгөөд дулааны болон усан цахилгаан станцуудад ашиглагдаж буй их чадлын генераторуудын найдвартай ажиллагаа нь хүчдэлийн чанар, реактив чадлын зохицуулалт, системийн тогтвортой байдалтай шууд хамааралтай байдаг [1], [6]. Иймд генераторын төгсгөлийн хүчдэлийг зөв түвшинд барих, реактив чадлын солилцоог удирдах үндсэн хэрэгсэл болох өдөөлтийн системийн бүтэц, ажиллагаа, динамик шинж чанарыг судлах шаардлага өндөр юм [1], [2].

Сүүлийн жилүүдэд олон улсын эрчим хүчний салбарт том чадлын турбогенераторт статик өдөөлтийн системийг тоон автомат хүчдэл тохируулагчтай хамт хэрэглэх хандлага давамгайлж байна. Хуучин өдөөлтийн системийн шинэчлэлтийн үед статик өдөөлт, нөөцлөгдсөн удирдлага, тоон хяналт, алсын оношилгоо бүхий шийдэл өргөн хэрэглэгдэж байна. АНУ-ын GE Vernova, Швейцар-Шведийн ABB, Германы Siemens Energy, Австрийн ANDRITZ зэрэг томоохон үйлдвэрлэгчид шинэ үеийн өдөөлтийн системээ голчлон ийм бүтэцтэйгээр санал болгож байна.

Энэ хандлагын гол шалтгаан нь шилжилтийн үеийн хариу үйлдэл хурдан, богино залгаа болон ачааллын огцом өөрчлөлтийн үед хүчдэлээ илүү сайн барих, мөн системийн тогтворжилтыг сайжруулах боломжтойд оршино. Орчин үеийн статик өдөөлтийн системүүдэд эерэг болон сөрөг албадмал өдөөлт хэрэгжүүлэх боломжтой тул гэмтлийн дараах сэргэлт, хүчдэлийн уналтын үеийн нөхөн сэргэлт илүү үр ашигтай болдог. EPRI-ийн тайланд шинэ өдөөлтийн системүүд нь хуучин шийдлүүдтэй харьцуулахад шилжилтийн үеийн хариу үйлдлийг сайжруулж, хамгаалалт болон тогтворжуулагчийн уялдааг илүү үр дүнтэй болгодог гэж дурдсан байна.

Мөн өнөөгийн цахилгаан системд сүлжээний шаардлага улам чангарч байгаа тул өдөөлтийн систем зөвхөн хүчдэл тогтворжуулахаас гадна реактив чадлын зохицуулалт, системийн хэлбэлзэл дарах тогтворжуулагчийн үүрэг, өгөгдөл бичлэг, өөрийгөө оношлох, алсын хяналт зэрэг нэмэлт үүргийг гүйцэтгэх шаардлагатай болсон. ABB-ийн UNITROL 6000 цуврал нь сүлжээний шаардлагыг хангахуйц удирдлага, туршилт, бичлэгийн боломжтой бөгөөд удирдлагын ердийн цикл хугацаа нь 400 мкс гэж өгөгдсөн нь өндөр хурдны тоон удирдлагын давуу талыг харуулж байна.

Энэ чиг хандлагыг Монгол Улсын Дулааны дөрөвдүгээр цахилгаан станцын турбогенераторын өдөөлтийн системийн судалгаатай уялдуулан авч үзэх нь ач холбогдолтой. Нээлттэй техникийн мэдээлэлд ДЦС-4-ийн генераторын өдөөлтийн системийг тиристор төрөл гэж тэмдэглэсэн боловч түүний нарийвчилсан бүтэц, үйлдвэрлэгчийн параметр, IEEE стандартын яг тохирох загварын төрөл бүрэн тодорхой бус байна. Ийм нөхцөлд олон улсад түгээмэл хэрэглэгддэг стандарт өдөөлтийн загваруудыг ашиглан өдөөлтийн системийн ажиллагааг загварчлах нь инженерийн хувьд үндэслэлтэй арга юм Тиймээс энэхүү ажилд ДЦС-4-ийн турбогенераторын өдөөлтийн системийн ажиллагааг судлахдаа IEEE төрлийн загваруудыг ашиглан AVR ба өдөөлтийн динамик хариу үйлдлийг үнэлж, хүчдэлийн тогтворжилтод үзүүлэх нөлөөг тодорхойлохыг зорьсон болно.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

1. Судалгааны арга зүй

Энэхүү судалгаанд турбогенераторын өдөөлтийн системийн ажиллагаа, динамик хариу үйлдлийг судлах зорилгоор онолын шинжилгээ болон математик загварчлалын аргыг ашиглав. Судалгааны объект нь Дулааны дөрөвдүгээр цахилгаан станцын турбогенераторын өдөөлтийн систем бөгөөд нээлттэй мэдээлэл болон өдөөлтийн системийн үндсэн ажиллагааны зарчимд тулгуурлан шинжилгээ хийсэн [1], [3],[6].

Өдөөлтийн системийн бодит параметр бүрэн тодорхойгүй байсан тул судалгаанд IEEE стандартын AC1A загварыг үндсэн төлөөлөх загвар болгон сонгож, харьцуулалтын зорилгоор ST2A загварыг ашиглав. Математик загварыг MATLAB/Simulink орчинд хэрэгжүүлж, генератор–AVR–өдөөлтийн системийн хаалттай хүрдтэй ажиллагааг дуурайлган үзүүлсэн [3], [4],[5],[6].

Симуляцын үед системд богино залгааны горим үүсгэж, гэмтлийн үеийн хүчдэлийн уналт, өдөөлтийн системийн хариу үйлдэл, мөн богино залгаа арилсны дараа генераторын хүчдэл болон өдөөлтийн сэргэлтийн процессыг ажиглан үнэлэв. Үр дүнг үнэлэхдээ шилжилтийн процесс, тогтворжилтын хугацаа, хэт өсөлт болон гэмтлийн дараах хүчдэл сэргэх чадварыг гол үзүүлэлт болгон авч үзсэн [1], [2].

Энэхүү арга зүй нь бодит үйлдвэрийн өгөгдөл хязгаарлагдмал нөхцөлд турбогенераторын өдөөлтийн системийн динамик ажиллагааг загварчлах, ялангуяа богино залгааны үеийн болон түүний дараах сэргэлтийн шинж чанарыг үнэлэх боломжийг олгож байна [1], [2].

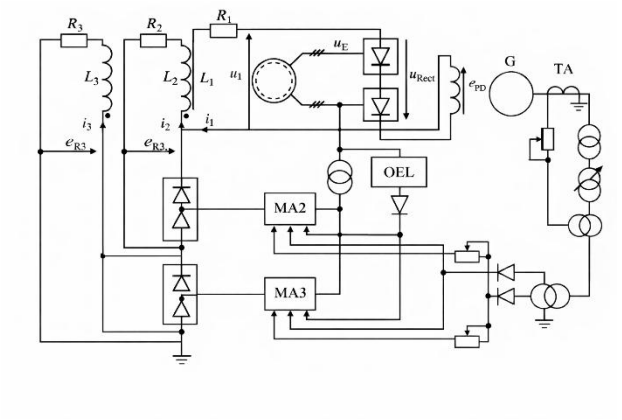
2. Өдөөлтийн системийн ерөнхий ойлголт

Синхрон генератор ажиллахын тулд роторын ороомогт тогтмол гүйдэл өгөх шаардлагатай байдаг. Энэ тогтмол гүйдлийг үүсгэж генераторын ротортд дамжуулдаг төхөөрөмжийг өдөөгч гэж нэрлэдэг. Өдөөгчийн үүсгэсэн гүйдлийн хэмжээнээс генераторын соронзон орны хүч өөрчлөгдөж, улмаар генераторын гаралтын хүчдэл зохицуулагддаг [1-3], , [6-14].

Өдөөгч нь генераторын өдөөлтийн системийн үндсэн хэсэг бөгөөд генераторын хэвийн ажиллагааг хангахад чухал үүрэгтэй. Хэрэв өдөөлтийн гүйдэл байхгүй бол синхрон генератор хүчдэл үүсгэх боломжгүй байдаг. Иймээс өдөөгч нь генераторын ажиллагаанд зайлшгүй шаардлагатай төхөөрөмж юм [1], [6].

Турбогенераторуудад цахилгаан соронзон орныг үүсгэхийн тулд генераторын гол дээр суурилуулсан тогтмол гүйдлийн өдөөгчийг ашигладаг байсан. Тогтмол гүйдлийн өдөөгч нь генератортай хамт эргэлдэж, роторын ороомогт тогтмол гүйдэл өгдөг байсан боловч удаан хугацааны ашиглалтын явцад щётка, цагариг зэрэг механик хэсгийн элэгдэл ихэсдэг сул талтай байсан. Үүнтэй холбоотойгоор шёткогүй болон статик зэрэг илүү боловсронгуй өдөөлтийн аргууд хөгжсөн Турбогенераторууд нь цилиндр ротортой бөгөөд өндөр хурдтай, ойролцоогоор 1500–3000 эрг/мин хурдтай ажилладаг тул уламжлалт тогтмол гүйдлийн өдөөгч нь тохиромж муутай болж, хувьсах гүйдлийн шёткогүй өдөөлтийн системийг өргөн ашиглах болсон бол харьцангуй бага хурдтай гидрогенераторт тогтмол гүйдлийн өдөөгч хэрэглэх тохиолдол мөн байдаг.

ДЦС-4 нь ТВФ-120-2У3 маркийн генератортай бөгөөд энэ генератор нь өндөр давтамжийн өдөөлтийн систем ашигладаг [6], [9] [10]. Өндөр давтамжийн өдөөгч нь хариу үйлдлийг хурдан болгох, төхөөрөмжийн хэмжээг багасгах, найдвартай ажиллагааг сайжруулах зэрэг давуу талтай байдаг. Иймээс ийм төрлийн өдөөлтийн системийг дунд чадлын турбогенераторуудад өргөн хэрэглэдэг.



1-р зураг. Өндөр давтамжийн хагас дамжуулагчийн өдөөлтийн системийн схем

Өдөөлтийн системийн хялбаршуулсан цахилгаан схемийг 1-р зурагт үзүүлэв. Өдөөгч нь индуктор хэлбэрийн, гурван фазын, 500 Гц-ийн синхрон генератор бөгөөд түүний бүх ороомгууд статор дээр байрласан байна. Үндсэн соронзон орны ороомог L1 нь үндсэн генераторын роторын өдөөлтийн ороомогтой дараалан холбогдсон байдаг. Харин L2 болон L3 ороомгууд нь зохицуулах үүрэгтэй бөгөөд эдгээрээр гүйх i2 болон i3 гүйдлийг MA2 ба MA3 соронзон өсгөгчөөр тэжээнэ.

Өдөөгчийн гаралтад uE гэсэн 500 Гц-ийн гурван фазын хувьсах хүчдэл үүсэх ба энэ хүчдэл нь шулуутгагч гүүрээр дамжин uRect гэсэн тогтмол хүчдэл болж хувирна. OEL блок нь хэт өдөөлтийн хязгаарлагч бөгөөд өдөөгчийн гаралтын хүчдэл нэрлэсэн хүчдэлийн (UEN) хоёр дахинаас ихсэхийг зөвшөөрдөггүй.

Соронзон өсгөгчүүд нь өдөөгчийн гаралтын хүчдэлээр тэжээгддэг бөгөөд тэдгээрийн үндсэн оролт нь генераторын хүчдэл болон өгөгдсөн лавлах хүчдэл хоёрын зөрүү юм. Өөрөөр хэлбэл, генераторын бодит хүчдэл шаардлагатай утгаасаа зөрөх үед энэ зөрүүгээр өдөөлтийн хэмжээг тохируулж, генераторын хүчдэлийг тогтворжуулдаг.

3 Өдөөлтийн системийн симуляц

IEEE-ийн хялбаршуулсан өдөөлтийн системийн загваруудыг харьцуулан авч үзвэл AC4A загвараас эхлэн тиристорын шулуутгагчтай систем болж байгаа бол үүнээс өмнөх зарим загварууд, тухайлбал AC1A нь диодон шулуутгагчтай бөгөөд хүчдэлийн тохируулгын тэжээл нь генератораас тэжээгддэг [2], [3]. Мөн үүний гэдрэг холбоос нь гол өдөөгчийн гүйдлээс авдгаараа судлагдаж буй системтэй ойролцоо шинжтэй гэж үзэж болно. Симуляц хийхийн өмнө системийн элементүүдийг сонгох шаардлагатай тул генератор болон өдөөлтийн системийн загварыг MATLAB/Simulink орчинд хэрэгжүүлэв [4], [5]. AC1A нь аналог төрлийн өдөөлтийн системийн загварчлалд хамаарах бөгөөд

ST2A загвартай харьцуулснаар системийн динамик шинж чанар, сайжруулах боломжийг үнэлэх боломжтой.

ГЕНЕРАТОРЫН ӨГӨГДӨЛ

1-Р ХҮСНЭГТ

Тип марк	$S_{хэв}$ MBA	$U_{хэв}$ kB	cosφ	Статорын ороомгийн холболт	$I_{хэв}$ kA
ТВФ-120-2УЗ	125	10.5	0.8	Y-Y	6.873

ГЕНЕРАТОРЫН ӨДӨӨЛТИЙН ТӨХӨӨРӨМЖ

2-Р ХҮСНЭГТ

Өдөөгч		
Тип марк	$U_{вхэв}$, В	$I_{в ном}$, А
ВТД-490-3000УЗ	280/560	1750/3500

ГЕНЕРАТОРЫН ӨДӨӨЛТИЙН ӨГӨГДӨЛ

3-Р ХҮСНЭГТ

Тип марк	Өдөөлт			
	$U_{fхэв}$ В	$I_{fх}$ А	$I_{fхэв}$ А	систем
ТВФ-120-2УЗ	296	634	1715	ВЧ

ГЕНЕРАТОРЫН ШИЛЖИЛТИЙН ЭСЭРГҮҮЦЛИЙН ӨГӨГДӨЛ

4-Р ХҮСНЭГТ

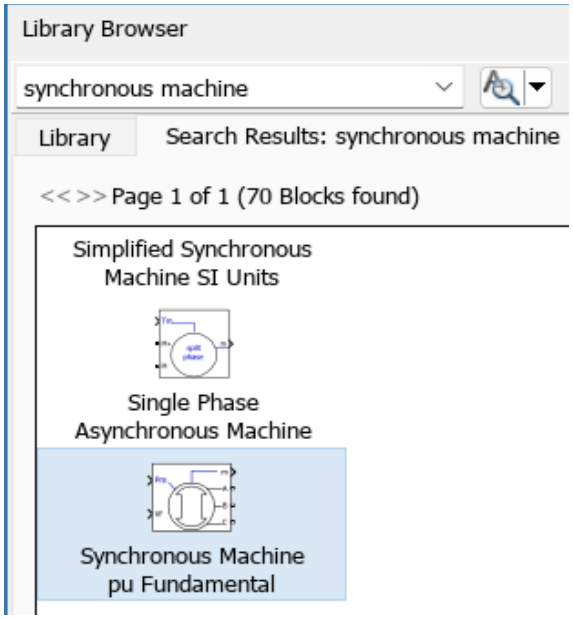
Тип марк	Эсэргүүцэл		
	X”d	X’d	xd
ТВФ-120-2УЗ	0.192	0.278	1.907

ГЕНЕРАТОРЫН ХУГАЦААНЫ ТОГТМОЛЫН ӨГӨГДӨЛ

5-Р ХҮСНЭГТ

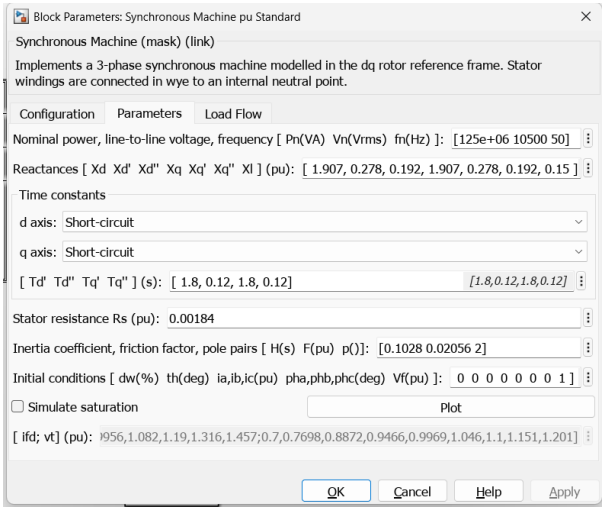
Тип марк	Хугацааны тогтмол, с	
	Td’	Td”
ТВФ-120-2УЗ	0.192	0.278

1-р хүснэгтэд генераторын ерөнхий үзүүлэлт болох чадал хүчдэл зэргийг үзүүлсэн бол 2, 3 дугаар хүснэгтэд өдөөлтийн параметрийг өгөв. Харин дараагийн 4, 5-р хүснэгтэд шилжилтийн параметрүүд өгөгдөв.



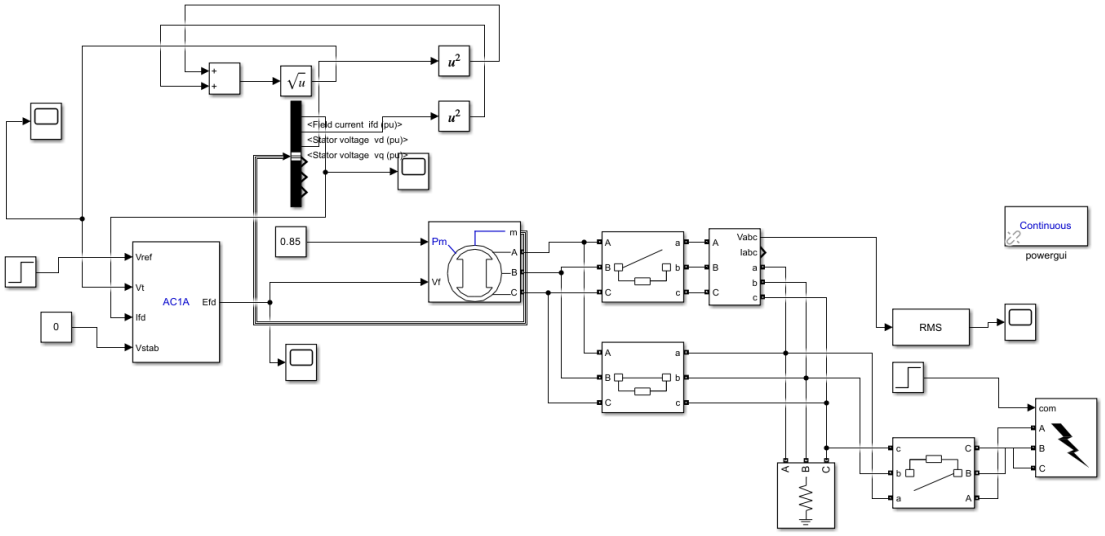
2-р зураг. Синхрон генератор

Генераторын хувьд нэгж нь харьцангуй нэгжид илэрхийлэгдсэн ба өдөөлтийн системийн загваруудын гаралт нь харьцангуй нэгжээр илэрхийлэгдэх тул 2_p зурагт илэрхийлэгдсэн Simulink загварыг Library manager цэсээс сонгоно. Мөн харьцангуй нэгжид илэрхийлэгдсэн (Synchronous machine pu, fundamental) генераторыг сонгосон шалтгаан нь d-q тэнхлэгийн өгөгдлүүдээр сонгогддог бөгөөд энэ нь манай генераторын өгөгдлийг оруулахад хялбар болгоно.

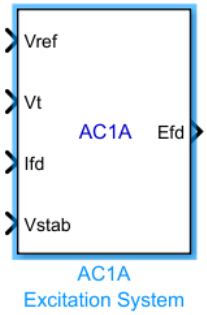


3-р зураг. Генераторын параметрүүд

3-р зурагт үзүүлсэн зурган дээрх генераторын өгөгдлийг хүснэгтээс авч хийх бөгөөд цилиндр ротортой синхрон генераторын хувьд d-q тэнхлэгийн утгууд ойролцоо байдаг ба гаднын үйлчлэлээс хамааран өөрчлөгдөх боломжтой ч ерөнхий нөхцөлд ойролцоо гэж авна.



4-р зураг. AC1A Simulink загварын симуляци хийх схем



5-р зураг. IEEE Simulink AC1A блок

AC1A загвар нь өндөр давтамжийн өдөөлтийн системтэй ойролцоо бөгөөд зураг-5 Simulink загварыг ашиглаж хуучны цахилгаан машины өдөөлтийн системүүдийг илтгэнэ. AC1A загварыг ашиглан зураг 4 дээрх схемийг холбосон. Схем нь AC1A-г гэдрэг холбож таслуур болон three-phase fault блокийг ашиглаж нөхцөл үүсгэх боломжтой.

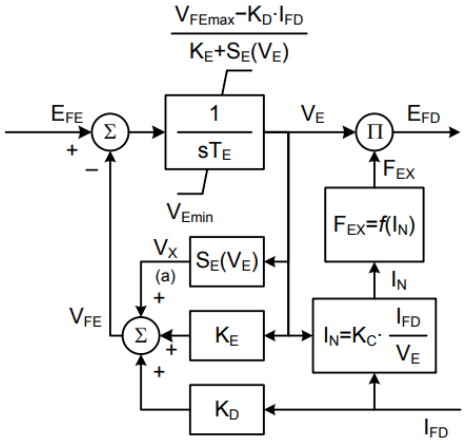
V_{ref} – Үлгэр жишээ утга буюу генераторын гаралтын хүчдэлтэй харьцуулна.

V_t – Генераторын гаралтын хүчдэл

I_{fd} – Өдөөлтийн гүйдэл

V_{stab} – хүчдэлийн тогтворжуулагч

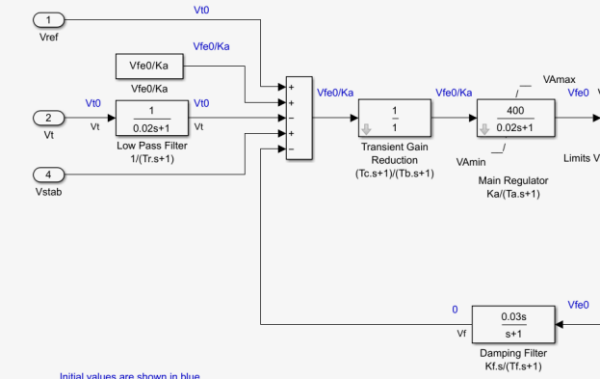
E_{fd} – Генераторын ротор өгөх өдөөлтийн хүчдэл



6-р зураг. IEEE AC1A загварын дамжуулалтын функцүүд

Зураг 6-д үзүүлсэн AC1A-ийн ерөнхий дамжуулалтын функц бөгөөд бодит амьдрал дээрх соронзон өсгөгч трансформатор гаднын нөлөө тогтсон параметр зэргийг тооцоход хүнд учир дамжуулалтын функц болгон эмхэтгэх шаардлагатай болдог. Зураг 6-д хялбаршуулан зарим параметрүүдийг орхисон тул Simulnk дахь блокийг Look under mask функцээр харах хэрэгтэй. Ингэснээр үл мэдэгдэх параметрийг задлах тодорхойлох явдал юм.

Зураг 7-д хүчдэлийн тохируулгын буюу хүчдэлийн зөрүүг хэмжиж өсгөх хэсэг байна.



7-р зураг. IEEE AC1A загварын дамжуулалтын функцийн оролтын алдааг хэмжих хэсэг

$$e(s) = V_{ref}(s) - \frac{V_t(s)}{(T_r \cdot s + 1)} + V_{stab}(s) - V_f(s) + \frac{V_{fe0}}{K_a} \quad (1)$$

Гол алдааг хэмжих хэсэг (зураг-7) ба үлгэр жишээ V_{ref} утгаас генераторын одоогийн V_t утгыг болон генераторын өдөөлтийн хүчдэл V_f – г харьцуулснаар ерөнхий алдаа гарч ирнэ. Шилжилтийн процессоос үүсэх өөрчлөлтийг багасгах зорилгоор 2-р томьёог ашиглана.

Үүнд:

T_r – Хэмжилтийн саатлын хугацаа

Шилжилтийн өсгөлт багасгах:

$$u(s) = \left(\frac{T_c \cdot s + 1}{T_b \cdot s + 1}\right) \cdot e(s) \quad (2)$$

Үүнд

T_c – Шүүлтүүрийн уламжлалын хугацааны тогтмол

T_b – Шүүлтүүрийн саатлын хугацаа [c]

Орж ирэх ба e(s) нь (1) т гарсан томьёо байна.

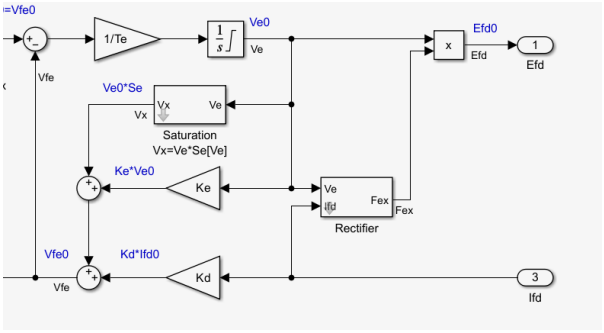
Зохицуулах хэсэг

$$E_{f0}(s) = \left(\frac{K_a}{T_a \cdot s + 1}\right) \cdot u(s) \quad (3)$$

Энэ хэсэгт Ka буюу өсгөгч орж ирэх ба энэ өсгөлтөөр оролтын сигнал болох e(s)-ийг өсгөнө. Өсгөснөөр алдааны хэмжээ ихсэж мэдэхэд хялбар болно. Үүнд өсгөлтийг эгшин зуурт хийж чадахгүй тул Ta хугацааны тогтмол орж ирнэ. Уян гэдрэг холболтоор гаралтыг оролттой харьцуулах шууд боломж үүсэх бөгөөд дохиог шүүх шаардлагатай. 1-р томьёог харвал V_f нь гэдрэг холбогдох ба задалж бичвэл K_f – тогтворжуулах нэмэлт салаа T_f – Тогтворжуулах салааны хугацааны тогтмол [c] V_{fe} нь шүүгдэхээс өмнөх сигнал

Шүүлтүүр:

$$V_f(s) = \left(K_f \cdot \frac{s}{T_f \cdot s + 1}\right) \cdot V_{fe}(s) \quad (4)$$



8-р зураг. IEEE AC1A загварын дамжуулалтын функцийн өдөөлтийн хэсэг

$$V_{fe}(s) = K_e \cdot V_e(s) + K_d \cdot I_{fd}(s) + L\{Ve(t) \cdot Se(Ve(t))\} \quad (5)$$

Үүнд:

K_e – Өдөөлтийн тогтмол

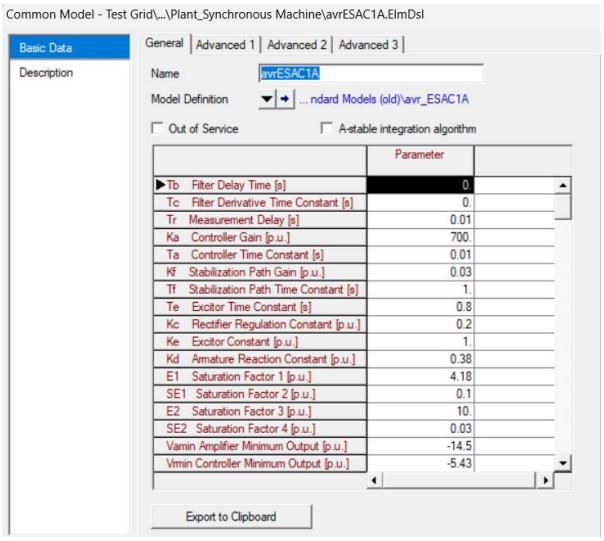
K_d – Арматурын хариу үйлдлийн тогтмол

E1, SE1, E2, SE2 — Ханалтын параметрүүд [p.u.] соронзон ханалт $S_E(E)$-ын муруйг тодорхойлох цэгүүд. Зураг 7-д үзүүлсэн хэсэг нь гол өдөөх хэсгийг илэрхийлсэн гэж үзэх ба гэдрэг холболт цахилгаан машин зэрэг байна.

$$V_e = \frac{u(s) - V_{fe}}{sT_e} \quad (6)$$

Үүнд:

T_e – Өдөөлтийн хугацааны тогтмол



9-р зураг. IEEE AC1A Powerfactory загварын параметрүүд

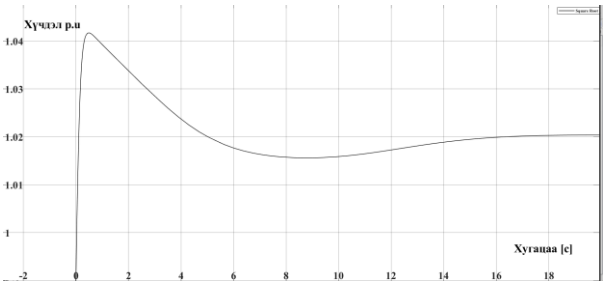
2%-ийн алхмын өөрчлөлтөөс үүсэх үр дүнг судлах ба хэвийн ажиллаж буй генераторт 2% өөрчлөлт гарахыг судлах юм.

Power factory-д AC1A загварыг оруулсны дараа параметрийн цонхыг (Зураг 9) ашиглаж өгөгдлийг өгнө. Параметрийн тайлбарыг хүснэгт 6-д үзүүлэв. Үүнээс практикт ихэнх нь тогтмол буюу төхөөрөмжөөс шалтгаалан сонгогддог.

ГЕНЕРАТОРЫН ӨДӨӨЛТИЙН ТӨХӨӨРӨМЖ

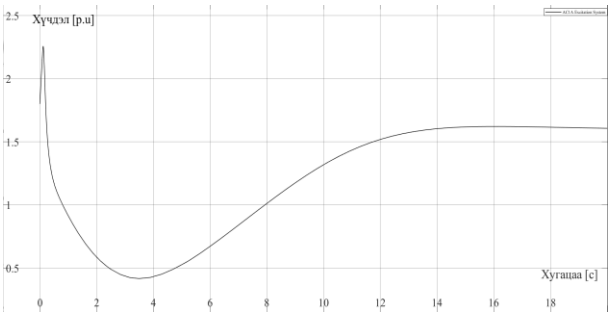
6-Р ХҮСНЭГТ

Тэмдэглэгээ	Тайлбар
Tb	Шүүлтүүрийн саатлын хугацаа
Tc	Шүүлтүүрийн уламжлалын хугацааны тогтмол
Tr	Хэмжилтийн саатлын хугацаа
Ka	Зохицуулагчийн өсгөлтийн коэффициент
Ta	Зохицуулагчийн хугацааны тогтмол
Kf	Тогтворжуулах сувгийн өсгөлтийн коэффициент
Tf	Тогтворжуулах сувгийн хугацааны тогтмол
Te	Өдөөлтийн хугацааны тогтмол
Kc	Тэгшитгэгчийн зохицуулалтын коэффициент
Ke	Өдөөлтийн тогтмол
Kd	Арматурын хариу үйлдлийн тогтмол
E1	Ханалтын 1-р цэг
SE1	Ханалтын 1-р коэффициент
E2	Ханалтын 2-р цэг
SE2	Ханалтын 2-р коэффициент
Vamin	Хүчдэлийн тохируулгын хамгийн бага гаралтын утга
Vrmin	Зохицуулагчийн хамгийн бага гаралтын утга



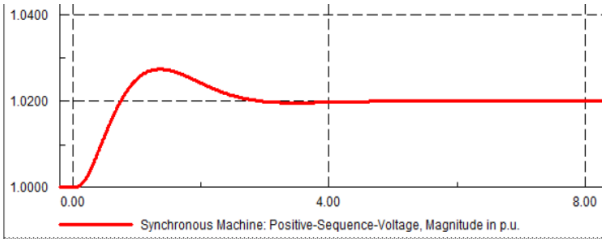
10-р зураг. IEEE AC1A загварын генераторын хүчдэл 2% өөрчлөлтөд үзүүлэх хариу үйлдэл

Зураг 10 дахь генераторын 2%-ийн өөрчлөлтөд үзүүлэх хариу үйлдэл нь 4 секундийн дараа тогтворжих ба харьцангуй удаан гэдэг нь харагдаж байна. Генераторын гаралтын хүчдэлийн хугацааны илэрхийлэмжийг зураг 11-д



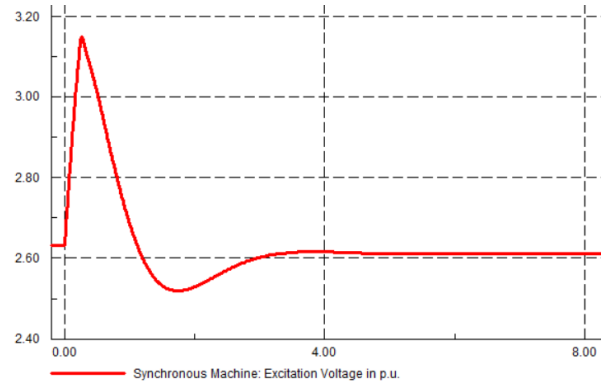
11-р зураг. IEEE AC1A загварын генераторын өдөөлтийн хүчдэл 2% өөрчлөлтөд үзүүлэх хариу үйлдэл

Генераторын өдөөлт нь 2% өөрчлөлтөнд 10 секундэд хариу үйлдэл үзүүлж тогтворжиж чадах нь харагдаж байна. – Тухайн Simulink-ийн симуляцийг Powerfactory-д ижил нөхцөлөөр туршиж үр дүнг зураг 12, 13-д үзүүлэв.



12-р зураг. IEEE AC1A Powerfactory загварын генераторын гаралтын хүчдэл 2% өөрчлөлтөд үзүүлэх хариу үйлдэл

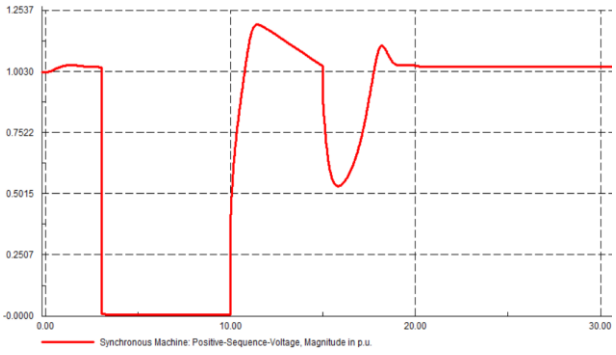
Хэлбэрийн хувьд төстэй ч параметрийн зөрүүтэй байдал нь 2 программын анхны өгөгдлөө тооцоолох зөрүү болон хадгалагдсан дамжуулалтын функцуудын загварчлалаас хамаарч алдаа үүсэж болно.



13 -р зураг. IEEE AC1A Powerfactory загварын генераторын өдөөлтийн хүчдэл 2% өөрчлөлтөд үзүүлэх хариу үйлдэл

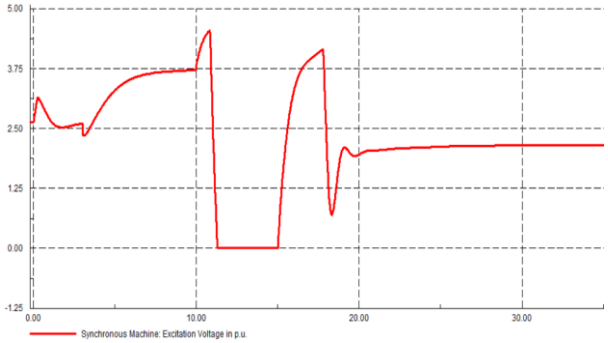
Генераторын хүчдэл өдөөлтийн хүчдэлтэй шууд хамааралтай гэдэг нь харагдаж байна.

Системд богино залгаа гарах үеийг үзвэл powerfactory программд event үүсгэх хэрэгтэй ба генераторын хамгаалалт хурдан ажиллагаатай байх шаардлага тавигддаггүй тул богино залгаа гарснаас хойш тодорхой хугацааны дараа таслах шаардлагатай болно үүнээс гадна таслуур таслах үед генераторын соронзон орныг унтраах шаардлагатай.



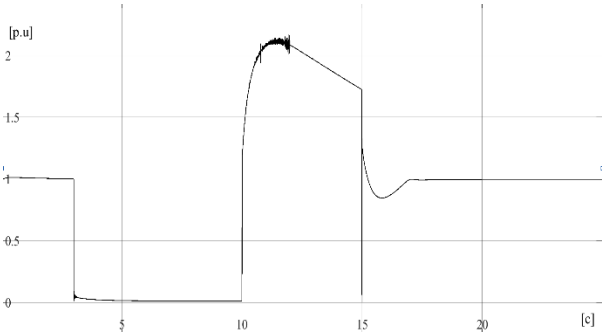
14-р зураг. IEEE AC1A power factory загварын генераторын өдөөлтийн хүчдэл богино залгааны дараа

Event нь 3 секундэд богино залгаа гарч 10 секундэд таслан 5 секундийн дараа эргэн залгах үеийг үзүүлэв.



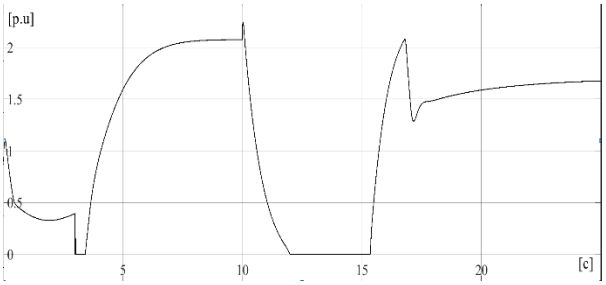
15-р зураг. IEEE AC1A загварын генераторын өдөөлтийн хүчдэл богино залгааны үед

Зураг 14, 15 зургуудад гарсан Powerfactory үр дүнгүүдийг харвал таслуур нь таслах үед өдөөлтийн хүчдэл болон генераторын хүчдэл өсөж байна. Харин генераторын хүчдэл тогтсон утгаа барихын тулд өөрийн утгаа давахад өдөөлт багасаж хүчдэлийг бууруулж байгаа нь харагдаж байна. барих гэж өссөөр байдаг. Залгаснаас хойш ойролцоогоор 10 секунд орчмын дараа тогтворжиж байгаа нь удаан бөгөөд тохируулга шаардлагатайг илтгэнэ. Симуляцын хувьд гол тохируулах элемент нь Ka ба Ka нь алдааг өсгөж хурдан тогтворжуулах хэдий ч хэт өсгөлт үүсгэснээр генераторыг гэмтээх эрсдэлтэй болно. Тиймээс хязгаарыг тогтоон, байж болох хамгийн өндөр утгыг авбал зохино. Ka нь соронзон өсгөгчийг илэрхийлнэ.



16-р зураг. IEEE AC1A Matlab загварын генераторын хүчдэл богино залгааны дараа

Богино залгааны үед Matlab программын тооцоолол нь арай өөр буюу таслуур, богино залгаа, ачаалал зэргүүд нь эгшин зуурд өгөгдөг тул огцом өөрчлөлтүүд гарч болно. Ерөнхий тохиолдол Powerfactory-д эдгээр нь гарч ирдэггүй ба Matlab-ийн тооцооллоос шалтгаалж болно.



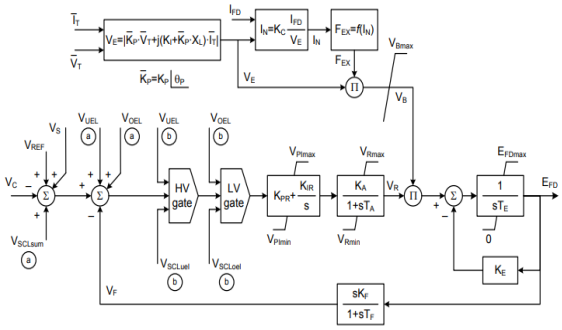
17-р зураг. IEEE AC1A Matlab загварын генераторын өдөөлтийн хүчдэл богино залгааны дараа

Зураг 16, 17 дахь үр дүнг харвал богино залгааны үеэс эхлэн генераторын хүчдэл зураг-11 унаж өдөөлтийн систем тухайн хүчдэлийг нөхөх гэж оролдох ба таслуур таслахад гүйдэл үгүй болж хүчдэл огцом ихсэх хандлагатай ба сул орхивол хүчдэл өссөөр байх тул өдөөлтийг багасгаснаар хүчдэл унаж байна. Таслуур залгагдах үед ачаалал огцом ихсэх үед хүчдэл огцом унаж энэ зөрүүг форсировк ашиглаж хэт өдөөлт хийснээр хүчдэлийн утгыг барьж чадна. Эдгээрийг харвал харьцангуй удаан тул ST2A загварыг ашиглаж үзье.

	Parameter	
Tr Measurement Delay [s]	0.02	
Ka Controller Gain [p.u.]	120.	
Ta Controller Time Constant [s]	0.15	
Te Excitor Time Constant [s]	0.5	
Ke Excitor Constant [p.u.]	1.	
Kf Stabilization Path Gain [p.u.]	0.05	
Tf Stabilization Path Time Constant [s]	1.	
Kc Excitation Current Factor [p.u.]	1.82	
Kp Voltage Factor [p.u.]	4.88	
Ki Current Factor [p.u.]	8.	
Vmin Controller Minimum Output [p.u.]	0.	
Vmax Controller Maximum Output [p.u.]	1.	
Efdmax Excitor Maximum Output [p.u.]	5.	

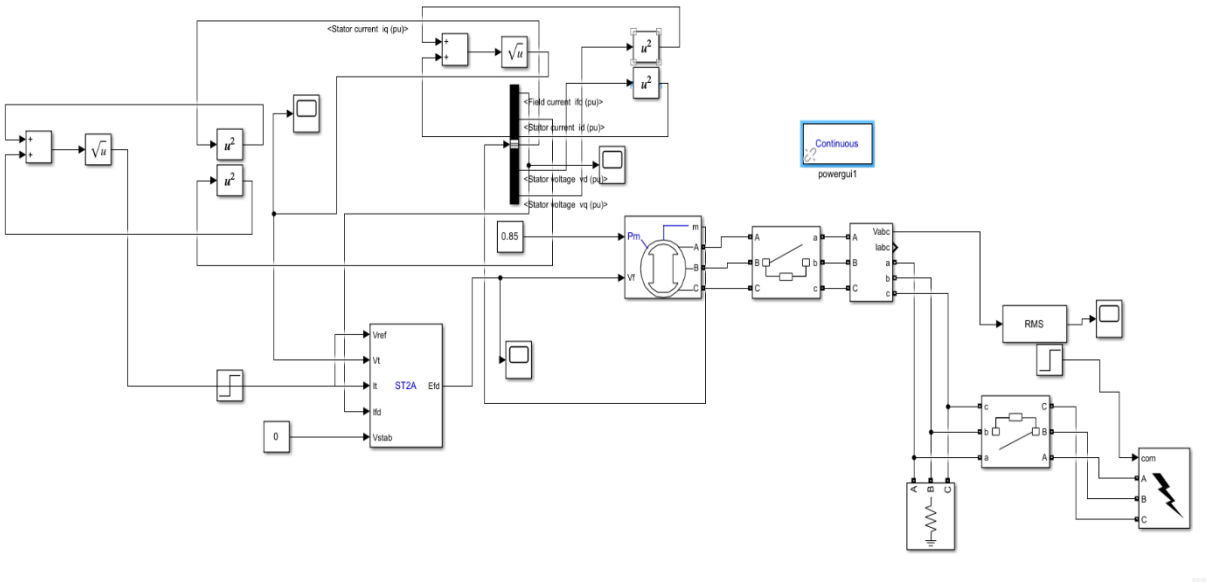
18-р зураг. IEEE ST2A Powerfactory загварын параметрүүд

Параметрийн хувьд Зураг 18 дахь ST2B нь AC1A загвартай адил параметртэй боловч гүйдлийн коэффициент k_i гүйдэл өсгөх хэсэгтэйгээрээ ялгаатай.



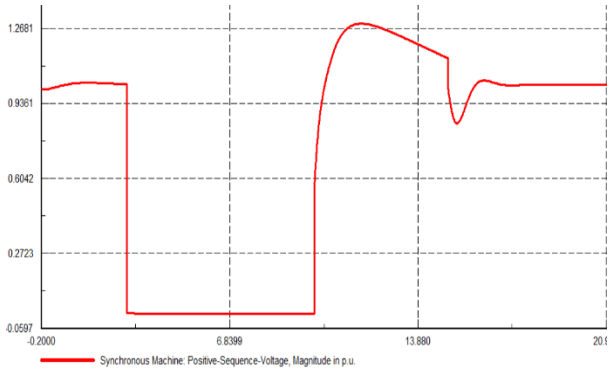
19-р зураг. IEEE ST2A загвар

Зураг 19-д дамжуулалтын функц байх ба гол онцлог нь гүйдлийн Компаундированийн төхөөрөмжтэй гэдэг нь харагдаж байна. Зураг 20-д ST2A загварын холболтын схем орж ирэх бөгөөд ST2A нь Зураг 6-аас ялгаатай нь генераторын гүйдлийг ашиглан өдөөлтийг удирддагаараа онцлогтой.

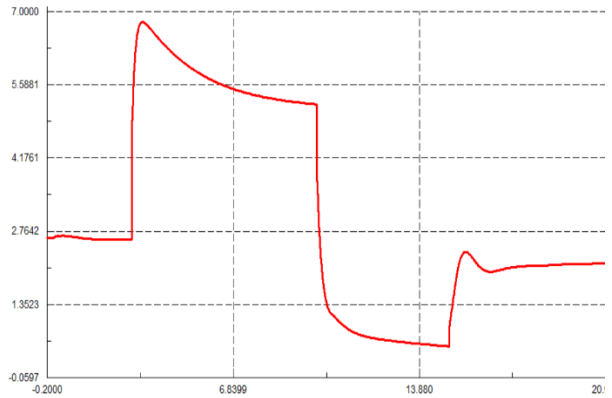


20-р зураг. ST2A Simulink загварын симуляци хийх схем

Өмнөх AC1A загвараас ялгаатай нь өдөөгчтэй уян гэдрэг холбоо үүсгэдэг.

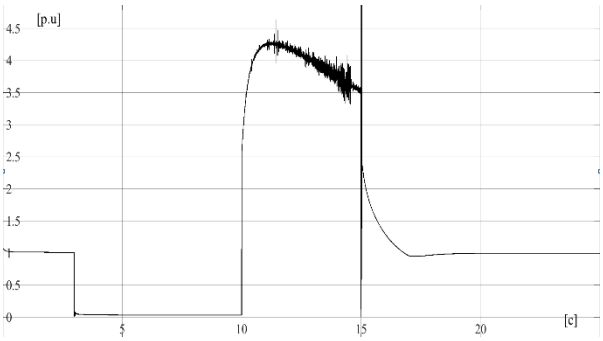


21-р зураг. IEEE ST2A Powerfactory загварын генераторын хүчдэл богино залгааны дараа

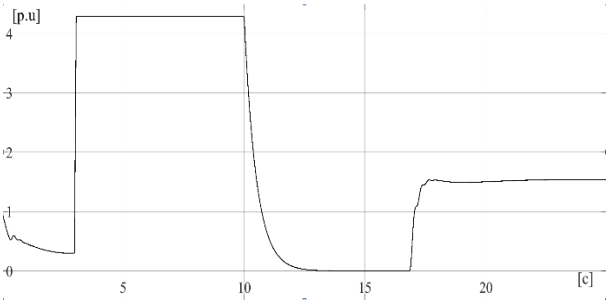


22-р зураг. IEEE ST2A Powerfactory загварын генераторын өдөөлтийн хүчдэл богино залгааны дараа

Зураг 21, 22-г харвал таслуур залгагдсанаас хойш генераторын хүчдэл 3-аас ихгүй секундэд тогтворжиж байгаа ба савлалт маш бага гарч байгаа тул өсгөгчийн утгыг нэмэгдүүлж болно. Өөр ажиглах зүйл нь залгагдах үед хүчдэлийн утга хурдан буурч байгаа нь өдөөлтийн системийн нөлөө нь илүү хүчтэй гэдэг нь харагдаж байна.



23-р зураг. IEEE ST2A Matlab загварын генераторын хүчдэл богино залгааны дараа



24-р зураг. IEEE ST2A Matlab загварын генераторын хүчдэл богино залгааны дараа

Matlab-ийн симуляц нь 23, 24-р зургууд нь Powerfactory программ зураг-21, 22-тэй харьцуулахад үр дүнгийн хувьд ижил гэдэг нь харагдаж байгаа боловч тооцооллын хувьд зөрүүтэй нь харагдаж байна.

III. Судалгааны үр дүн

Турбогенераторын өдөөлтийн системийн ажиллагааг PowerFactory болон MATLAB/Simulink орчинд загварчилж, үр дүнг харьцуулан шинжилсэн.

Өдөөлтийн системийн динамик хариу үйлдлийг үнэлэх зорилгоор өгөгдсөн хүчдэлд 2%-ийн шаталсан өөрчлөлт өгч, мөн богино залгааны үеийн болон гэмтэл арилсны дараах сэргэлтийн процессыг авч үзэв. Симуляцын үр дүнгээс харахад хоёр программ дахь хариу үйлдлийн ерөнхий хандлага ижил байсан боловч хэт өсөлт, тогтворжилтын хугацаа, шилжилтийн үеийн долгиолол болон гэмтлийн дараах сэргэлтийн хэлбэрт тодорхой ялгаа ажиглагдсан. Энэ нь загварын бүтэц, параметрийн сонголт болон тоон шийдлийн аргын ялгаатай байдлаас шалтгаалж болох юм. Гэсэн хэдий ч гарсан үр дүнгүүд нь өдөөлтийн систем генераторын хүчдэлийг тогтворжуулах, богино залгааны дараа хүчдэлийг сэргээх үндсэн үүргээ хангаж байгааг харуулсан. AC1A ба ST2A загваруудын харьцуулалтаас үзэхэд ST2A загвар нь шилжилтийн үеийн хариу үйлдлийг илүү нарийвчлалтай илэрхийлэх боломжтой байв. Учир нь ST2A загвар нь өдөөлтийн системийн нэмэлт динамик нөлөөлөл, хязгаарлалт AC1A-тай харьцуулахад илүү дэлгэрэнгүй тусгадаг тул богино залгааны үеийн болон гэмтэл арилсны дараах сэргэлтийн процессыг бодит ажиллагаанд илүү ойр дүрслэх боломжтой. Иймээс ST2A загвар нь өдөөлтийн системийн түргэн шилжилттэй горимын шинжилгээ, ялангуяа гэмтлийн дараах хүчдэл сэргэлтэд илүү тохиромжтой гэж үзэж болно. Гэсэн хэдий ч ST2A загвар нь бүтэц энгийн, тооцоолол харьцангуй хялбар тул өдөөлтийн системийн үндсэн динамик шинж чанарыг судлахад үр дүнтэй хэвээр байна.

Нөгөө талаас сойзгүй өдөөлтийн систем бүрэн шахагдаагүй хэвээр байна. Ялангуяа засвар үйлчилгээний давтамжийг багасгах, механик найдвартай ажиллагааг чухалчлах станцуудад энэ төрлийн шийдэл ашиглагдсаар байна. Siemens Energy нь статик болон сойзгүй өдөөлтийн аль алиныг санал болгодог бөгөөд сойзгүй систем нь өндөр найдвартай, бат бөх ажиллагаатай хэвээр байгааг тэмдэглэсэн. Гэвч том чадлын генераторын хурдан динамик хариу шаардсан нөхцөлд статик өдөөлт илүү давуу гэж үзэгдэж байна.

Иймээс олон улсын туршлагаас харахад ирээдүйн үндсэн чиглэл нь статик өдөөлтийн систем тоон автомат хүчдэл тохируулагч нэгдсэн тогтворжуулагч, хамгаалалт, оношилгооны функц бүхий ухаалаг шийдэл болж байна. Энэ нь турбогенераторын хүчдэлийн чанар, шилжилтийн үеийн тогтвортой байдал, ашиглалтын найдвартай ажиллагааг дээшлүүлэх гол нөхцөл болж байна.

IV. Дүгнэлт.

Энэхүү өгүүлэлд турбогенераторын өдөөлтийн системийн динамик шинж чанарыг PowerFactory болон MATLAB/Simulink орчинд загварчилж, үр дүнг харьцуулан судлав. Судалгааны хүрээнд хүчдэлд шаталсан өөрчлөлт өгөх болон богино залгааны үеийн шилжилтийн процессыг авч үзсэн бөгөөд хоёр программ дахь хариу үйлдлийн ерөнхий зүй тогтол үндсэндээ ижил байгааг тогтоов. Энэ нь турбогенераторын өдөөлтийн системийн загварчлал, шилжилтийн процессын үнэлгээнд хоёр программын аль аль нь инженерийн тооцоо, судалгаанд ашиглах боломжтойг харуулж байна.

Судалгааны үр дүнгээс харахад өдөөлтийн системийн үндсэн үзүүлэлтүүд болох хэт өсөлт, тогтворжилтын хугацаа, шилжилтийн үеийн хэлбэлзэл нь тохируулгын параметрүүдээс, ялангуяа автомат хүчдэл тохируулагчийн өсгөлтийн коэффициентоос ихээхэн хамаарч байна. Өсгөлтийн коэффициент ихсэхэд хариу үйлдэл түргэсэх боловч хэт өсөлт нэмэгдэх, харин багасахад систем илүү зөөлөн боловч тогтворжилт удаашрах хандлага ажиглагдав. Иймээс өдөөлтийн системийн тохируулгад хурд ба тогтвортой ажиллагааны хооронд зөв зохистой тэнцвэрийг сонгох шаардлагатай нь батлагдав.

Мөн богино залгааны үеийн симуляцын үр дүнгээс генераторын хүчдэл огцом буурч, өдөөлтийн систем албадмал өдөөлтийн горимоор ажиллан хүчдэлийг сэргээхийг оролддог зүй тогтол тодорхой харагдсан. Гэмтэл арилсны дараа хүчдэл болон өдөөлтийн хэмжигдэхүүнүүд аажмаар хэвийн төлөвт шилжиж байгаа нь өдөөлтийн системийн динамик үүргийг нотолж байна. Зарим тохиолдолд MATLAB/Simulink орчинд илүү их долгиолол, богино хугацааны хэт өсөлт ажиглагдсан нь загварын нарийвчлал, интеграцийн алхам, блокийн бүтэц болон параметрийн ялгаатай байдалтай холбоотой гэж үзэв.

Олон улсын туршлагаас харахад орчин үеийн том чадлын турбогенераторуудад статик өдөөлтийн системийг тоон автомат хүчдэл тохируулагчтай хослуулан ашиглах чиг хандлага давамгайлж байна. Үүний гол давуу тал нь хурдан хариу үйлдэл, хүчдэлийн чанарыг сайжруулах боломж, реактив чадлын зохицуулалт, системийн тогтворжилтыг дэмжих чадвар юм. Иймээс турбогенераторын найдвартай ажиллагаа, шилжилтийн үеийн тогтвортой байдлыг сайжруулахад өдөөлтийн системийн зөв сонголт, зөв тохируулга онцгой ач холбогдолтой гэж дүгнэж байна. ST2A статик өдөөлтийн систем нь хэдийгээр хуучин боловч хариу үйлдлийн хувьд цахилгаан машины өдөөлтийн системээс хэд дахин илүү болох нь мэдэгдэж байна.

Цаашид энэхүү судалгааг бодит генераторын туршилтын өгөгдөлтэй тулган баталгаажуулах, мөн системийн бусад ажиллагааны горимуудтай уялдуулан илүү өргөн хүрээнд судлах нь зүйтэй.

V. Ашигласан материал

[1] [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.

[2] IEEE Power and Energy Society, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std 421.5-2016, Aug. 26, 2016.

[3] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies." IEEE Standard, Vol. 421, No. 5, 2005 (Revision of IEEE 521.5-1992).

[4] MathWorks, "Excitation System," *Simscape Electrical Documentation*. [Online]. Available: MathWorks documentation. Accessed: Mar. 13, 2026

[5] DIgSILENT GmbH, *DIgSILENT PowerFactory User Manual*, Gomaringen, Germany, 2013.

[6] Б. Мандах, Ж. Арсдан, *Цахилгаан системийн реле хамгаалалт, автоматик*. Улаанбаатар, Монгол: ШУТИС, 2023

[7] IEEE Std 421.5-1992. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. N.Y.: IEEE, 1992.

[8] Kundur P. Power System Stability and Control. — N.Y.: McGraw-Hill, 1993

[9] Bezrukikh, P.P. Ventilnye sistemy vozbuzhdeniya sinkhronnykh mashin. MEI, Moscow, 1977.

[10] Solovyov I.I. Avtomatitcheskoe regulirovaniye vozbuzhdeniya sinkhronnykh generatorov bolshoy moshshnosti s mashinno — polyprovodnikovymi sistemami vozbuzhdeniya vypryamlennym tokom povyshennoy tchastoty. MEI, Moscow, 1975.

[11] IEEE Std 1110-2002, IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses.

[12] IEEE 100, The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms

[13] IEC 60034-16:1991 Rotating Electrical Machines—Part 16: Excitation Systems for Synchronous Machines

[14] IEEE Committee Report, “Excitation System Models for Power Systems Stability Studies,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, pp. 494–509, February 1981.

МИКРОКОНТРОЛЛЁР АШИГЛАН FFT АЛГОРИТМД ТУЛГУУРЛАН ХҮЧДЭЛИЙН ГАРМОНИК ШИНЖИЛГЭЭНИЙ БОДИТ ЦАГИЙН ХЯНАЛТЫН СИСТЕМИЙГ ХӨГЖҮҮЛЭХ НЬ

Гантулгын ӨСӨХБАЯР[1], Төмөрбаатарын МӨНХЗУЛ[2], Батсүхийн ДОРЖСҮРЭН[3], Батбаатарын ХАНДСҮРЭН[4], Бандийн ТҮВШИНБАЯР[5]

Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: tuvshinbayar.b@must.edu.mn[5]

Хураангуй: **Орчин үеийн цахилгаан эрчим хүчний системд хиймэл оюун ухаан, тоон технологи хэрэглээнд маш хүчтэй нэмэгдсээр байна. Тус технологиуд нь маш нарийн тохиргоотойгоос гадна цахилгаан эрчим хүчний хэлбэлзэл болон дээд гармоникийн нөлөөнд хэт мэдрэг байдаг. Тиймээс эдгээр төхөөрөмжүүдэд чанартай цахилгаан хангамжийн эх үүсвэр шаардлагатай байдаг. Мөн түүнчлэн эдгээр технологид ашиглагдаж буй тоног төхөөрөмжүүд нь хагас дамжуулагч элементийн бааз дээр суурилсан өндөр хурдтай таслах, залгах элементүүд болон их хэмжээний шугаман бус элементийг өөртөө агуулж байдаг. Тус элементүүд нь буцаад цахилгаан хангамжийн сүлжээнд үндсэн давтамжаас өндөр давтамжтай гармоникийн гажуудлыг нэмэгдүүлж байдаг. Тус гармоникийн гажуудал нь тоног төхөөрөмжийн хэт халалт, насжилт, ашигт үйлийн коэффициент, тоон төхөөрөмжийн буруу ажиллагаа зэрэгт сөрөг нөлөө үзүүлдэг. Эрчим хүчний систем дэх гармоникийг хэмжих зориулалттай өндөр нарийвчлал бүхий төхөөрөмж (Fluke, Hioki, Megger, SATEC гэх мэт)-үүд ашиглагддаг боловч үнэ өртөг ихтэй тул жижиг, дунд хэмжээний аж ахуй нэгж, үйлдвэрийн газрууд ашиглахад хүндрэлтэй байдаг. Энэхүү өгүүлэлд бид ESP32 микроконтроллёр дээр суурилсан FFT алгоритм ашиглан нэг фазын цахилгаан сүлжээний хүчдэлийн гармоникийн утгуудыг бодит цагийн горимд задлан шинжилж, THD-ийг автоматаар тооцоолон харуулах функц бүхий хяналтын системийг загварчилж, бодитоор угсарсан. Мөн тус төхөөрөмжийн хэмжилтийн утгыг үйлдвэрийн жишиг төхөөрөмжтэй харьцуулж үр дүнг харуулсан болно.**

Түлхүүр үг: Гармоник гажуудал, Хүчдэлийн чанар, ESP32, THD, DC офсет

I. УДИРТГАЛ

Эрчим хүчний системийн гол зорилго нь хэрэглэгчдийг найдвартай, чанартай эрчим хүчээр тасралтгүй хангах явдал юм. Цахилгаан эрчим хүчний системийн найдвартай, тасралтгүй ажиллагаа нь орчин үеийн аж үйлдвэр, эдийн засаг, нийгмийн хөгжлийн үндэс суурь болдог. Тэгвэл тоон технологи нь дэлхий нийтээр бүх салбарт маш хүчтэй хэрэглээнд нэвтэрснээр эрчим хүчний чанар гэх асуудал анхаарлын төвд хүчтэй орж ирсэн. Эрчим хүчний чанарын асуудлын хамгийн гол төлөөлөл бол хүчдэлийн гармоникийн асуудал юм [1]. Хүчдэлийн гармоникийн улмаас тоног төхөөрөмжийн хэт халалт, насжилт, ашигт үйлийн коэффициент, тоон төхөөрөмжийн буруу ажиллагаа зэрэг сөрөг нөлөө үзүүлдэг. Тиймээс бүх төрлийн үйлдвэрлэлийн салбарт ашиглагдаж буй хүчний электроникийн төхөөрөмжүүд болох инвертер, шулуутгагчууд, судалгааны болон мэдээллийн технологийн салбарт ашиглагдаж буй энгийн болон супер компьютерууд, дата төвүүд, эмнэлгийн салбарт ашиглагдаж буй өндөр нарийвчлалтай компьютер томограф (CT), рентген аппарат, соронзон резонанс зураглалын (MRI) машин зэрэг төхөөрөмжүүд нь өндөр чанартай, ямар нэг гажилтгүй цэвэр суурь давтамж бүхий цахилгаан эрчим хүчийг шаардаж байна [2-3].

Мөн түүнчлэн дээрх төхөөрөмжүүд нь их хэмжээний шугаман бус ачаалал болон хагас дамжуулагч элементийн бааз дээр суурилсан өндөр хурдтай таслах, залгах элементүүдийг агуулсан байдаг тул өөрсдөө гол хүчдэлийн гармоникийн үүсгэгч болж байдаг [4]. Эдгээр элементүүдийн нөлөөгөөр нь гүйдэл, хүчдэлийн синусоид хэлбэрт өөрчлөлт орж тасалдсан буюу импульс хэлбэртэй болдог тул цахилгаан сүлжээнд гармоник гажуудал үүсгэх үндсэн шалтгаан болж байна [5].

Эрчим хүчний системд чанарын үзүүлэлтийг хэмждэг Fluke, Hioki, Megger, SATEC зэрэг тусгай зориулалтын хэмжилтийн төхөөрөмжүүд байдаг ба эдгээр төхөөрөмжүүд нь нарийвчлал сайтай боловч үнэ өртгийн хувьд өндөр байдаг тул хэрэглээнд тархмал биш байдаг. Энэхүү өгүүлэлд бид ESP32 микроконтроллёр ашиглан хүчдэлийн эгшин зуурын утгуудыг өндөр нарийвчлалтай хэмжиж, тоон хэлбэрт хувирган FFT (Fast Fourier Transform) алгоритмын тусламжтайгаар давтамжийн бүрэлдэхүүнд задлан анализ хийж, үүнээс гармоник тус бүрийн гажуудал болон нийт гармоникийн гажуудал (THD)-ийг тодорхойлох боломжтой өртөг багатай бодит цагийн хяналтын системийг загварчилсан бөгөөд хэмжилтийн үр дүнг зах зээл дээр зарагдаж буй хэмжүүрийн төхөөрөмжтэй харьцуулж үзсэн болно.

II. ОНОЛЫН ХЭСЭГ

Дээд давтамжийн гармоникийг ерөнхийд нь шугаман бус элементээс үүссэн буюу үндсэн давтамжийн натурал тоон үржвэрүүдтэй тэнцүү давтамжийн гармоникууд болон өндөр хурдны таслах, залгах төхөөрөмжүүдийн ажиллагааны давтамжийн гармоникууд гэж ангилж болно. Практикт таслах, залгах төхөөрөмжийн ажиллагааны давтамж бүхий дээд гармоникийг тухайн төхөөрөмж дээр шүүлтүүр суурилуулж өгснөөр стандарт хэмжээнд барьж, системд үзүүлэх нөлөөлөл нь харьцангуй бага байдаг бол шугаман бус элементийн үүсгэж буй үндсэн давтамжийн натурал тоон үржвэрүүдтэй тэнцүү давтамж бүхий гармоникууд нь

илүү их сөрөг нөлөөг дагуулдаг тул тус өгүүлэлд бид энэ төрлийн гармоникийг авч үзсэн.

Шугаман бус элементээс үүссэн буюу үндсэн давтамжийн натурал тоон үржвэрүүдтэй тэнцүү давтамж бүхий гармоникуудыг эрэмбээр нь 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ... n дугаар гармоник гэж нэрлэдэг. Тухайн n дугаар эрэмбийн гармоникийн давтамжийг олохын тулд (1)-р тэгшитгэлийг ашиглана.

$$f_n = f_{base} * n \qquad (1)$$

энд: f_n- n дугаар гармоникийн давтамж, f_{base}- үндсэн давтамж, n – гармоникийн эрэмбийн дугаар.

Харин нийлбэр гажилтын хэмжээг тодорхойлдог үзүүлэлт болох нийт гармоникийн гажилтыг (Total Harmonic Distortion; THD) (2)-р тэгшитгэлээр олдог.

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \cdots + U_n^2}}{U_1} * 100\% \qquad (2)$$

энд: U_n - n дугаар гармоникийн утга, f_{base}- үндсэн давтамж, n – гармоникийн эрэмбэ.

Сондгой гармоникууд бараг бүх төрлийн хэрэглэгчдийн цахилгаан шугам сүлжээнд бий болдог. Харин тэгш гармоникууд зөвхөн тэгш бус хэмтэй системд илэрдэг. Тиймээс практикт сондгой гармоникуудад онцгой анхаардаг.

Фурьегийн хувиргалт нь ямар ч хэлбэртэй үечилсэн дохиог янз бүрийн давтамжтай цэвэр синусойд хэлбэртэй дохионуудын нийлбэр байдлаар задлах боломжийг олгодог ((3)-р тэгшитгэл).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t}\,dt \qquad (3)$$

Тиймээс хүчдэлийн долгионы эгшин зуурын утгуудыг хэмжиж авсан тохиолдолд Фурьегийн хувиргалтын тусламжтайгаар дээд гармоникийн давтамжийн бүрэлдэхүүнүүдэд задалж харах боломжтой болно. Тус өгүүлэлд Python программчлалын хэл ашиглан FFT хувиргалтыг гүйцэтгэсэн.

Фурьегийн хувиргалтын үед гол анхаарах зүйл бол хэмжилтийн өгөгдлийн түүвэрлэлтийн давтамж (sampling frequency) байдаг. Найквистын шинжүүрээр бол түүвэрлэлтийн давтамж нь хувиргалтын хамгийн их давтамжаас 2 дахин их байх ёстой байдаг. Тиймээс дээд эрэмбийн гармоникийн утгуудыг судлах шаардлагатай бол өндөр түүвэрлэлтийн давтамжтай төхөөрөмж ашиглах шаардлагатай ((4)-р тэгшитгэл) [6].

$$f_{sam} > 2 * f_{max} \qquad (4)$$

энд: f_{sam} – түүвэрлэлтийн давтамж, f_{max} – фурьегийн хувиргалтаар гаргаж болох хамгийн их давтамж.

Мөн түүнчлэн улс орон бүр цахилгааны чанарт хяналт тавихдаа өөрийн орны онцлогт тохирсон стандарт, хэм хэмжээг боловсруулан мөрдөж байна. Тухайлбал: Европын орнууд олон улсын цахилгаан техникийн комиссоор батлагдсан IEC 61000-4-30 стандарт, EN 50160, ОХУ-д ГОСТ13109-97, БНХАУ-д GB/T 12325-2003, Норвегид NVE -068-2010, Өмнөд Африкт NRS-048-2 зэрэг стандартуудыг мөрддөг бол Монгол улсын хувьд MNS1778:2007 стандартыг мөрдөж байна [7-8]. Ихэнх орны хувьд 50-р гармоник (2.5 кГц) хүртэл стандартчилсан байдаг.

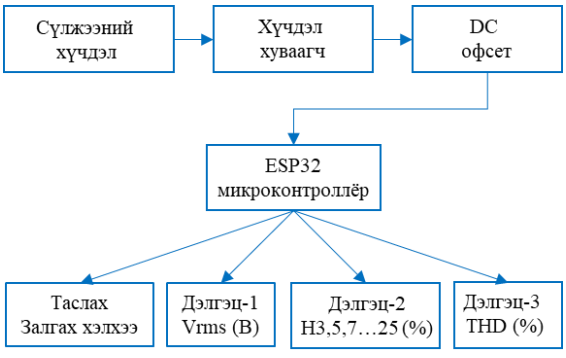
III. ХҮЧДЭЛИЙН ГАРМОНИКИЙН ХЯНАЛТЫН СИСТЕМИЙН ЗАГВАРЧЛАЛ

Тус өгүүллийн хүрээнд 1 фазын 50 Гц-ийн давтамжтай, 220 В хүчдэлийн сүлжээнд зориулсан хүчдэлийн гармоникийн бодит хугацааны хяналтын системийг хөгжүүлэхээр зорсон. Бидний хөгжүүлж буй системийн бүтцийн схемийг 1-р зурагт үзүүлэв. Тус хяналтын системийг дэлгэц дээр 25-р Гармоник хүртэлх сондгой гармоник болон THD утгуудыг гаргах бөгөөд өөр тохируулсан тавилын дагуу хүчний хэлхээг удирдах зориулалт бүхий реле модультай байхаар загварчилсан [9].

Хяналтын системийг загварчлахдаа тооцоолох дээд давтамжийг 25-р гармоник буюу 1.25 кГц байхаар сонгож авсан. Учир нь тусгай зориулалтын гармоник хэмжилтийн төхөөрөмж (SATEC)-р сүлжээний 1 фазыг хэмжихэд 25-р гармоникаас цааш гармоникийн гажуудал илрэхгүй байсан. Тус давтамжид харгалзах хамгийн бага түүвэрлэлтийн давтамж нь Найквистын шинжүүрээр 5 кГц гарсан.

Хэмжилтийн гол тооцооллыг гүйцэтгэхээр ESP32 микроконтроллёрыг сонгож авсан. ESP32 нь 240 МГц хоёр цөмт процессортой ба аналог утга уншигч (ADC) нь 0-3.3 В-ын хооронд зөвхөн эерэг давлагааны утгыг уншиж ажиллахаас гадна амплитуд утгаар тооцоолол хийдэг онцлогтой. Төхөөрөмжийг загварчлахдаа үндсэн давтамжийн 1 үед 256 ширхэг утга авч түүвэрлэлтийн давтамжийн утгыг f_{sam} = 12.8 кГц байхаар буюу Найквистын шинжүүрийг хангахаар авсан.

ESP32 микроконтроллёрын аналог оролт нь зөвхөн нэмэх туйлтай бөгөөд 0.5-2.5 В-ын хооронд гаднын шуугианд нөлөөлөхгүй хамгийн сайн ажилладаг. Тиймээс оролтын 220 В-ын хүчдэлийн утгыг тус түвшинд тохируулан бууруулахын тулд



1-р зураг. Хүчдэлийн гармоникийн бодит хугацааны хяналтын системийн бүтцийн схем

хүчдэл хуваагуур ашигласан бол нэмэх туйл руу шилжүүлэхийн тулд багтаамжийн элемент бүхий хэлхээ ашиглан DC офсет хийсэн. 2-р зураг хөгжүүлж буй системийн холболтын схемийг үзүүлэв.

Хэлхээг угсран турших явцад хүчдэл хуваагч эсэргүүцэл R_1-ийн чадал болон эсэргүүцлийн хэмжээг өндөр утгатай тохируулахгүй бол халалт үүсэж шатах магадлалтай. R_1 эсэргүүцлийг сонгохын тулд 3 удаа (300 кΩ, 600 кΩ, 980 кΩ)-ийн туршилт хийсний үр дүнд 5 Вт-ын чадалтай 980 кΩ эсэргүүцлийг дулааны үйлчлэлээр нь сонгож авсан. R_2 эсэргүүцлийн хувьд R_1 эсэргүүцлийн утгад тулгуурлан 2.93 кΩ байхаар тооцоолсон. Тус эсэргүүцлүүд дээрх чадлыг тооцоолж үзвэл:

$$P_{R_1} = U^2 R_1 = 0.146 \text{ мВт} \quad (4)$$

$$P_{R_2} = U^2 R_2 = 49.1 \text{ мВт} \quad (5)$$

гарч байгаа нь эсэргүүцлийн даах чадлаас бага тул хэлхээний хувьд аюулгүй байна.

Тус хүчдэл хуваагуурыг ашигласнаар хоёрдогч талд буюу R_2 эсэргүүцэл дээр унах хүчдэлийн утга нь тооцоогоор

$$U_2 = U\frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.65 \text{ В} \quad (6)$$

байхаар тохируулсан.

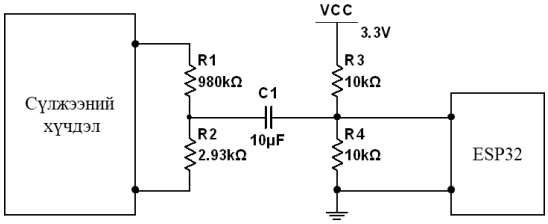
Үүний дараа DC офсет хийхийн тулд хүчдэл хуваагчийн хэлхээ дээр C_1 конденсатор болон R_3, R_4 нэмэлт эсэргүүцлийн тусламжтай ESP32-ийн Vcc хүчдэлийн хөлнөөс нэмэлт хүчдэл авснаар хүчдэл хуваагчаас гарч буй хүчдэл нь 1.625 В-оор дээш өргөдөж ESP32-ийн оролтод ирэх хүчдэлийн дээд, доод хязгаарын утгуудыг тооцоолбол:

$$U_{max} = U_{DC} + U_2\sqrt{2} = 2.55 \text{ В} \quad (7)$$

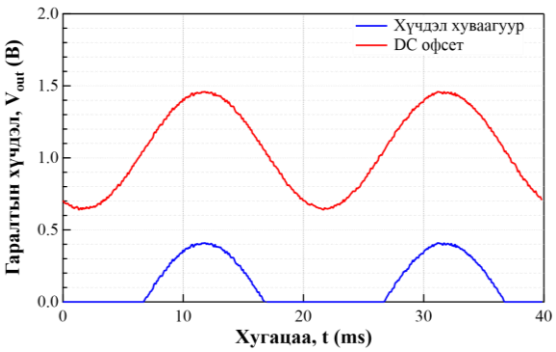
$$U_{min} = U_{DC} - U_2\sqrt{2} = 0.69 \text{ В} \quad (8)$$

гарч байгаа бөгөөд дан нэмэх утга бүхий хүчдэл байна. Хүчдэл хуваагуур болон DC офсет хэлхээний гаралтын долгионы хэлбэрийг 3-р зураг үзүүлэв.

Багтаамжийн элемент нь давтамжаас хамаарч эсэргүүцлээс өөрчилдөг тул DC офсет хийх хэлхээнд багтаамжийн элемент оруулж өгсөн нь өндөр хэмжилтийн үед үр дүнд сөргөөр нөлөөлөх боломжтой. Тиймээс бид тус хэлхээний багтаамжийг гурван өөр утгад сонгож харьцуулсан.



2-р зураг. Хүчдэлийн гармоникийн бодит хугацааны хяналтын системийн холболтын схем



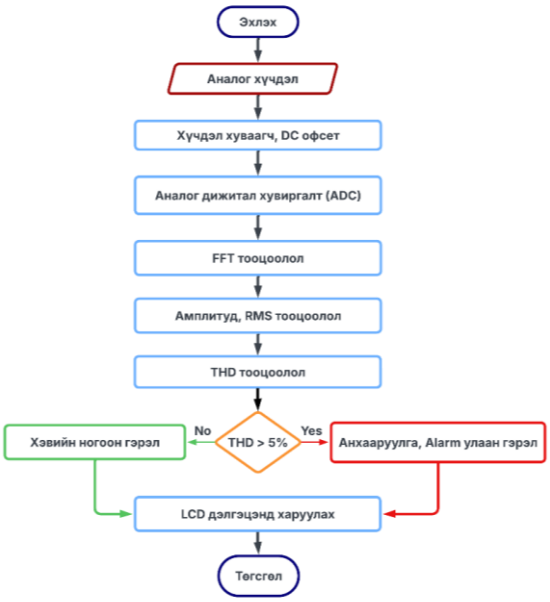
3-р зураг. Хүчдэл хуваагуур болон DC офсет хэлхээний гаралтын долгион

1-Р ХҮСНЭГТ DC ОФСЕТ ХЭЛХЭЭ - БАГТААМЖИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

C (μF)	X_C (Ω)	f_c (Hz)	Тайлбар
0.1	31.83	543	Үндсэн давтамжийг блоклоно.
1	3.183	54.3	Үндсэн давтамжийг блоклоно.
10	31.83	5.43	Үндсэн давтамжийг чөлөөтэй нэвтрүүлнэ.

Харьцуулалтыг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв. Тухайн багтаамжийн утгаас хамаарч хэлхээ өндөр давтамжийг нэвтрүүлэх шүүлтүүрийн зарчмаар ажиллах бөгөөд хамгийн оновчтой утга нь 10 мкФ байсан. Тус утгад харгалзах давтамжийн доод хязгаар нь үндсэн давтамжаас 9 дахин бага байсан тул хэмжилтийн утгад нөлөөлөхгүй гэж үзсэн.

Хүчний хэсгээс орж ирсэн хүчдэлийн утгыг Python программчлалын хэл ашиглан FFT хувиргалтыг гүйцэтгэсэн [10-11]. Тус хувиргалтыг үр дүнг дэлгэцэд харуулах мөн тавилын утгаас давсан бол гаралтын реле модулийг ажиллах байдлаар программчилсан. Хяналтын системийн ажиллах алгоритмыг 4-р зурагт үзүүлэв.



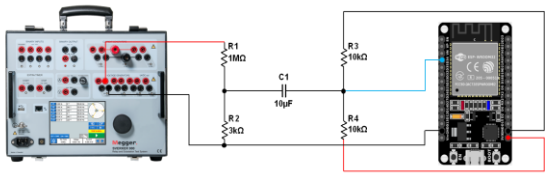
4-р зураг. хүчдэлийн гармоникийн бодит хугацааны хяналтын системийн алгоритм

IV. Туршилтын үр дүн

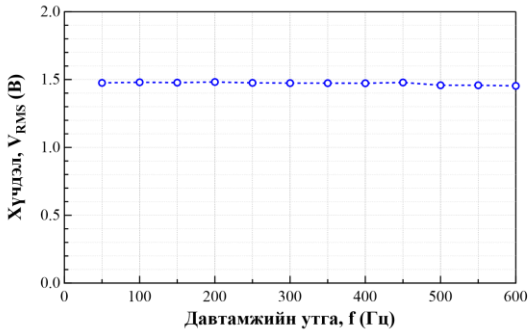
Өмнөх хэсэгт дурдсаны дагуу хүчдэлийн гармоникийн бодит хугацааны хяналтын системийг угсарч анхны загварыг хийсэн бөгөөд тус загварын ажиллагааг шалгахын тулд Megger Sverker900 загварын туршилтын стентээс өөр өөр давтамж (50Гц -ээс 600Гц) бүхий 220 В-ийн хүчдэлийг хяналтын системд өгсөн. Туршилтын үеийн холболтын схем болон хэмжилтийн үр дүнг 5 болон 6-р зурагт үзүүлэв.

Туршилтын үр дүнгээс харахад давтамжийн утга өөрчлөгдөхөд ESP32 дээр ирж буй хүчдэл нь бараг тогтмол буюу бид тухайн төхөөрөмжийн ажиллагаа дээд гармоникийн үед амплитудын өөрчлөлтгүй буюу хазайлт нь хамгийн ихдээ 1.3%-тай байна. Тус үр дүнгээс тухайн системийн хүчний хэлхээ нь дээд гармоникийн утгад өөрчлөлт оруулахгүй гэж дүгнэж болно.

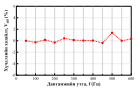
Тухайн хэмжилтээр авсан дохионы сунгаж харсан утгыг 8-р зурагт үзүүлэв. Хэрэв Megger-ийн стентээс өгсөн хүчдэлийг цэвэр синусойд гэж үзвэл тус графикаас харахад хяналтын систем дээр хэмжигдсэн



5-р зураг. Туршилтын үеийн холболтын схем (өөр өөр давтамжтай оролтын хүчдэлийн үед)



6-р зураг. Өөр өөр давтамжтай үе дэх ESP32 дээрх хүчдэлийн утга



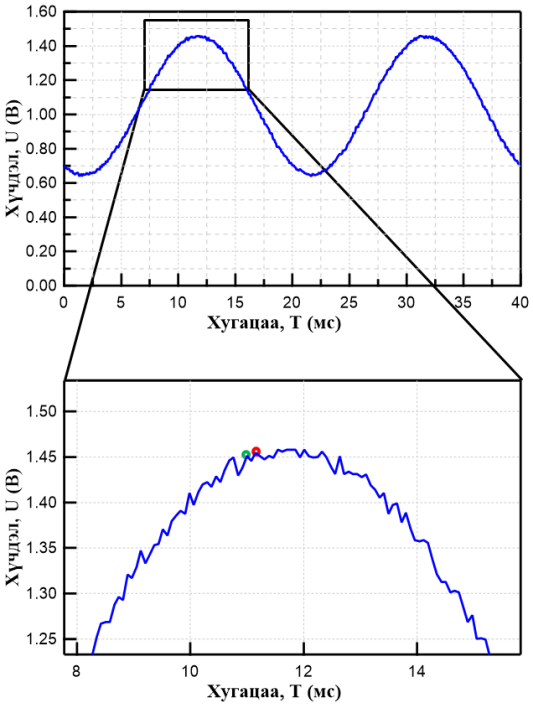
7-р зураг. Хүчдэлийн хазайлт (үндсэн давтамжийн хүчдэлтэй харьцангуй)

орчны шуугианы давтамж нь орой хэсгийн хэмжилтийн утгаас тооцоолж үзвэл.

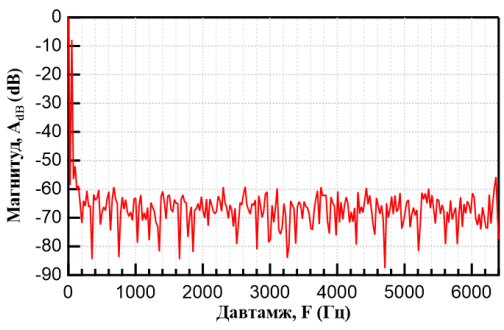
$$\Delta t = t2 - t1 = 0.156 \text{ мс} \quad (9)$$

$$f_{noise} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{0.156} \approx 6.4\text{кГц} \quad (10)$$

Шуугианы давтамж нь 6.4 кГц гарч байгаа нь үндсэн давтамж болох 50 Гц-д харьцуулбал 128 дугаар гармоник болох бөгөөд бидний хэмжих хязгаар болох 25 дугаар гармоникоос хэт өндөр байгаа тул орчны шуугианы нөлөөг тооцохгүй байж болно гэж үзсэн. Мөн түүнчлэн тус дохионоос FFT хувиргалт хийсэн бөгөөд үр дүнг 9-р зурагт логарифм масштабтайгаар үзүүлэв. Тус үр дүнгээс харахад 6.4 кГц буюу 128 дугаар гармоник хүртэл шуугианы амплитудууд нь маш бага буюу -60 дб-ээс бага байгаа бол 6.4 кГц дээр бага хэмжээний амплитудын өсөлт гарсан нь дээрх тооцоолол үнэн зөв болсон бөгөөд орчны шуугианы түвшин тухайн хяналтын системд нөлөөлөхгүй гэдгийг харуулж байна.



8-р зураг. Туршилтын үеийн хэмжилтийн сунгаж харуулсан байдал (орчны шуугианыг харуулах зорилготой)



9-р зураг. Туршилтын үеийн хэмжилтийн сунгаж харуулсан

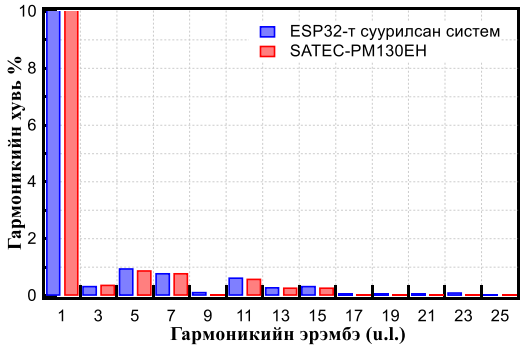
V. SATEC ХЭМЖҮҮРИЙН ТӨХӨӨРӨМЖТЭЙ ХАРЬЦУУЛАЛТ

Өмнөх бүлэгт гүйцэтгэсэн туршилтын үр дүнд тухайн хүчдэлийн гармоникийн хяналтын систем нь давтамжийн өөрчлөлт болон орчны шуугианд нөлөөлөл бага байсан бол энэ бүлэгт тус системийг эрчим хүчний салбарт хамгийн өргөн хэрэглэгдэж буй хэмжүүрийн төхөөрөмжтэй харьцуулсан туршилтыг гүйцэтгэсэн. SATEC брэндийн PM130EH загварын төхөөрөмжийг манай улсын эрчим хүчний салбарт хамгийн өргөн хэрэглэгдэг (10-р зураг) [12]. Тус хэмжүүрийн төхөөрөмж нь IEC62053-22, ANSI C12.20, IEC 61557-12 (PMD) зэрэг стандартын шаардлагыг хангасан нарийвчлал сайтай төхөөрөмж юм.

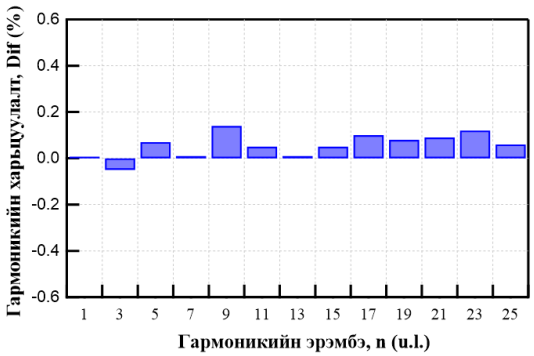
Өөрсдийн хөгжүүлсэн хүчдэлийн гармоникийн хяналтын системийг PM130EH загварын төхөөрөмжийн хамт ШУТИС-ийн 8-р байрны цахилгаан хангамжийн хэлхээнд холбож хүчдэлийн гармоникийн бодит хугацааны агшинд хэмжсэн. Тус



10-р зураг. SATEC брэндийн PM130EH загварын хэмжүүрийн төхөөрөмж



11-р зураг. SATEC брэндийн PM130EH загварын төхөөрөмж болон ESP32 суурьтай системийн харьцуулалт



12-р зураг. Гармоникийн өөрчлөлт (Satec PM130EH болон ESP32 суурьтай системийн үр дүнгийн харьцаа)

хэмжилтийн үр дүн болох сондгой гармоникуудын хазайлтыг 11-р зурагт үзүүлэв. Тус графикаас харахад бидний хөгжүүлсэн системийн хэмжилтийн үр дүн зах зээл дээрх хэмжүүрийн төхөөрөмжийн үр дүнтэй хамгийн ихдээ 0.14%-ийн зөрөөтэй байгаа нь 12-р зурагт харагдаж байна. Жич тус хувь нь гармоникийн хазайлтын хувь биш SATEC брэндийн PM130EH загварын төхөөрөмжийн авсан утгатай бидний хөгжүүлсэн хүчдэлийн гармоникийн хяналтын системийн утгыг харьцуулсан харьцааг хувиар илэрхийлсэн утга болно.

VI. ДҮГНЭЛТ

Энэ судалгааны ажлаар бид хүчдэлийн гармоник шинжилгээний бодит цагийн хяналтын системийг загварчилж, биет байдлаар угсарч туршсан бөгөөд үр дүнг эрчим хүчний салбарт хамгийн өргөн ашиглагдаж буй хэмжүүрийн төхөөрөмжтэй харьцуулан судалсан.

Тус хяналтын систем нь хямд төсөр буюу ESP32 микроконтроллёр дээр суурилж хөгжүүлсэн бөгөөд 120 дугаар гармоник хүртэл ямар нэг орчны нөлөөллийн гажилтгүй ажиллах боломжтойг туршилтаар харуулсан.

Мөн түүнчлэн зах зээлд ашиглагдаж буй хэмжүүрийн төхөөрөмжтэй харьцуулсан туршилтын үр дүнд хэмжилтийн утга хамгийн ихдээ 0.14%-ийн зөрөөтэй байгаа нь тухайн төхөөрөмжийг ашиглалтад нэвтрүүлж болохыг туршилтаар баталсан.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, “Electrical Power Systems Quality”, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.

[2] B. C. A. Aldana and A. E. F. Montenegro, “A low-cost wireless sensor system for power quality management in single-phase domestic networks,” International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA).

[3] V. K. Tran et al., “A proposed approach to utilizing ESP32 microcontroller for data acquisition,” Journal of Engineering and Technological Sciences.

[4] A.V.Oppenheim and R.W.Schafer, “Discrete-Time Signal Processing”, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2010.

[5] “Harmonic analysis of power grid based on FFT algorithm,” IEEE Conf. Publ., 2020.

[6] F. J. Harris, “On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform,” Proc. IEEE.

[7] IEEE Std 519-2022, “IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems”. New York, NY, USA: IEEE, 2022.

[8] Д.Пүрэвдаш, “Цахилгаан энергийн чанар, дээд гармоникын агууламжийн судалгаа (эмнэлгийн цахилгаан хангамжийн жишээн дээр),” докторын бүтээл 2019.

[9] M. Babiuch, P. Foltynek, and P. Smutny, “Using the ESP32 microcontroller for data processing,” in Proc. 20th Int. Carpathian Control Conf. (ICCC), 2019.

[10] Y. Tao, Y. Zhu, and G. Chen, “Design and implementation of high-precision power harmonics detection system based FFT-FT,” in Proc. SPIE, vol. 12983, EEIE 2023, 2024.

[11] R. Ingale, “Harmonic analysis using FFT and STFT,” International Journal, 2014.

[12] SATEC, PM130 PLUS Powermeter Series PM130P/PM130E/PM130EH Installation, Operation and Manual.

ГЭРИЙН АВТОМАТЖУУЛАЛТЫН СИСТЕМД WI-FI БА ZIGBEE СҮЛЖЭЭНИЙ ХАРЬЦУУЛАЛТ

Наранбаатарын БАТ-ОРГИЛ[1], Мягмаржавын ЦОЛМОН[2]

[1,2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны инженерийн салбар

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: bato.batorgil@gmail.com[1], tsolmon@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Орчин үеийн гэрийн автоматжуулалтын систем нь хэрэглэгчийн тав тух, аюулгүй байдал, эрчим хүчний үр ашигт голлон анхаардаг. Энэхүү судалгаанд Wi-Fi болон ZigBee сүлжээний технологийг гэрийн автоматжуулалтын орчинд хэрхэн ашиглаж болох, тэдгээрийн хурд, патент, төхөөрөмжийн тоо нэмэгдэх боломж, эрчим хүчний хэрэглээ, үнэ өртөг зэрэг үзүүлэлтээр харьцуулан шинжилсэн. Судалгааны үр дүнд ZigBee нь бага эрчим хүч хэрэглэдэг, mesh topology-д сайн ажилладаг бол Wi-Fi нь өндөр өгөгдлийн хурд шаардлагатай орчинд давуу талтай болохыг тогтоосон.**

Түлхүүр үг: ***Гэрийн автоматжуулалт, Wi-Fi, ZigBee, IoT (Интернэтэд холбогдсон төхөөрөмжүүд),***

I. УДИРТГАЛ

Орчин үеийн гэрийн автоматжуулалтын систем нь хэрэглэгчийн тав тух, аюулгүй байдал, эрчим хүчний хэмнэлтэд чухал нөлөөтэй. Гэрийн төхөөрөмжүүдийг интернэт болон утасгүй сүлжээгээр холбож, автомат удирдлага хийхэд WiFi болон Zigbee протокол хамгийн өргөн хэрэглэгддэг. Гэвч протокол тус бүрийн онцлог, удирдах боломж, сүлжээний хурд, төхөөрөмжийн scalability нь системийн гүйцэтгэлд шууд нөлөөлдөг. Энэхүү судалгааны зорилго нь WiFi болон Zigbee сүлжээний удаашрал, төхөөрөмжийн тоо, хурд, үнэ өртөг, эрчим хүчний хэрэглээ, ирээдүйн хөгжлийн чиг хандлагыг харьцуулан тодорхойлох явдал юм.

II. ГЭРИЙН АВТОМАТЖУУЛАЛТЫН СИСТЕМ

Ухаалаг гэрийн системийг дараах үндсэн хэсгүүдэд ангилж болно: Үүнд:

2.1 Гэрийн автоматжуулалтын систем

Гэрийн автоматжуулалт нь гэр доторх цахилгаан төхөөрөмжүүдийг хянах систем бөгөөд тав тухтай, аюулгүй байдлыг хангасан, эрчим хүчний хэмнэлтийг сайжруулах зорилготой. Орчин үеийн систем нь зөвхөн удирдах, хянах бус, илүү уян хатан, ухаалаг байж, хэрэглэгчийн байнга хийдэг үйлдлийг урьдчилан таамаглах чадвартай байх ёстой.

2.1.1 Ухаалаг гэрэлтүүлгийн систем: Гэрэлтүүлэг нь цахилгааны хэрэглээний томоохон хэсгийг эзэлдэг тул хэмнэлт хийх шаардлагатай. Гэрийн автоматжуулалтын систем нь дараах хүчин зүйлсээс хамаарч гэрлийг тохируулна:

- Өдрийн гэрлийн хэмжээ
- Өрөөний төрөл
- Хүмүүсийн байршил
- Гэрлийн тохиргоо

Ийм систем нь ухаалаг чийдэн, гэрлийн мэдрэгч, унтраалга, хөдөлгөөн мэдрэгч, алсын удирдлага зэрэг төхөөрөмжүүдээс бүрдэнэ. Зарим төхөөрөмж нь эрчим хүч хадгалах технологи ашиглан ажилладаг. Жишээ нь. Нарны зай, механик хөдөлгөөн зэрэг багтана.

2.1.2 HVAC систем (Халаалт, агааржуулалт, агаар сэлгэлт): Энэхүү систем нь гэрийн орчны температурыг, чийгшлийг, агаарын чанарыг автоматаар тохируулах үүрэгтэй. Үүнд:

- Температурын мэдрэгч
- Чийгшлийн мэдрэгч
- Термостат
- Ухаалаг агааржуулагч
- Халаалтын төхөөрөмжүүд

Энэхүү систем нь дотоод орчны нөхцөл, гадаад цаг агаар, улирал, хэрэглэгчийн байршил болон хүсэл сонирхолд үндэслэн автоматаар тохируулагдана.

2.1.3 Гэрийн аюулгүй байдлын систем: Гэрийн автоматжуулалтын чухал хэсэг нь аюулгүй байдлын систем юм. Үүнд:

- Хяналтын камер
- Хаалга, хаалганы түгжээ
- Хөдөлгөөн мэдрэгч
- Шил хагарал мэдрэгч
- Утаа мэдрэгч
- Ус алдагдлын мэдрэгч

Эдгээр төхөөрөмжүүд нь хэрэглэгчид алсаас хяналт хийх, дохиолол авах, шаардлагатай үед шуурхай арга хэмжээ авах боломжийг олгодог.

2.2 Эрчим хүчний удирдлагын систем

Эрчим хүчний удирдлагын систем нь цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээг оновчтой болгох зорилготой. Үндсэн зарчим нь өндөр хэрэглээтэй төхөөрөмжүүдийг цахилгааны үнэ хямд үед ажиллуулахыг хэлнэ. Үүнд:

- Ухаалаг тоолуур
- Гэрийн эрчим хүчний удирдлагын систем
- Цахилгаан шугамын холбоо
- Утасгүй холбоо

Төхөөрөмжүүд нь хоорондоо мэдээлэл солилцож, өөрсдийн ажиллах хугацааг автоматаар тохируулдаг. Жишээ нь: Угаалгын машин, аяга угаагч.

Мөн хэрэглэгч:

- Төхөөрөмж тус бүрийн хэрэглээг хянах
- Цагийн хуваарийн дагуу өөрчлөх

Үүнээс гадна, ухаалаг гэр нь сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг ашиглах боломжтой:

- Нарны хавтан
- Салхин турбин
- Баттерей

Илүүдэл эрчим хүчийг буцаан эрчим хүчний сүлжээнд нийлүүлэх боломжтой.

2.3 Аюулгүй байдал

Ухаалаг гэрийн системд тулгарч буй томоохон асуудал нь аюулгүй байдал юм. Ялангуяа бүх төхөөрөмж ижил хамгаалалтын түвшинд ажиллах үед эрсдэл нэмэгддэг.

Жишээлбэл:

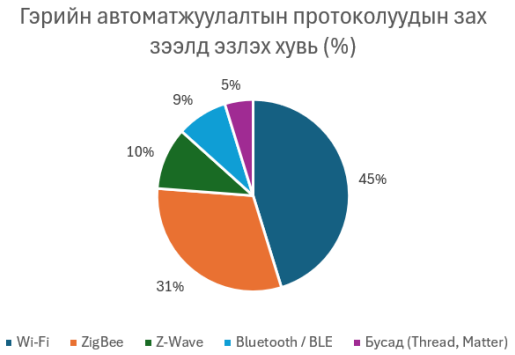
- Температурын мэдрэгчийг буруу ажиллуулснаар халаалт, хөргөлтийн системийг буруу ажиллуулах
- Цахилгааны хэрэглээг зориудаар нэмэгдүүлэх
- Төхөөрөмжийг гэмтээх

Мөн хаалганы түгжээ зэрэг системд халдлага гарвал нэвтрэлт хийх боломж бүрдэнэ.

Иймээс ухаалаг гэрийн системд мэдээллийн аюулгүй байдал, хамгаалалт болон найдвартай ажиллагаа маш чухал шаардлага болдог.

III. WI-FI БА ZIGBEE-ИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

Орчин үеийн гэрийн автоматжуултад IoT (Интернэтэд холбогдсон төхөөрөмжүүд) хэрэглэгддэг утасгүй технологиудыг түүний хамрах хүрээ, өгөгдлийн хурд, эрчим хүчний зарцуулалт зэрэг үзүүлэлтээр бид ангилж болно. Гэрийн орчинд ашиглагддаг утасгүй холболт нь нэг технологиор давамгайлдаггүй бөгөөд ихэвчлэн богино зайд, бага эрчим хүч, бага өгөгдлийн хурд шаардлагатай төхөөрөмжүүдэд тохиромжтой. Гэрийн автоматжуулалтын протоколуудын зах зээлд эзлэх хувийг зураг 1-т харуулав. Эдгээрийн дундаас гэрийн автоматжуулалт, ухаалаг гэрт хамгийн түгээмэл хэрэглэгддэг технологиуд нь Wi-Fi ба ZigBee юм. Энэ хоёр нь зах зээлийн дийлэнх хувийг эзэлж, гэр ахуйн IoT-д хамгийн өргөн хэрэглэгддэг тул бид эдгээрийн харьцуулалтад төвлөрнө.



1-р зураг. Гэрийн автоматжуулалтын протоколуудын зах зээлд эзлэх хувийг харуулсан байдал

3.1 ZigBee

ZigBee нь бага эрчим хүч хэрэглэдэг, бага хурдтай утасгүй харилцааны стандарт бөгөөд өөр өөр үйлдвэрлэгчийн төхөөрөмжүүдийн хооронд нийцтэй байдлыг хангахыг зорьдог. ZigBee нь протоколын стекээ нээлттэй эх сурвалж болгон гаргасан бөгөөд аль ч хөгжүүлэгч эсвэл компани үнэгүй ашиглах боломжтой. ZigBee нь дэлхий даяар стандартад суурилсан цорын ганц утасгүй шийдэл бөгөөд хэрэглэгчдэд тав тух, аюулгүй байдал, тохиромжтой байдлыг сайжруулахын тулд хамгийн өргөн хүрээний төхөөрөмжүүдийг хялбар бөгөөд хямдхан удирдах боломжийг олгодог. ZigBee нь IEEE 802.15.4 стандартын физик давхарга болон дунд давхаргын хандалтын хяналтын давхаргад суурилдаг. Байршлаас хамааран гурван лицензгүй давтамжийн зурвас ашигладаг: 2400–2483.5 МГц, 902–928 МГц, болон 868–868.6 МГц. 2.4 ГГц зурваст 16 суваг (нэг бүр нь 5 МГц), 915 МГц зурваст 10 суваг, 868 МГц зурваст зөвхөн нэг суваг хуваарилагдсан байдаг. 868 ба 915 МГц зурваст бинар фаз шилжүүлгийн код (BPSK) ашигладаг бол 2.4 ГГц-д – offset quadrature фаз шилжүүлгийн код (OQPSK) хэрэглэдэг. ZigBee-ийн хэвийн хүрээ нь орчны нөхцөл, эрчим хүчнээс хамааран ойролцоогоор 10–100 метр байдаг. ZigBee нь гурван стек профайлтай: ZigBee, ZigBee PRO, болон ZigBee IP. ZigBee PRO нь ZigBee-ээс ялгаатай нь илүү том сүлжээнд зориулагдсан, гэхдээ үүний үнэ өндөр бөгөөд илүү их санах ой шаарддаг. ZigBee PRO нь хэдэн мянган төхөөрөмжийн сүлжээг дэмжиж чаддаг бол ZigBee нь хэдэн зуун төхөөрөмжийн сүлжээг дэмждэг. ZigBee профайл нь фрагментаци болон давтамжийн уян хатан байдлыг дэмждэггүй боловч ZigBee PRO-той нийцдэг хэвээр байна. Нэг сүлжээний төхөөрөмжүүд нь өөр сүлжээнд ч оролцож болно.

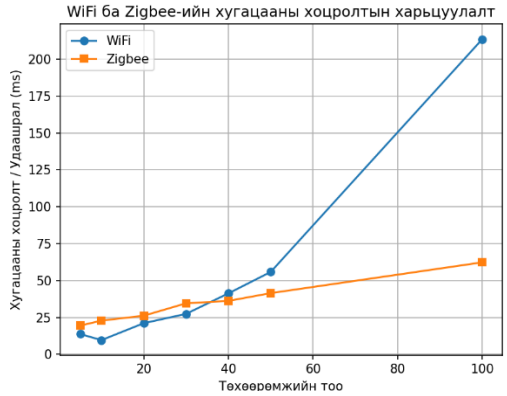
3.2 Wi-Fi

WiFi технологи нь электрон төхөөрөмжүүдийг утасгүй локал сүлжээнд (WLAN) холбох зориулалттай. WiFi нь IEEE 802.11 стандартын гэр бүлд суурилдаг бөгөөд дэлхий даяар ашиглагддаг 2.4 ГГц ба 5 ГГц лицензгүй зурвасууд дээр ажилладаг. IEEE 802.11b/g/n стандартууд 2.4 ГГц зурвас ашигладаг бол IEEE 802.11a/n/ac 5 ГГц дээр ажилладаг. 2.4 ГГц зурваст 14 давхцаж хэсэгчлэн

хуваагдсан 22 МГц өргөнтэй суваг ашиглан WiFi нь өндөр өгөгдлийн хурд гаргах боломжтой. Европт 13, АНУ-д 11, Японд зөвхөн 1 суваг ашиглах боломжтой. Өгөгдлийн хурд нь 54 Мб/с ба түүнээс дээш байж болно. Өнөөдөр 7 тэрбум гаруй WiFi төхөөрөмж ашиглагдаж байна. IoT (Internet of Things) орчинд WiFi-г гэрэл, цахилгаан залгуур, хаалга, гаражийн түгжээ, камер, мэдрэгч, дохиолол, гэр ахуйн төхөөрөмж, агааржуулалт, хэмжилт, үйлдвэрлэлийн удирдлага, эрүүл мэндийн болон фитнесийн төхөөрөмж, M2M өгөгдөл дамжуулалтад ашигладаг. WiFi нь хэрэглэгчийн электрон төхөөрөмжид давамгайлдаг тул шинэ IoT хэрэглээнд байгаа WiFi-г дахин ашиглах нь давуу талтай, ялангуяа гар утас, зөөврийн компьютер, таблет, ТВ, тоглоомын консол зэрэгтэй холбогдох шаардлагатай бол. Мөн WiFi нь IP-тэй нийцтэй тул үнэтэй gateway худалдан авах шаардлагагүй. Үүнээс үүдэн ирээдүйд WiFi IoT-д улам өргөн хэрэглэгдэх төлөвтэй. Гол сул тал нь ZigBee, BLE, Z-Wave-тай харьцуулахад илүү их эрчим хүч зарцуулдаг явдал юм. Сүүлийн жилүүдэд бага эрчим хүчтэй WiFi модуль гарч, IoT төхөөрөмжид тохирсон энерги хэмнэлттэй радио хүлээн авагч, дамжуулагчтай болсон. WiFi нь mesh сүлжээ үүсгэж чадахгүй тул холболт нь зөвхөн access point-ийн хүрээнд хязгаарлагдана. Үүнийг шийдэхийн тулд WiFi Direct (P2P) технологи гарсан. WiFi HaLow (IEEE 802.11ah) нь 900 МГц зурвас ашиглан илүү хол зай, бага эрчим хүчний холболт өгдөг бөгөөд мэдрэгч болон зүүж хэрэглэх төхөөрөмжид тохиромжтой. WiFi Direct нь access point ашиглалгүй төхөөрөмжүүдийг шууд холбох боломж олгодог. Файлыг хуваалцах, хэвлэх, хурдан утасгүй холбоо үүсгэхэд тохиромжтой.

3.3 Wi-Fi болон ZigBee сүлжээний хоорондох хугацааны хоцролтын харьцуулалт

Зураг 2-д WiFi ба ZigBee сүлжээний төхөөрөмжийн тоо нэмэгдэхэд үүсэх хоцрогдол буюу latency-г харьцуулсан үр дүнг үзүүлж байна.



2-р зураг. WiFi ба Zigbee-ийн хугацааны хоцролтын харьцуулалт

Удаашралтыг миллисекунд (ms) нэгжээр хэмжсэн ба X тэнхлэг нь холбогдсон төхөөрөмжийн тоо, Y тэнхлэг нь хоорондын хүлээлтийн уртыг илэрхийлнэ.

Симуляцын аргачлал: Python-д numpy болон matplotlib ашиглан энгийн симуляц хийсэн.

- **ZigBee**: IEEE 802.15.4 стандартыг мөрдөж, бага эрчим хүч, mesh topology-д тулгуурласан холболтыг симуляц хийсэн.
- **WiFi**: IEEE 802.11 стандарт дээр суурилсан, access point-д тулгуурласан холболттой, төхөөрөмж нэмэгдэхэд contention (ачаалал) болон congestion (бөглөрөл) үүсэхийг симуляцад оруулсан.
- np.random.normal ашиглан тухайн симуляцад бодит нөхцөлд буй мэтээр симуляцыг хийсэн.

Энэхүү симуляцын үр дүнд доорх үр дүнгүүд гарсан. Үүнд:

- **ZigBee**: Бага эрчим хүчний зориулалттай тул холбогдсон төхөөрөмжийн тоо нэмэгдсэн ч хоцрогдол харьцангуй тогтвортой (≈15–65 ms). Mesh болон tree topology ашигласнаар сүлжээний давтамжийн зохицуулалт хийгдэж, олон төхөөрөмжийг дэмжих боломжтой.
- **WiFi**: Өгөгдлийн хурд өндөр боловч төхөөрөмжийн тоо нэмэгдэх тусам хоцрогдол хурдан нэмэгдэж байна (≈10–210 ms). WiFi нь access point-д тулгуурласан тул ачаалал ихсэх үед хоцрогдол нэмэгддэг.

IV. ZIGBEE СҮЛЖЭЭ НЬ ГЭРИЙН АВТОМАТЖУУЛАЛТАД

IEEE 802.15.4 стандарт нь бага эрчим хүч, бага өгөгдлийн хурдтай, богино хүрээтэй утасгүй хувийн сүлжээ (LR-WPAN) үүсгэх зорилготой. Энэ нь мэдрэгч болон төхөөрөмжүүдэд зориулагдсан. Стандарт нь 868 MHz (Европ), 915 MHz (АНУ, Австрали), 2.4 GHz (дэлхий даяар) давтамжид ажиллаж, өгөгдөл дамжуулах хурд нь 20–250 Kb/s байна. Сүлжээний үндсэн боломжууд: хаяглах [addressing], дохио илгээх [beaconing], баталгаат цагийн интервал [GTS], олон төхөөрөмжийн давхцалыг тойрсон хандалт [CSMA/CA], өгөгдлийн баталгаажуулалт [acknowledgment] зэргийг бүрдүүлж өгч чадсан.

Сүлжээний хандалт нь beacon-enabled [дохиотой] ба non-beacon [дохиогүй] гэсэн хоёр арга байна. Төхөөрөмжийн төрөл: бүрэн функцтэй [FFD] ба хязгаарлагдмал функцтэй [RFD]. Сүлжээний топологи нь star, peer-to-peer, tree, mesh байж болно. Сүлжээ бүрд хамгийн багадаа нэг FFD байх бөгөөд энэ нь PAN coordinator [сүлжээ зохицуулагч] үүрэг гүйцэтгэнэ

Home Automation профайл нь ZigBee PRO сүлжээ дээр суурилж, гэр ахуйн цахилгаан хэрэгсэл, хаалга цоож, аюулгүй байдлын мэдрэгч, гэрэл зэрэг төхөөрөмжүүдийг дэмждэг. Сүлжээний топологи нь star, tree, mesh бөгөөд mesh нь хүрээ, найдвартай байдал нэмэгдүүлж, бүрэн peer-to-peer харилцаа боломжтой.

Төхөөрөмжийн төрөл нь дотроо 3 хуваагддаг. Үүнд:

- Coordinator [зохицуулагч нь сүлжээг үүсгэж, trust center [түлхүүр хянагч төв] үүрэг гүйцэтгэнэ],
- Router [дамжуулагч нь өгөгдөл дамжуулах, сүлжээг тэлэхэд ашиглагддаг],
- End device [эцсийн төхөөрөмж нь энгийн батарейн төхөөрөмж бөгөөд зөвхөн coordinator эсвэл router-аар дамжуулж харилцана].

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар гэрийн автоматжуулалтын системд өргөн хэрэглэгддэг Wi-Fi ба ZigBee сүлжээг удаашрал, төхөөрөмжийн өргөтгөл (scalability), өгөгдлийн хурд, эрчим хүчний хэрэглээ, үнэ өртөг, ирээдүйн чиг хандлагын үзүүлэлтээр харьцууллаа. ZigBee нь бага эрчим хүч хэрэглэж, mesh сүлжээний бүтэц ашиглан олон төхөөрөмжийг найдвартай удирдах боломжтой, хоцролт тогтвортой (≈15–65 мс), хурд нь бага боловч батарей хадгалах хугацаа урт, өртөг хямд, гэрийн автоматжуулалтын стандарт шийдэлд тохиромжтой. Wi-Fi нь өгөгдлийн хурд өндөр (≥54 Мб/с), IP-тэй нийцсэн, өргөн хэрэглээтэй төхөөрөмжүүдэд давуу, гэхдээ access point-д тулгуурласан тул төхөөрөмж нэмэгдэх тусам хоцролт хурдан нэмэгдэж, эрчим хүч их хэрэглэдэг. Ирээдүйд Wi-Fi HaLow, Wi-Fi Direct технологи нь IoT-д илүү өргөн хэрэглэгдэх боломжтой бол ZigBee нь гэр ахуйн автоматжуулалтын бат бөх, энерги хэмнэлттэй шийдэл хэвээр байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Yuan, W., Wang, X., Linnartz, J.-P., & Niemegeers, I. Study of the coexistence between ZigBee and Wi-Fi IEEE 802.11b/g networks in the ISM band — IEEE 802.15.4 (ZigBee) ба IEEE 802.11 (Wi-Fi) сүлжээ хоорондын давтамжийн өрсөлдөөн ба ижил сувгаас учирч болох нөлөөллийн судалгаа.

[2] Risteska Stojkoska, B., Popovska Avramova, A., & Chatzimisios, P. Application of Wireless Sensor Networks for Indoor Temperature Regulation — ZigBee-д суурилсан сүлжээний ашиглалт ба гэрийн автоматжуулалтын жишээ.

[3] Zhukova, N., et al. ZigBeeNet: Decrypted Zigbee IoT Network Traffic Dataset in Smart Home Environment — ухаалаг гэрийн ZigBee сүлжээний гэрийн IoT өгөгдлийн анализ.

[4] Ali, A. I. Development and performance analysis of a ZigBee-based wireless communication system — IoT, ZigBee ба Wi-Fi зэрэг сүлжээг ашигласан ухаалаг автоматжуулалтын судалгаа.

[5] A Comparative Analysis of Wireless Communication Technologies for IoT Applications: Wi-Fi, Bluetooth, and Zigbee — Wi-Fi, Bluetooth болон ZigBee-ийн IoT дахь онцлог ба хэрэглээний харьцуулалт.

[6] Comparison of Wireless Technologies Used in a Smart Home — Wi-Fi ба ZigBee-г багтаасан ухаалаг гэрийн олон төрлийн сүлжээний технологийн харьцуулалт.

[7] Mozumder, S. A., & Sagar, A. S. M. IRHA: An Intelligent RSSI based Home Automation System — Wi-Fi сигнал ашиглан гэрийн автоматжуулалтын системийн байршил тодорхойлох жишээ.

[8] Comparison of various wireless technologies for home automation — Wi-Fi-д суурилсан автоматжуулалт ба бусад технологиудын тулгамдсан асуудлууд.

[9] Study of coexistence and interference between ZigBee and Wi-Fi networks — IEEE 802.15.4 ба IEEE 802.11 стандартууд нэг талбайд ажиллах үед үүсэх нөлөөллийн аналитик судалгаа.

ТҮГЭЭХ СҮЛЖЭЭНИЙ ХҮЧДЭЛИЙН УНАЛТ БОЛОН ИХСЭЛТИЙН АСУУДЛЫГ СЭРГЭЭГДЭХ ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ТАРХМАЛ ЭХ ҮҮСВЭРИЙН ДАВТАМЖ ХУВИРГУУРЫН УДИРДЛАГААР ШИЙДВЭРЛЭХ СУДАЛГАА

Юмдоржмаагийн АЛТАНБАГАНА[1], Дэлгэрнасангийн АМАРБОЛД[2], Бат-Очирын ЧИНЗОРИГ[3], Энхбатын БАРХАС[4], Бандийн ТҮВШИНБАЯР[5]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: tuvshinbayar.b@must.edu.mn[5]

Хураангуй: **Монгол орны түгээх сүлжээний хувьд алслагдсан хэрэглэгч холбогдсон шугамын төгсгөлд хүчдэлийн уналт үүсэх асуудал түгээмэл байдаг. Сэргээгдэх эрчим хүчний тархмал эх үүсвэрүүдийг ашиглаж шугамын төгсгөлийн хүчдэлийг өргөж өгөх боломжтой байдаг. Гэвч тухайн сэргээгдэх эрчим хүчний үүсвэрүүдийн давтамж хувиргуурын удирдлагыг үйлдвэрээс тохируулсан тохиргоогоор ашигласнаар хүчдэлийн ихсэлтийн шалтгаан болж байна. Тус хүчдэлийн ихсэлт болон бууралт нь цахилгаан эрчим хүчний чанар болон тоног төхөөрөмжийн ашиглалтад сөргөөр нөлөөлж байна. Энэхүү өгүүлэлд бид сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүдэд ашиглагдаж буй давтамж хувиргуурын пульсын өргөний удирдлагатай DC-AC инвертерийн гаралтын хүчдэл ачааллын шинж чанар болон хэмжээнээс хэрхэн хамаарч буйг MATLAB/Simulink орчинд симуляцын аргаар судлахыг зорьсон. Ачаалал ихсэх тусам инвертерийн гаралтын хүчдэл мэдэгдэхүйц унаж, цахилгаан хэрэгсэл тогтворгүй ажиллаж, системийн үр ашиг буурж байсан. Мөн инвертерийн гаралтын хүчдэлийг модуляцын коэффициентоор тохируулах боломжийг судалсан бөгөөд гарсан үр дүнгээр гэдрэг холбоо бүхий инвертерийн PID удирдлага загварчилж оруулснаар гаралтын хүчдэлийг тогтвортой барьж чадсан бөгөөд тус удирдлагын хязгаарын утгуудыг тогтоосон болно.**

Түлхүүр үг: Хүчдэлийн удирдлага, Инвертерийн удирдлага, Matlab/Simulink, Пульсын өргөний модуляц

I. УДИРТГАЛ

Манай орны хувьд сүүлийн жилүүдэд цахилгаан эрчим хүчний ачаалал хурдацтай нэмэгдэж байгаа боловч тус хэрэглээг хангах шинэ эх үүсвэр сүлжээнд холбогдохгүй байгаа тул системд чадлын балансын асуудал хүндээр тулгарч байна [1]. Тус асуудлыг бүрэн шийдэхгүй боловч тодорхой хэмжээнд үйлдвэрлэлийг дэмжихийн тулд сэргээгдэх эрчим хүч (СЭХ)-ний эх үүсвэрийг системд нэвтрүүлэхийг бодлогоор дэмжиж байгаа [2]. Мөн түүнчлэн алс зайд байрласан бага хэмжээний ачаалалтай суурин газрууд ихтэй манай улсын хувьд түгээх болон дамжуулах сүлжээний төгсгөлд хүчдэлийн уналт үүсдэг [3]. Тус хүчдэлийн уналтыг шугамын төгсгөлд СЭХ-ний тархмал эх үүсвэр холбож өгснөөр шугамын хүчдэлийг өргөж өгөх боломжтой [4]. Гэвч тус СЭХ-ний үүсвэрийн гаралтын хүчдэл нь ихэвчлэн үйлдвэрээс тавигдсан тохиргоо (өөрчлөх боломжгүй) дээр байдаг тул гаралтын хүчдэл ачааллын шинж чанар болон хэмжээнээс хамааран өөрчлөгдөж шугамын хүчдэлийг өсгөх болон бууруулах сул талтай байдаг.

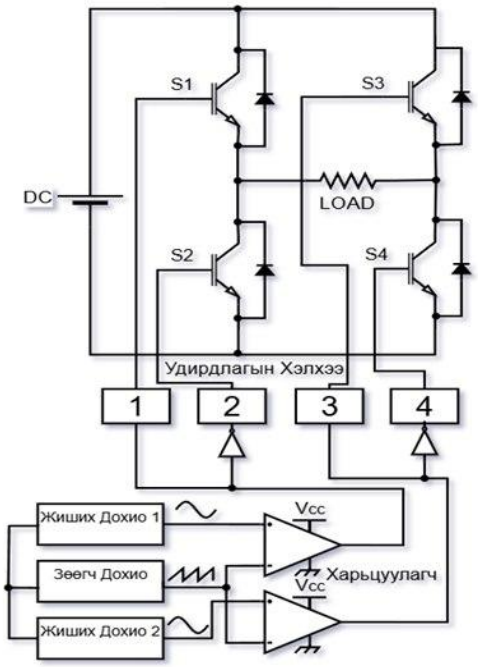
СЭХ-ний анхдагч эх үүсвэр (нар, салхи, усан станцууд) нь уламжлалт эх үүсвэртэй харьцуулахад тогтмол давтамжтай цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх боломжгүй тул генераторааc гарсан хүчдэлийг шулуутгах хэлхээ (rectifier) ашиглан тогтмол хүчдэлд шилжүүлж дараа нь DC-AC инвертер ашиглан сүлжээтэй холбогддог [5]. Хэдийгээр сүлжээтэй синхрон ажиллагаанд холбогдож байгаа боловч гаралтын хүчдэл болон давтамжийг тус DC-AC инвертерийн тусламжтай удирдах боломжтой.

Энэхүү өгүүлэлд бид СЭХ-ний эх үүсвэрийн тогтмол гүйдлийн хэсгийг сонгон авч DC-AC инвертерийг MATLAB/Simulink орчинд синуслаг пульсын өргөний модуляц (Sinusoidal Pulse Width Modulation; SPWM) ашиглан загварчилсан [6]. Загварчлалын үр дүнд гаралтын хүчдэлийг төрөл бүрийн ачааллаас хамаарах хамаарлыг гаргаж авсан. Тус хамааралд үндэслэн инвертерийн PWM удирдлагын модуляцын коэффициент (Modulation index)-ийг оновчилсон. Үр дүнд нь гаралтын хүчдэлээс гэдрэг холбоо бүхий автомат удирдлагын хэлхээг симуляцад нэмж оруулснаар гаралтын хүчдэлийг хэрхэн тогтвортой барих шийдлийг судалсан.

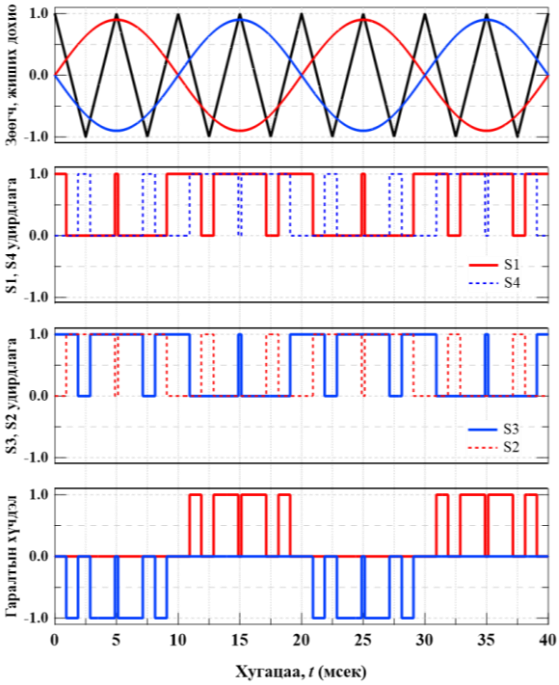
II. ОНОЛЫН ХЭСЭГ

Инвертер нь өндөр хурдны хагас дамжуулагч элементүүд болох IGBT болон MOSFET төхөөрөмжүүдийг ашиглаж гаралтыг дурын давтамж болон амплитудтай синуслаг хэлбэртэй болгох зориулалт бүхий хүчний электроникийн төхөөрөмж юм. Нэг фазын бүтэн үеийн инвертерийн хялбаршуулсан схемийг 1-р зурагт харуулав. Тогтмол гүйдлийн үүсгэгч нь бүтэн үеийн гүүрэн холболт бүхий таслах, залгах төхөөрөмжтэй холбогдоно. Тус таслах, залгах төхөөрөмжийн залгах болон таслах хугацааг зөв хугацааны дараалалтай удирдсанаар инвертерийн гаралт дээр пульс бүхий хүчдэл гарна.

Залгах болон таслах хугацааг PWM удирдлагыг ашиглан гаралтын дохиог илүү оновчтой тохируулах боломжтой болсон. PWM удирдлага хэрэглэснээр гаралтын дохионы пульс бүрийн өргөн нь жиших дохио (reference signal, ихэвчлэн синусойдал



1-р зураг. Нэг фазын бүтэн үеийн инвертерийн бүтцийн схем (Unipolar PWM удирдлагатай үед).



2-р зураг. Нэг фазын бүтэн үеийн инвертерийн удирдлагын дохионы хэлбэр. (Unipolar PWM, зөөгч давтамж 200 Гц)

хэлбэртэй)-аас хамаарч 2-р зурагт үзүүлсэнчлэн өөрчлөгдөнө. Энэ жиших дохио нь өндөр давтамжийн зөөгч дохио (carrier signal, ихэвчлэн гурвалжин хэлбэртэй)-тай харьцуулагдаг бөгөөд жиших дохио нь зөөгч дохионоос их тохиолдолд түлхүүр залгаатай төлөвт орох бол эсрэг тохиолдолд түлхүүр салгаатай төлөвт шилжинэ. Үр дүнд нь өөр өөр өргөн бүхий пульсууд гарна.

PWM удирдлагад нэг туйлтай болон хоёр туйлтай (Unipolar & Bipolar PWM) гэсэн хоёр төрөл байдаг [7, 8]. Нэг туйлтай удирдлага нь хамгийн өргөн хэрэглэгддэг тул энэ өгүүлэлд ашиглагдсан болно. Нэг туйлт удирдлагын үед 2-р зурагт үзүүлсэнчлэн хоорондоо π өнцгийн зөрөөтэй хоёр жиших дохио ашигладаг бөгөөд салгах, залгах түлхүүрүүдийг тус бүрд нь удирдаж гаралтад нэг хагас үед дан нэмэх дараагийн хагас үед дан хасах дохио гаргадгаараа онцлогтой. Хэдийгээр гаралт нь тасалдалтай пульс бүхий дохио боловч гаралтын нам давтамжийн буюу 50 Гц-ын агууламж нь бараг синуслаг болдог. Харин өндөр давтамжийн нэгдлүүд нь зөөгч дохионы давтамж болон түүний дээд гармоникуудаас бүрддэг. Тус дээд гармоникуудыг шүүлтүүр ашиглан шүүх шаардлагатай.

Жиших дохио болон зөөгч дохионуудын амплитудын харьцааг модуляцын коэффициент гэх ба (1)-р тэгшитгэлээр олно [9].

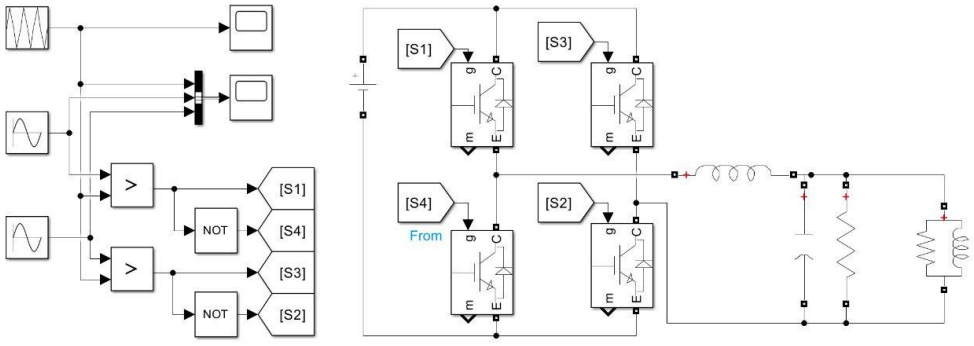
$$m_{\mathrm{a}} = V_{ref}/V_{car} \qquad (1)$$

энд: V_{ref} нь жиших дохионы амплитуд, V_{car} нь зөөгч дохионы амплитуд.

Харин гаралтын хүчдэлийн амплитуд нь (2)-р тэгшитгэлд үзүүлсэнчлэн модуляцын коэффициент болон оролтын тогтмол хүчдэл хоёрын үржвэрээр тодорхойлогдоно.

$$V_{out} = m_{\mathrm{a}} \times V_{DC} \qquad (2)$$

энд: V_{out} нь гаралтын хүчдэлийн амплитуд, V_{DC} нь тогтмол хүчдэлийн амплитуд.

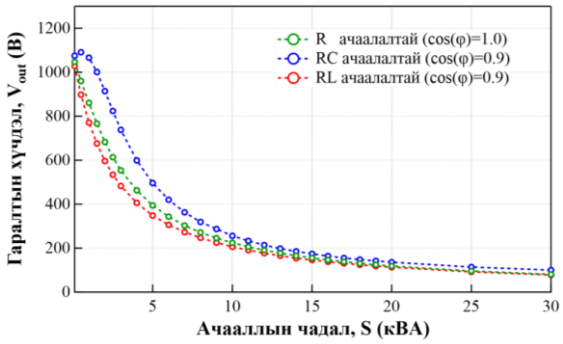


3-р зураг. Нэг фазын бүтэн үеийн инвертерийн симулцын бүтцийн схем (MATLAB/Simulink).

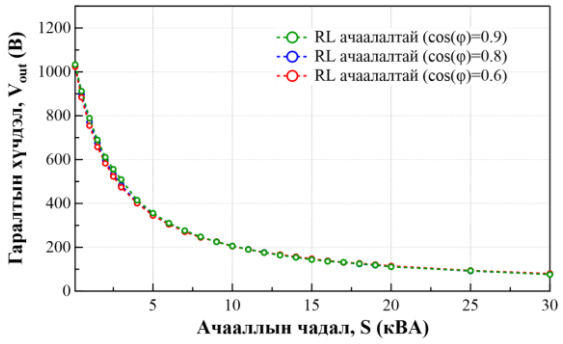
Практикт тус модуляцын коэффициентыг $m_a < 1$ байхаар авдаг. Учир нь $m_a > 1$ үед гаралтын хүчдэлийн амплитуд нь тогтмол хүчдэлийн амплитудаас ихсэж, гаралтын хүчдэлийн хэлбэрт гажилт үүсэх боломжтой.

III. Инвертерийн симуляц

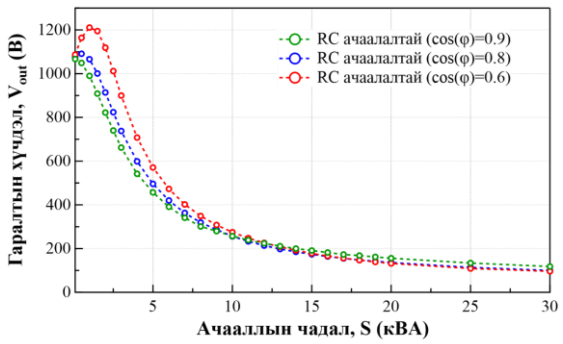
Энэ бүлэгт нэг фазын нэг туйлт PWM удирдлагатай инвертерийн (unipolar PWM) симуляцийн тухай авч үзнэ. Симуляцыг MATLAB/Simulink орчинд гүйцэтгэсэн бөгөөд симуляцын бүтцийн схемийг 3-р зураг үзүүлэв [10]. Симуляцад гаралтын хүчдэлийг 220В байхаар тохиргоо хийхээр зорьсон бөгөөд тогтмол хүчдэлийн утгыг 1000 В, зөөгч дохионы давтамжийг 5 кГц, амплитудыг 1, жиших дохионы давтамжийг 50 Гц байхаар авсан бол амплитудыг янз бүрийн утгад өөрчилж туршиж үзсэн. Гаралтын хүчдэлийг синусойд хэлбэртэй гаргахын тулд RLC шүүлтүүр ашигласан бөгөөд элементүүдийн утгыг 100 Гц-ээс нам давтамжийг нэвтрүүлэхээр тооцоолж $R = 50\ \Omega, L = 56\ mH, C = 39.4\ \mu F$ -аар тус тус сонгосон [11].



(a) Бодит, нөлөөмж, багтаамжийн ачаалалтай үед



(b) Нөлөөмжийн ачаалалтай үед

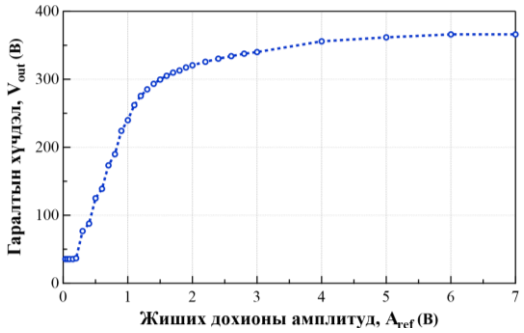


(c) Багтаамжийн ачаалалтай үед

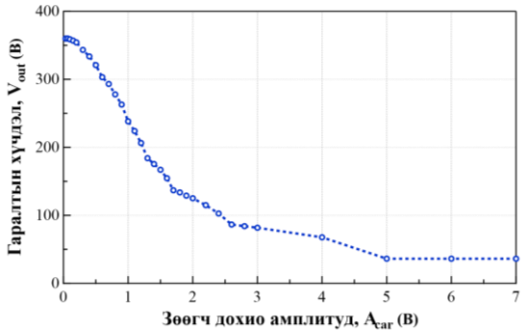
4-р зураг. Гаралтын хүчдэл ачааллаас хамаарах хамаарал.

Туршилтыг гүйцэтгэхдээ жиших дохиог 0.9 амплитудтай байх үе дэх гаралтын хүчдэл ачааллаас хамаарсан хамаарлыг 4(a)-р зурагт үзүүлэв. Тус хамаарамжийг байгуулах үед ачааллыг цэвэр бодит, нөлөөмжийн шинж чанартай болон багтаамжийн шинж чанартай ($\cos(\varphi) = 0.9$) гэсэн гурван төрлөөр авч үзсэн. Тус хамаарамжаас харахад гаралтын хүчдэл нь ачааллаас хамааран буурдаг нь тодорхой харагдаж байна. Мөн бууралтын өөрчлөлт нь ачааллын шинж чанараас хамааарч байгаа нь 4(b), 4(c)-р зургаас харагдаж байна. Тус хамаарамжаас харахад нөлөөмжийн болон цэвэр бодит ачаалалтай үед гаралтын хүчдэл шууд буурч байгаа бол ачаалал нь багтаамжийн шинж чанартай үед ачаалал болон шүүлтүүрийн резонансаас хамааралтай бага зэргийн өсөлт гараад буцаад буурч байна.

Нэгэнт гаралтын хүчдэл нь ачааллаас хамаарч буурч байгаа бол жиших дохио болон зөөгч дохионуудын өөрчлөлтөөс гаралтын хүчдэл хэрхэн хамаарч байгааг 5-р зурагт үзүүлэв. Тус хамаарамжаас харахад зөөгч дохиог тогтмол 1 амплитудтай байх үед жиших дохионы амплитудыг өсгөх үед гаралтын хүчдэл өсөж байгаа боловч 250В-оос дээш болох үед гаралтын хүчдэлийн дохионы хэлбэр гажиж байсан. Харин эсрэгээрээ жиших дохиог тогтмол 1 амплитудтай байх үед зөөгч дохионы амплитудыг өсгөх үед гаралтын хүчдэл 50В утгад хүрэх үед синуслаг хэлбэрээ алдаж байна.



(a) Жиших дохионы өөрчлөлт (Зөөгч дохио 1 байх үед)

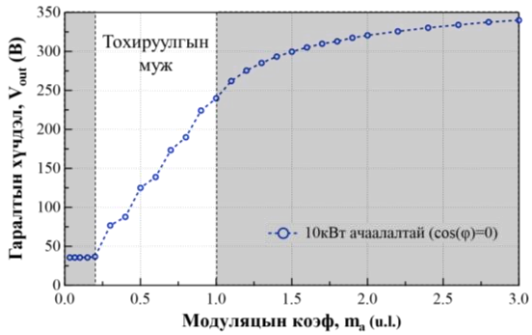


(b) Зөөгч дохионы өөрчлөлт (Жиших дохио 1 байх үед)

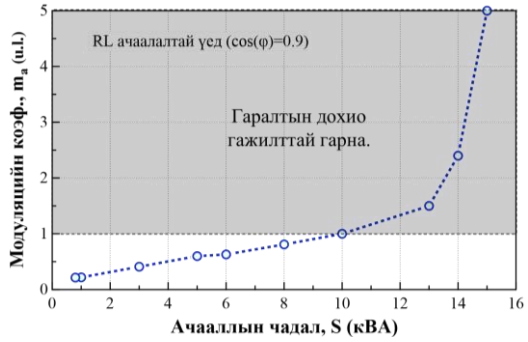
5-р зураг. Гаралтын хүчдэл зөөгч болон жиших дохионы амплитудаас хамаарах хамаарал.

IV. МОДУЛЯЦЫН КОЭФФИЦИЕНТ БОЛОН ГЭДРЭГ ХОЛБОО БҮХИЙ УДИРДЛАГА

Гаралтын хүчдэлийн модуляцын коэффициентоос хамаарсан хамаарамжийг 6-р зурагт үзүүлэв. Тус хамаарамж нь S хэлбэртэй гарсан бөгөөд m_a хэт их эсвэл хэт бага болох үед гаралтын хүчдэл нь ханалтад орж байгаа нь ажиглагдаж байна. $m_a > 0.9$ байх үед гаралтын хүчдэлийн утга синуслаг хэлбэрээ алдах бөгөөд улам ихэсгэх үед DC тэжээлийн хүчдэлтэй ойролцоо болж гаралтын хүчдэл нь дөрвөлжин хэлбэртэй болсноор хэлбэрээ алдахаас гадна ханалтад орж байна. Тус ханалтын хүчдэл нь шүүлтүүрээр дамжсанаар гаралтын хүчдэлийн утга нь DC тэжээлийн хүчдэлээс 1.27 дахин өсөж гарч байна. Харин $m_a < 0.2$ байх үед гаралтын хүчдэлийн утга хэт бага болж ханалтад орж байна.



6-р зураг. Гаралтын хүчдэл модуляцын коэффициентоос хамаарах хамаарал. (10 кВт ачаалалтай)

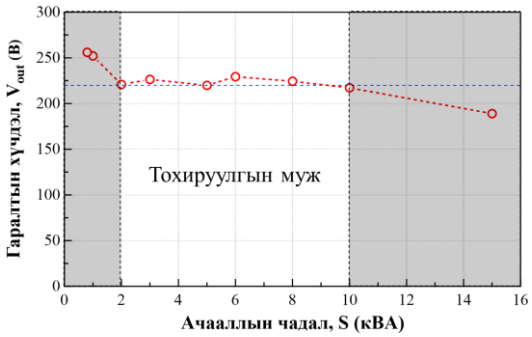


7-р зураг. Модуляцын коэффициентыг ачааллаас хамааруулан тохируулах хамаарамж ($V_{out} = 220В$)

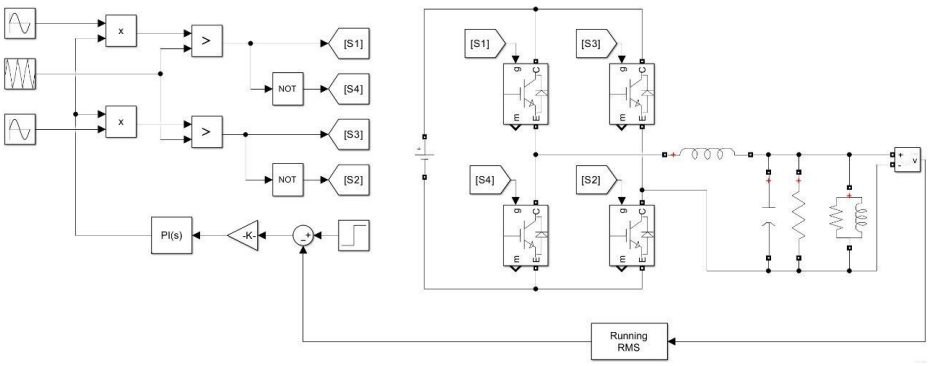
Тиймээс гаралтын хүчдэлийг оновчтой удирдахын тулд $0.2 < m_a < 9$ байдлаар тохируулгаа хийж өгөх шаардлагатай. Мөн түүнчлэн тус гаралтын хүчдэл болон модуляцын коэффициент хоорондын хамаарал нь ачааллын шинж чанараас хамаарч өөчлөгдөх тул ачааллын шинж чанараас хамаарч тохируулга бас өөрчлөгдөх шаардлагатай. 7-р зурагт гаралтын хүчдэлийн амплитудыг 220В-д тогтмол барьж байхаар модуляцын коэффициентыг ачааллаас хамааруулсан хамаарамжийг харуулав. Тус хамаарамжаас харвал өмнө дэвшүүлсэн $0.2 < m_a < 0.9$ нөхцөлийг хангана гэвэл ачааллыг 2 кВА~10 кВА утгатай байх үед удирдлага хийх боломжтой нь харагдаж байна.

Дээрх симуляцийн үрд дүнд суурилан гаралтын хүчдэлийг тодорхой хүсэмжит утгад барихын тулд гэдрэг холбоо бүхий PID удирдлага ашиглаж симуляцийг өргөжүүлсэн бөгөөд 8-р зурагт симуляц гүйцэтгэсэн схемийг үзүүлэв. Тус удирдлагын хувьд хүсэмжит утга (U_{des})-ийг 220В байхаар сонгож авсан. Инвертерийн гаралтын хүчдэлийн тус утгатай харьцуулалт хийж үр дүнгээр нь m_a -г өөрчилж гаралтын хүчдэлийг хүсэмжит утгад барих бөгөөд PID удирдлагын коэффициентыг $P = 11, I = 1.95$ утгатайгаар сонгож авсан [12].

Тус удирдлагатай байх үед гаралтын ачааллыг нөлөөмжийн болон багтаамжийн шинж чанартай байх үед симуляцалсан бөгөөд гаралтын үр дүнг 9-р зурагт үзүүлэв. Тус үр дүнгээс харахад гэдрэг холбоо бүхий инвертерийн удирдлага ашигласнаар гаралтын хүчдэлийг 4.27 хувь (9.4В)-ийн хазайлттайгаар нарийн тогтвортой барих боломжтой байна.



9-р зураг. Гэдрэг холбоо бүхий инвертерийн удирдлагатай үеийн гаралтын хүчдэл, ачааллын хамаарамж ($V_{out} = 220В$)



8-р зураг. Нэг фазын бүтэн үеийн инвертерийн симулцын бүтцийн схем (MATLAB/Simulink).

V. Дүгнэлт

Энэхүү өгүүлэлд бид нэг фазын бүтэн үеийн гүүрэн холболт бүхий инвертерийн гаралтын хүчдэлийг ачааллаас хамааруулан удирдах боломжийг симуляцийн орчинд судаллаа.

Инвертерийн гаралтын хүчдэл нь ачааллын хэмжээ болон шинж чанараас хамааран өөрчлөгддөг. Симуляцийн үр дүнгээс харахад инвертерийн PWM-ийн модуляцын коэффициентыг 0.9 утгатай байх үед ачааллыг 0.1 кВт-аас 30 кВт-ын хооронд өөрчлөх үед гаралтын хүчдэл нь 1000 В-оос 80.6 В хүртэл маш өргөн зурваст хэлбэлзэж байсан. Тиймээс инвертерийн удирдлагыг байнгын тогтмол байлгах нь учир дутагдалтай юм.

Гаралтын хүчдэлийг зорилтод хүчдэлийн хэмжээнд барихын тулд модуляцын коэффициентыг өөрчлөх туршилтыг гүйцэтгэсэн бөгөөд үр дүнд нь гаралтын хүчдэлийг оновчтой удирдахын тулд модуляцын коэффициентыг $0.2 < m_a < 9$ утгын хооронд тохируулах нь хамгийн тохиромжтой байсан. Тус хязгаараас ихсэх эсвэл буурсан тохиолдолд гаралтын хүчдэлийн синуслаг хэлбэрт өөрчлөлт орж чанарын шаардлага хангахгүй байна.

Дээрх үр дүнг ашиглан инвертерийн системд гэдрэг холбоо бүхий PID удирдлагыг ашигласнаар ачаалал нь $2\,\text{кВА} \sim 10\,\text{кВА}$ байх үед гаралтын хүчдэлийг 220 В байхаар хүчдэлийн тохируулга гүйцэтгэхэд үр дүн нь 4.27 хувь (9.4В)-ийн хазайлттай байсан. Тус үр дүнгээс харахад инвертерийн удирдлагыг зөв тохируулж өгснөөр түгээх сүлжээний хүчдэлийн түвшнийг тодорхой утгад барих боломжтойг харуулж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Диспетчерийн үндэсний төв ТӨХК, https://ndc.energy.mn/

[2] Эрчим хүчний сайдын 2026 оны 3 дугаар сарын 02-ны өдрийн А/42 дугаар тушаалын хавсралт, https://legalinfo.mn/mn/detail?lawId=17435745454932&showType=1

[3] Улаанбаатар цахилгаан түгээх сүлжээ ТӨХК, https://www.tog.mn/news/show/52

[4] Q.-C. Zhong and T. Hornik, Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2013, pp. 284–286.

[5] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, “A review of power converter topologies for wind generators,” Renewable Energy, vol. 32, no. 14, pp. 2369–2385, 2007.

[6] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, and A. M. Knight, “A review of power converter topologies for wind generators,” Renewable Energy, vol. 32, no. 14, pp. 2369–2385, 2007.

[7] J. Pollefliet, Power Electronics: Switches, Converters and Controllers. Oxford, U.K.: Academic Press, 2018.

[8] M. Valco, J. Sedo, and M. Paškala, “Simulation analysis of DC/AC inverter under nonlinear load,” in Proc. MATLAB 2013 Conf., 2013

[9] N. F. A. Hamid, M. A. A. Jalil, and N. S. S. Mohamed, “Design and simulation of single phase inverter using SPWM unipolar technique,” J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1432, no. 1, p. 012021, 2020

[10] MathWorks, Simulink, version R2024b. Natick, MA, USA: The MathWorks, Inc., 2024.

[11] Omni Calculator, “Low-Pass Filter Calculator,” Omni Calculator. https://www.omnicalculator.com/physics/low-pass-filter

[12] K. Ogata, Modern Control Engineering, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010, pp. 583–589.

ТҮГЭЭХ СҮЛЖЭЭНИЙ БОГИНО ЗАЛГААНЫ СИМУЛЯЦЫН ХАРЬЦУУЛСАН ДҮН ШИНЖИЛГЭЭ

Дамдиндоржийн ЛХАГВАСУГАР, Ган-Эрдэнийн **ГАНБАЯР**
Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны хангамжийн тэнхим
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: ez4ence1225@gmail.com, g98000264@gmail.com

Хураангуй: Энэхүү өгүүлэлд түгээх сүлжээний 35 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугамд үүсэх богино залгааны үеийн гүйдэл, шилжилтийн процесс, тэдгээрийн симуляцыг гүйцэтгэж, нэг фаз, хоёр фаз, гурван фазын богино залгааны гүйдлүүдийг тодорхойлж, шинжиллээ. Улаанбаатар цахилгаан түгээх сүлжээний бодит схем дээрх тооцооны хэсгийг сонгон авч бодитоор газардлагын үеийн орлуулгын схемийн загварчлалыг PSCAD/EMTDC болон POWERFACTORY программд байгуулан нэгдсэн үр дүнгээс нь гүйдлийн оргил утгуудыг тодорхойлж, бодит амьдрал дээрх богино залгааны бичилттэй нь тулгаж, дүгнэлт гаргасан болно. Үр дүнгээс харахад харьцуулалтуудын утгууд ойролцоогоор 0.27% зөрүүтэй байна.

Түлхүүр үг: Шилжилтийн процесс, 35 кВ-ын шугам ба трансформаторын тусгаарлагчийн түвшин, дотоод хэт хүчдэл, DIgSILENT PowerFactory үр дүн, PSCAD/EMTDC симуляц

I. УДИРТГАЛ

Цахилгаан эрчим хүчний системийн найдвартай ажиллагаанд богино залгааны процессыг зөв тодорхойлох нь чухал ач холбогдолтой байдаг. Ялангуяа түгээх сүлжээний 35 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугамд үүсэх богино залгааны үед гүйдэл, хүчдэлийн өөрчлөлтүүд нь тоног төхөөрөмжийн ажиллагаа, тусгаарлагчийн найдвартай байдалд шууд нөлөөлнө. Иймээс богино залгааны процессыг онолын тооцоо болон симуляцын программ ашиглан судлах шаардлагатай болдог. Агаарын шугамтай холбогдсон дунд хүчдэлийн кабелийн төгсгөлд гурван фазын богино холболт үүсэж, гүйдэл хязгаарлагч гал хамгаалагч тасрах үед кабелийн индукц болон багтаамжийн хооронд энерги хэлбэлзэж, маш өндөр шилжилтийн хэт хүчдэл үүсдэг [1]. Гэмтэл үүссэн даруйд фазын гүйдлүүд огцом өсөж, тэгш бус хэмт шилжилтийн процессыг үзүүлдэг [2]. Техникийн ном зохиолуудад агаарын шугам болон кабелийн зөвхөн нийт багтаамжийн гүйдэл буюу дамжуулах чадварыг өгдөг тул металл газардуулгын үеийн гэмтлийг ердийн гарын авлагын өгөгдлөөр тооцоолох боломжгүй байдаг [3].

Сүүлийн жилүүдэд цахилгаан системийн судалгаанд DIgSILENT PowerFactory болон PSCAD/EMTDC зэрэг программ хангамжуудыг өргөн хэрэглэж байна. Тус хоёр программыг харьцуулахад DIgSILENT PowerFactory программ нь том хэмжээний систем загварчлахад мөн тогтсон горимын тооцоо, дүн шинжилгээ, хамгаалалтын тохируулга хийхэд илүү тохиромжтой ба тооцооны хурд өндөртэй. PSCAD/EMTDC программ нь цахилгаан соронзон шилжилтийн процесс, тусгаарлагч, нум дээр үүсэх хэт хүчдэл гэх мэт түр зуурын процесс болон динамик үзэгдлүүдийг судлахад тохиромжтой ба жижиг хэсгийн нарийвчлалын судалгаа хийж, осциллограмм гаргадаг ба нарийвчлал сайтай ч тооцооны хурд бага юм. PowerFactory-ийн алгоритм нь хялбарчилсан хэсгийн параметрүүдийг тооцоолж гаргадаг бөгөөд энэ нь чадлын урсгал (load flow) болон богино холболтын (short-circuit) тооцооны аль алинд хүчинтэй [4]. Хэрэв зангилааны хүчдэлүүд тодорхой байвал бүх салбаруудаар гүйх богино залгааны гүйдлийг тодорхойлох боломжтой [5].

Энэхүү судалгаанд Улаанбаатар хотын түгээх сүлжээний нэг хэсэг болох Гачуурт 35 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугамыг сонгон авч нэг фаз, хоёр фаз болон гурван фазын богино залгааны гүйдэлд симуляц хийж, IEC 60909 стандартын онолын тооцоотой харьцуулан шинжилгээ хийлээ.

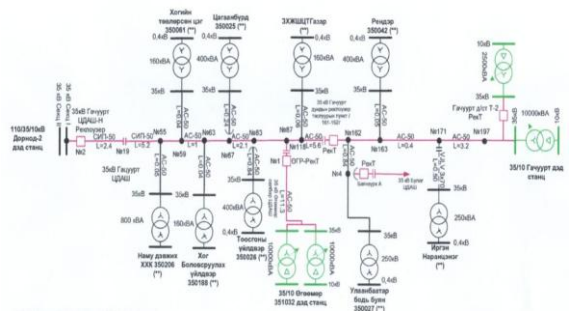
Монгол улсын эрчим хүчний системд 35кВ-ын хүчдэлийн түвшинд саармаг цэг нь тусгаарлагдсан горимд ажилладаг. Энэхүү горимын үед нэг фаз газартай холбогдох үйл явц нь шууд богино холболт биш, харин цахилгаан соронзон орны тэнцвэрт байдал алдагдах процесс юм.

Тусгаарлагдсан саармаг цэгтэй системд гэмтлийн цэгээр дамжин шугамын багтаамжийн гүйдэл ба богино залгааны гүйдэл гүйнэ. Энэ гүйдэл нь эрүүл фазуудын газартай харьцах багтаамжаар дамжин хаагдах бөгөөд харьцангуй бага гүйдэл гүйдэг. Гэсэн хэдий ч шугамын урт ихсэх тусам багтаамжийн гүйдэл нэмэгдэж, гэмтлийн цэг дээр тасралтгүй цахилгаан нум үүсэх нөхцөлийг бүрдүүлж өгдөг.

II. ТООЦООНЫ АРГАЧЛАЛ

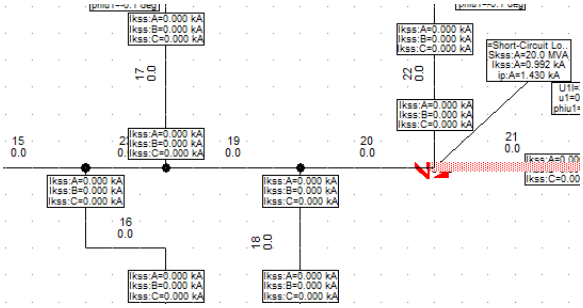
1. Симуляцын загварчлал

35кВ Гачуурт ЦДАШ-ын тооцооны схемийг 1-р зурагт үзүүлэв. Тооцоог DIgSILENT PowerFactory программ болон PSCAD/EMTDC программ дээр тус тус загварчлахдаа зарчмын схем дэх цахилгаан дамжуулах агаарын шугам болон трансформаторуудын техникийн паспортуудыг цуглуулан зохих өгөгдлүүдийг оруулж цахилгаан дамжуулах агаарын шугамд нэг фаз, хоёр фаз, гурван фазын тооцоог хийж гүйцэтгэв.



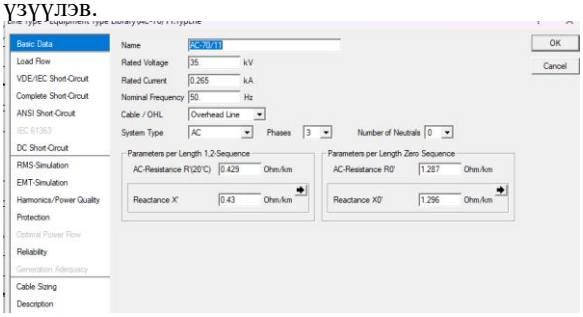
1-р зураг. 35кВ Гачуурт ЦДАШ-ын тооцооны схем

Схемийг DIgSILENT PowerFactory дээр загварчилсан байдлыг 2-р зурагт үзүүлэв. Тооцоог PowerFactory дээр IEC 60909 стандартаар хийсэн.



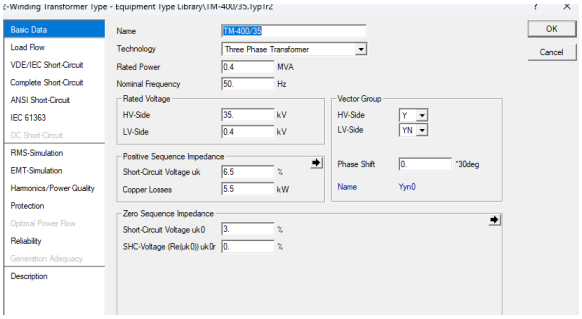
2-р зураг. 35кВ Гачуурт ЦДАШ-ыг DIgSILENT PowerFactory дээрх загварчлал

PowerFactory программ дээр ЦДАШ-ыг загварчлахдаа шууд, урвуу, тэг дараалын бодит болон хуурмаг эсэргүүцэл, номиналь хүчдэл зөвшөөрөгдөх гүйдэл, шугамын урт, дамжуулагч материалыг тус тус гараас утга оруулан загварчилсан. Загварчилсан байдлыг 3-р зурагт үзүүлэв.



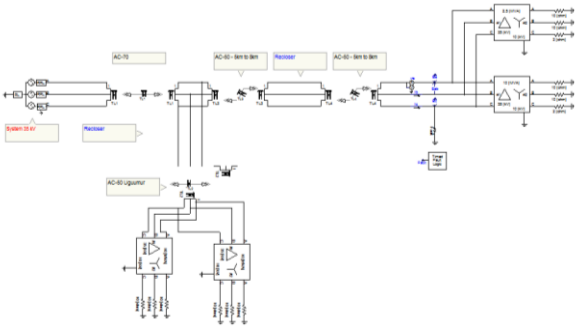
3-р зураг. DIgSILENT PowerFactory дээрх ЦДАШ-ын загварчлал

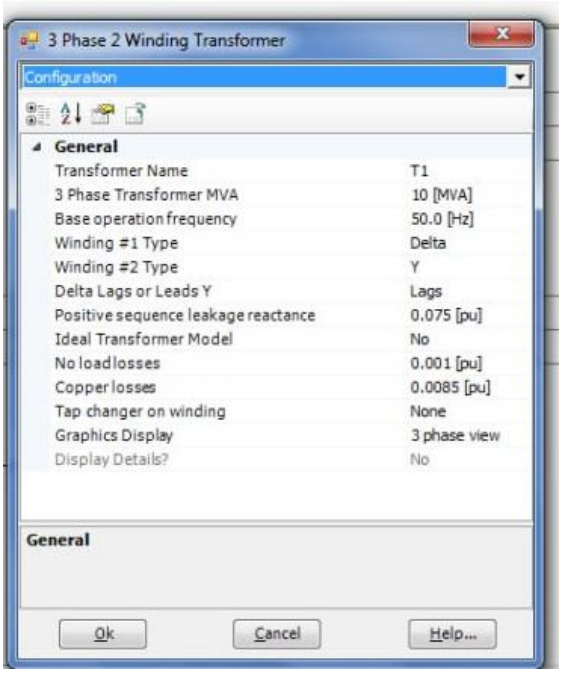
Трансформаторыг загварчлахдаа номиналь бүрэн чадал, өндөр болон нам талыг хүчдэл, хоосон явалтын алдагдал, богино залгааны алдагдал, холболтын бүлэг, хоосон явалтын гүйдлийн процент, богино залгааны хүчдэлийн процентыг тус тус гараас утга оруулан загварчилсан. Загварчилсан байдлыг 4-р зурагт үзүүлэв.



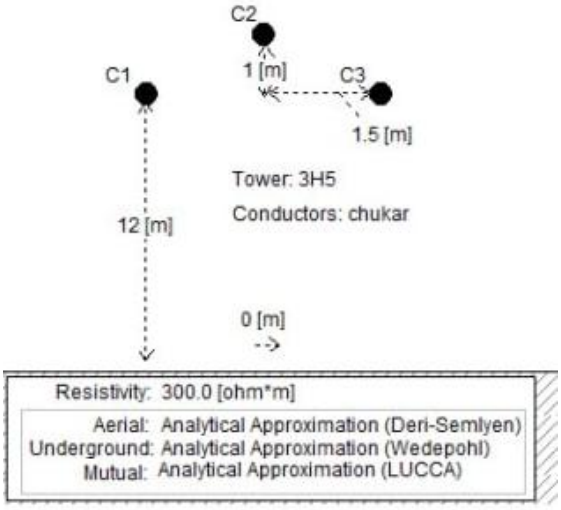
4-р зураг. DIgSILENT PowerFactory дээрх трансформаторын загварчлал

PSCAD/EMTDC программыг ашиглан загварчлалыг 5-р зурагт үзүүлэв.





Трансформаторын загвар



Агаарын шугам

5-р зураг. 35кВ Гачуурт ЦДАШ-ыг PSCAD программ дээрх загварчлал

PSCAD/EMTDC программ нь зангилааны потенциалын арга дээр үндэс дифференциал тэгшитгэлийн хугацааны тооллын системд тооцоолдог [5] бөгөөд 1-р зурагт харуулсан схем дээр богино холбоог зохиомлоор хийж харгалзах гүйдлийн оргил утга, осциллограммуудыг хувилбар тус бүрийн симуляцын үр дүнгээс нэгтгэн авлаа.

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{c \cdot U_н}{\sqrt{3} \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3)} \qquad (1)$$

Үүнд: $I_{кз}^{(1)}$- Нэг фазын богино залгааны гүйдэл, кА; $U_н$-Номиналь хүчдэл , кВ; Z_1- шууд дараалын бүрэн эсэргүүцэл, Ом; Z_2- Урвуу дараалын бүрэн эсэргүүцэл, Ом; Z_0- Тэг дараалын бүрэн эсэргүүцэл, Ом; c- Найдваржилтын коэффициент;

Тооцоонд гүйдэл үүсгэгчээс богино залгааны цэг хүртэл гүйнэ гэж үзэн богино залгаа болсон цэг хүртэлх элементүүдийн эсэргүүцлүүдийг тооцсон.

(2)-р илэрхийллээр шугамын төгсгөлд хоёр фазын богино залгааны үелсэн байгуулагчийг тооцоолов.

$$I_{КЗ}^{(2)} = \frac{c \cdot U_н}{2 \cdot Z} \qquad (2)$$

Үүнд: $I_{кз}^{(2)}$- Хоёр фазын богино залгааны гүйдэл, кА; $U_н$-Номиналь хүчдэл , кВ; Z- шууд дараалын бүрэн эсэргүүцэл, Ом; c- Найдваржилтын коэффициент;

(3)-р илэрхийллээр шугамын төгсгөлд гурван фазын богино залгааны үелсэн байгуулагчийг тооцоолов.

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{c \cdot U_н}{\sqrt{3} \cdot Z} \qquad (3)$$

Үүнд: $I_{кз}^{(3)}$- Гурван фазын богино залгааны гүйдэл, кА; $U_н$-Номиналь хүчдэл , кВ; Z- шууд дараалын бүрэн эсэргүүцэл, Ом; c- Найдваржилтын коэффициент;

(4)-р илэрхийллээр шугамын төгсгөлд гурван фазын богино залгааны үелсэн байгуулагчийг тооцоолов.

$$i_p = (1.02 + 0.98 \cdot e^{(-3\frac{X}{R})}) \cdot \sqrt{2} \cdot I_{КЗ}^{(3)} \qquad (4)$$

Үүнд: i_p-Гурван фазын богино залгааны цохилтын гүйдэл; $I_{кз}^{(3)}$- Гурван фазын богино залгааны гүйдэл, кА; $U_н$-Номиналь хүчдэл , кВ; R- шууд дараалын бодит эсэргүүцэл, Ом; X- шууд дараалын хуурмаг эсэргүүцэл, Ом;

III. ҮР ДҮНГИЙН ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

DIgSILENT PowerFactory дээрх симуляцын үр дүн IEC 60909 стандартын илэрхийллийн үр дүнгийн зөрүү дунджаар 0.27% байна. PowerFactory симуляцын богино залгааны тооцооны үр дүнгүүдийг 6-8-р зурагт тус тус дүрслэв.

Sk" [MVA]	Ik" [kA]	[deg]	ip [kA]	Ib [kA]
100.14	1.65	-0.57	2.38	1.65

6-р зураг. PowerFactory 3 фазын богино залгааны тооцооны үр дүн

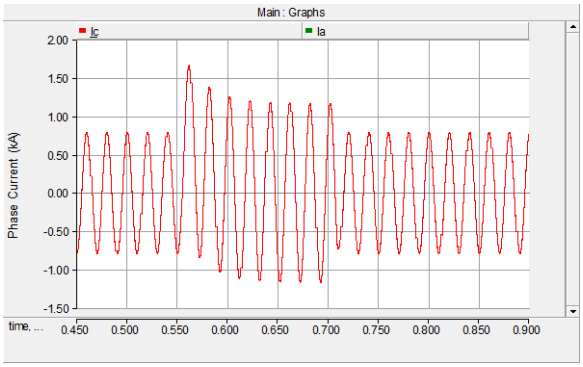
Sk" [MVA]	Ik" [kA]	[deg]	ip [kA]	Ib [kA]
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28.91	1.43	-90.57	2.06	1.43
28.91	1.43	89.43	2.06	1.43

7-р зураг. PowerFactory 2 фазын богино залгааны тооцооны үр дүн

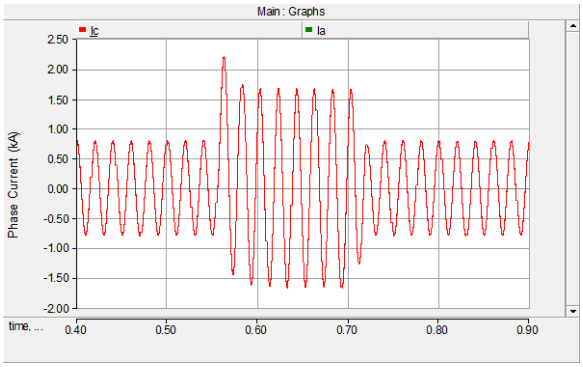
| System Stage: Grid				
Sk" [MVA]	Ik" [kA]	[deg]	ip [kA]	Ib [kA]
20.04	0.99	-0.34	1.43	0.99
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

7-р зураг. PowerFactory 1 фазын богино залгааны тооцооны үр дүн

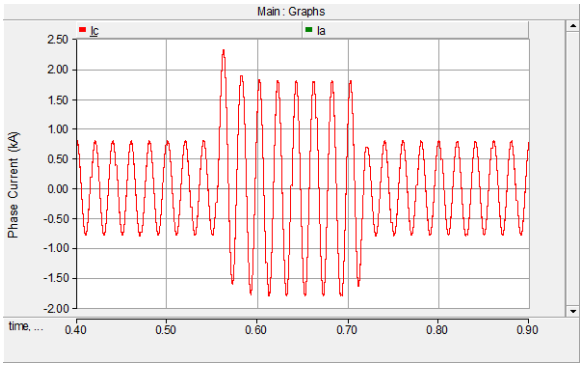
Гачуурт 35кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугам дахь PSCAD программ дахь симуляцын үр дүнг 9-р зурагт тус тус дүрслэв.



А) 1 фазын богино залгааны гүйдлийн үелсэн байгуулагч 1.169 кА-ын гүйдлийн симуляц



Б). 2 фазын богино залгааны гүйдлийн үелсэн байгуулагч 1.452 кА-ын симуляц



В) 3 фазын богино залгааны гүйдлийн үелсэн байгуулагч 1.8 кА-ын гүйдэл ба цохилтын 2.29 кА-ын гүйдлийн симуляц

9-р зураг Газардлагын гүйдлийн осциллограммууд

PSCAD, PowerFactory, IEC 60909-ийн үз дүнгүүдийг болон реклоузерийн аваарын үеийн бичлэгтэй харьцуулсан байдлыг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв.

ҮР ДҮНГИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

	1 фазын богино залгааны үелсэн байгуулагч, kA	2 фазын богино залгааны үелсэн байгуулагч, kA	3 фазын богино залгааны үелсэн байгуулагч, kA	Цохилтын гүйдэл, kA
PSCAD	1.169	1.452	1.8	2.29
PowerFactory	0.992	1.431	1.652	2.383
IEC 60909	0.989	1.427	1.648	2.35
Реклоузер аваарын үеийн бичлэг	-	1.429	-	-

Мөн энэ бүх тооцоо симуляцыг хэр үнэмшилтэй, хэр ойролцоог шалгахын тулд Гачуурт 35кВ-ын ЦДАШ реклоузерийн 2 фазын богино залгааны аваарын бичлэгтэй харьцуулж үзэв.

Үр дүнгээс PowerFactory болон IEC 60909 тооцооны зөрүү дунджаар 0.27% байсан. Хоёр программын үр дүн ерөнхийдөө ойролцоо байсан ба гачуурт ЦДАШ дээрх аваарын үеийн бичлэгээс 2 фазын богино залгааны гүйдэл 1.429 кА-тай харьцуулахад тус процессыг сайн загварчилсан гэж дүгнэв.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар 35 кВ-ын Гачуурт цахилгаан дамжуулах агаарын шугамд үүсэх нэг фаз, хоёр фаз болон гурван фазын богино залгааны гүйдлийг DIgSILENT PowerFactory болон PSCAD/EMTDC программуудаар ойролцоолсон симуляц хийж, IEC 60909 стандартын онолын тооцоотой харьцуулан судаллаа.

Ийм тус хоёр программыг богино залгааны тооцоонд ашиглах боломжтой гэж дүгнэв.

Тус үр дүнгүүдээр гарч ирсэн богино залгааны тооцоонуудыг ашиглан 35кВ-ын агаарын шугамд реклоузер сонголт болон хамгаалалтуудыг сонгож, тохируулах боломжтой.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] M.Hashmi, M.S. Modelling and analysis of Switching Overvoltages Caused by Short, ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING, VTT Technical Research Centre of Finland, 2011.

[2] Kim, B.-G.; Moon, C.-J.; Choi, S.-H.; Choi, Y.-S.; Lee, K.-M. PSCAD-Based Analysis of Short-Circuit Faults and Protection Characteristics in a Real BESS–PV Microgrid. *Energies* **2026**, *19*, 598

[3] Ismail K.S, Kamal Sheikhyounis “Modeling Featuresof a Single Phase-to-Earth Fault in a Medium VoltageOverhead Transmission Line” UKH journal of Scienceand Engineering, 2020 ،2،127

[4] Funso K. Ariyo, Electrical network reduction for load flow and short-circuit calculations using powerfactory software, Department of Electronic and Electrical Engineering, Ile-Ife, Nigeria, 2013

[5] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388-399, April 1969

600 МВТ-ЫН ЧАДАЛТАЙ БӨӨРӨЛЖҮҮТ ДУЛААНЫ ЦАХИЛГААН СТАНЦЫН МАНЕВРЛАХ ЧАДВАРЫГ ДЭЭШЛҮҮЛЭХ ЗОРИЛГООР ДУЛААН ХУРИМТЛУУРЫН СИСТЕМИЙГ НЭГТГЭХ СУДАЛГАА

Мөнхбаярын ТӨРТОГТОХ[1], Шагдарын ЭНХБАЯР[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, ДЦС-ын тэнхим

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Дулааны техник, үйлдвэрлэлийн экологийн хүрээлэн

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: enkhbayar.sh@must.edu.mn[2]

Хураангуй: ***Дэлхий даяар эрчим хүчний хэрэглээ нэмэгдэж, хүлэмжийн хийн ялгарал, уур амьсгалын өөрчлөлт, агаарын бохирдол зэрэг асуудлуудаас шалтгаалан сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн суурилагдсан хүчин чадал болон үйлдвэрлэл хурдацтай өсөж байна. Гэвч сэргээгдэх эрчим хүчний хэлбэлзэл ихтэй, тасалдалтай шинж чанараас үүдэн эрчим хүчний системийн найдвартай ажиллагаа доголдох эрсдэл нэмэгдэж байна. Энэ асуудлыг шийдвэрлэх боломжит аргуудын нэг нь дулаан хуримтлуурын системийг дулааны цахилгаан станц (ДЦС)-тай нэгтгэн ашиглах арга юм. Энэхүү судалгаанд Бөөрөлжүүтийн ДЦС-тай нэгтгэн ашиглах боломжит хоёр төрлийн дулаан хуримтлуурын системийн загварыг Ebsilion Professional программ хангамж ашиглан боловсруулж, системийн ажиллагааны гүйцэтгэл болон үр ашгийн үзүүлэлтүүдийг тооцоолов. Судалгааны үр дүнд ДЦС-ын техникийн хамгийн бага ачааллыг 30%-иас 22% хүртэл бууруулах боломжтойг тогтоов. Мөн хуримтлуулсан дулааныг оргил ачааллын үед сэргээн халаах авлагын уурыг орлуулах замаар 18.849 МВт цахилгаан чадлыг нэмж үйлдвэрлэх боломжтой бөгөөд ингэснээр ДЦС-ын цахилгаан үйлдвэрлэлийг богино хугацаанд өсгөж, импортоор авах эрчим хүчний хэрэглээг бууруулах, сэргээгдэх эрчим хүчний богино хугацааны чадлын өөрчлөлтийг тохируулах боломж бүрдэнэ. Системийн шөнийн бага ачааллын үед дулаан хуримтлуулах хугацааг дунджаар 5 цаг гэж үзвэл хуримтлуулсан дулааныг суллах үед нийтдээ 132.82 МВт цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх боломжтой байна. Дулаан хуримтлуурын системийг ДЦС-тай нэгтгэх нь станцын маневрлах чадварыг нэмэгдүүлж, бага ачааллын үед системийн тогтвортой ажиллагааг хангах, оргил ачааллын үед хуримтлуулсан дулаанаар цахилгаан үйлдвэрлэлийг богино хугацаанд нэмэгдүүлэх боломжтойг харуулж байна. Монгол улсын эрчим хүчний системд сэргээгдэх эрчим хүчний суурилагдсан хүчин чадал нэмэгдэж, импортоос хамаарах хамаарлыг бууруулах шаардлага үүсэж буй нөхцөлд дулаан хуримтлуурын систем нь эрчим хүчний системийн найдвартай, тогтвортой ажиллагааг хангах чухал технологийн нэг болох боломжтой юм.***

Түлхүүр үг: Дулааны цахилгаан станц; Маневрлах чадвар; Үр ашиг; Дулаан хуримтлуурын систем; Ebsilion Professional, Процессын загвар.

I. УДИРТГАЛ

Дэлхий дахинд эрчим хүчний шилжилт хурдацтай явагдаж буй өнөө үед эрчим хүчний салбар урьд өмнө байгаагүй сорилт ба боломжуудтай тулгарч байна. Сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийн суурилагдсан хүчин чадал эрчимтэй нэмэгдэж байгаа ч чулуужсан түлшинд суурилсан цахилгаан үйлдвэрлэл, ялангуяа дулааны цахилгаан станцууд нь дэлхийн эрчим хүчний хангамжийн чухал бүрэлдэхүүн хэвээр байна [1]. Нар, салхины цахилгаан станцуудын үйлдвэрлэл нь байгаль, цаг уурын нөхцөлөөс шууд хамааралтай тул цахилгаан ачааллын хоногийн болон улирлын хэлбэлзэл нэмэгдэх хандлагатай байдаг. Ийм нөхцөлд эрчим хүчний системийн найдвартай ажиллагааг хангахын тулд нүүрсээр ажилладаг ДЦС-уудыг зөвхөн суурь ачаалал хангах эх үүсвэр байдлаар бус, харин ачааллын графикийн тохируулгад идэвхтэй оролцох, маневрлах чадвар өндөртэй эх үүсвэр болгон ашиглах шаардлага үүсэж байна [2].

Гэвч нүүрсээр ажилладаг дулааны цахилгаан станцуудын маневрлах чадвар нь турбины механик боломжуудаас илүүтэйгээр зуухны ажиллагааны горимын хязгаарлалтаар тодорхойлогддог. Турбин нь харьцангуй богино хугацаанд ачааллаа өөрчлөх боломжтой боловч зуухны төхөөрөмж нь гидравлик горимын найдвартай байдал, галын хотлын процессын тогтворжилт, уурын параметрийг хэвийн хэмжээнд барих, шаарга зайлуулалтын найдваржилт болон автоматжуулалтын системийн найдвартай ажиллагаа зэрэг шалтгаануудаас хамаарч ачааллыг хурдан бууруулах, нэмэгдүүлэх боломжийг хязгаарладаг [3].

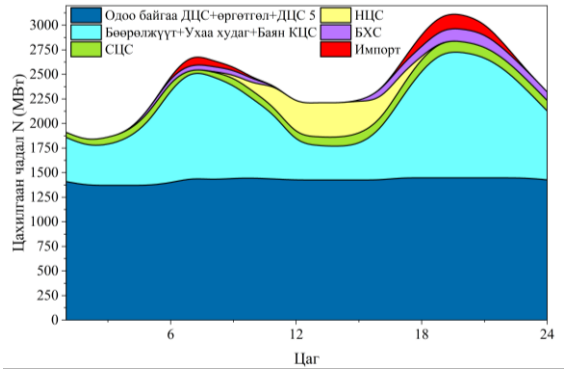
Зуухны ачаалал буурах тусам шаталт тогтворгүй болж дутуу шаталт ихэсдэг ба шаталтын процессын тогтвортой байдлыг хадгалахын тулд мазут, дизель зэрэг үнэтэй импортын түлшээр дөлийг шүршиж шаталтыг дэмждэг [4]. Иймээс зуухны техникийн хамгийн бага тогтвортой ачааллын түвшин ихэвчлэн хэвийн бүтээмжийн 30–40% орчимд хязгаарлагддаг гэж судалгаанд дурдсан байдаг. Мөн бага ачааллын үед утааны хий хөрж, хий дэх чийгшил нэмэгдэх нь хүхрийн хүчлийн конденсац үүсэх нөхцөлийг бүрдүүлж, халах гадаргуугийн зэврэлт эрчимжих аюултайг олон улсын судалгаанд онцлон тэмдэглэсэн байдаг [5]. Сүүлийн жилүүдэд дээрх асуудлыг шийдвэрлэх боломжит аргын нэг нь дулаан хуримтлуурын системийг ДЦС-тай нэгтгэх явдал юм. Дулаан хуримтлуурын систем нь бага ачааллын үед илүүдэл дулааныг хуримтлуулж, оргил ачааллын үед хуримтлагдсан дулааныг ашиглан цахилгаан үйлдвэрлэлийг нэмэгдүүлэх боломж олгодог. Ингэснээр ДЦС-ын ачаалал өөрчлөлтийн хурд нэмэгдэж, техникийн хамгийн бага ачааллын хязгаар буурч, ерөнхий маневрлах чадвар илт нэмэгддэг болохыг олон судалгаа харуулсан байна [6,7,8]. Дулаан хуримтлуурын системийг зөвхөн онолын

судалгаанд бус практикт туршин хэрэгжүүлэх төслүүд БНХАУ-д олноор хэрэгжиж эхэлсэн бөгөөд дулаан хуримтлуурын системийг нүүрсээр ажилладаг ДЦС-тай хослуулсан бодит жишээг зураг 1-т үзүүлэв.



1-р зураг. БНХАУ-ын Сужоу хотод байрлах дулаан хуримтлууртай хосолсон 600 МВт-ын ДЦС

1-р зурагт үзүүлсэн БНХАУ-ын Сужоу хотод байрлах 600 МВт хүчин чадалтай дулааны цахилгаан станцад 1000 МВт·цаг багтаамжтай, халуун болон хүйтэн хоёр бактай хайлмал давсанд суурилсан дулаан хуримтлуурын системийг нэгтгэсэн байна. Энэхүү системийг ашигласнаар ДЦС-ын техникийн хамгийн бага ачааллын хязгаар буурч, ачаалал өөрчлөх хурд нэмэгдэхийн зэрэгцээ жилд 128 сая кВт·цаг сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээг нэмэгдүүлэх боломж бүрдсэн. Түүнчлэн жилд ойролцоогоор 85000 тонн нүүрстөрөгчийн ялгарлыг бууруулах үр нөлөөтэй гэж тооцоологдсон байна [9]. 2030 он гэхэд Монгол улсын төвийн бүсийн эрчим хүчний систем (ТБЭХС)-ийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ 3000 МВт хүрэх төлөвтэй байна [10]. Зураг 2-т 2030 оны түвшний цахилгаан эрчим хүчний хоногийн ачааллын графикийг үзүүлэв.



2-р зураг. 2030 оны түвшний ТБЭХС-ийн хоногийн цахилгаан ачааллын график

2-р зургаас харахад хагас оргил болон оргил ачааллын үед конденсацын төрлийн ДЦС-ууд эрчим хүчний системд голлох үүрэг гүйцэтгэж байгааг харж болно. Цаашид сэргээгдэх эрчим хүчний суурилагдах хүчин чадал нэмэгдэж, импортын хэрэглээнээс татгалзан бие даасан эрчим хүчний системтэй болох үед ДЦС-ууд, тэр дундаа конденсацын төрлийн ДЦС-уудын маневрлах чадвар чухал ач холбогдолтой болно. Ийм нөхцөлд станцуудыг эрчим хүчний системийн ачааллын хэлбэлзэлтэй уялдуулан ажиллуулахын тулд дулаан хуримтлуурын системтэй зайлшгүй нэгтгэн ашиглах шаардлагатай. Гэсэн хэдий ч дулаан хуримтлуурын системийг тодорхой станцад нэвтрүүлэх боломж нь тухайн орны эрчим хүчний системийн бүтэц, эдийн засгийн нөхцөл, мөн станцын технологийн онцлогоос ихээхэн хамаардаг. Иймд энэхүү судалгаанд Монгол Улсын нөхцөлд дулаан хуримтлуурын системийг дулааны цахилгаан станцтай нэгтгэх боломжийг судалж, түүний ажиллагааны гүйцэтгэл болон гарах үр дүнг тооцоолон үнэлэв.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

1. Судалгааны объект

Энэхүү судалгааны объект Монгол улсын ТБЭХС-ийн томоохон эх үүсвэр болох Бөөрөлжүүтийн 600 МВт-ын чадалтай ДЦС юм. Төслийн эхний ээлжид 2х150 МВт буюу нийт 300 МВт-ын хүчин чадалтай 2 блок ашиглалтад орж бүрэн хүчин чадлаараа ажиллаж байгаа бол төслийн хоёрдугаар үе шатанд дахин 300 МВт-аар өргөтгөж нийт төслийн суурилагдсан хүчин чадал 600 МВт болно. Бөөрөлжүүтийн ДЦС-ын 150 МВт чадалтай 1-р эрчим хүчний блокт DG-529/13.8-II-1 маркийн, цагт 138 ата даралттай, 540°C температуртай, 529 тонн зарцуулалтай хэт халсан уур үйлдвэрлэдэг уурын генератор, мөн NZK-150/13.24-535/535 маркийн уурын турбин суурилагдсан ба турбин орох уурын даралт 132.4 ата, температур 535°C бөгөөд завсрын уур халаагуурын дараах уурын температур 535°C тус тус байна. Энэхүү турбин нь ӨДЦ-ийн 22, НДЦ-ийн 16 үетэй, тохируулгагүй 6-н сэргээн халаах авлагатай [11].

2. Дулаан хуримтлуурын системийн технологийн шинжилгээ

Дулаан хуримтлуурын системийн үр ашиг нь дулаан хадгалах материалаас шууд хамаардаг. Дулаан хадгалах материалыг сонгохдоо дулаан багтаамж өндөр, өндөр температурт задардаггүй, дулаан дамжуулалтын коэффициент өндөр, зэврэлт үүсгэх эрсдэл бага, мөн өртөг харьцангуй бага байх зэрэг шалгуур үзүүлэлтүүдийг харгалзан үздэг. Эдгээр шаардлагуудыг харгалзан үзвэл хайлмал давс нь дулаан хуримтлуурын системд ашиглахад тохиромжтой материалын нэг болохыг олон судалгаанд онцолсон байна [12,13].

Хайлмал давсанд суурилсан дулаан хуримтлуурын систем нь хадгалалтын нэгж өртгийн хувьд батарей хуримтлуурын системтэй харьцуулахад харьцангуй бага бөгөөд том хүчин чадлын хувьд системд өргөтгөхөд эдийн засгийн хувьд илүү үр ашигтай болохыг судалгаанууд баталсан байна [14]. Түүнчлэн олон улсын туршлагаас харахад хайлмал давсны дулаан хуримтлуурын систем нь төвлөрүүлэгч технологитой нарны дулааны цахилгаан станцуудад үйлдвэрлэлийн хэмжээнд амжилттай хэрэгжиж, найдвартай ажиллагаа болон урт хугацаанд ашиглах боломжтой нь батлагдсан байна [15].

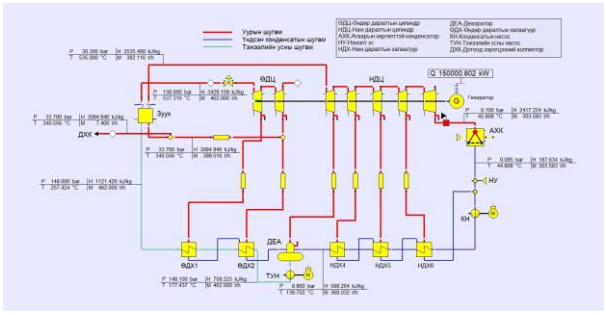
Хайлмал давсыг халаах технологийг үндсэндээ уур, утааны хий болон цахилгаанаар халаах боломжтой. Утааны хийн дулааныг ашиглах арга нь

дулаан солилцох гадаргуугийн талбай их шаарддаг, зэврэлт үүсэх эрсдэл өндөр, мөн дулаан дамжуулалтын коэффициент бага зэрэг сул талуудтай. Харин цахилгаанаар халаах аргын хувьд цахилгааныг шууд дулаанд хувирган хайлмал давсыг халаах нь эдийн засгийн хувьд үр ашиг багатай, эрчим хүчний зардал өндөр, эксергийн алдагдал их байдаг [16].

Иймээс өндөр чадлын нүүрсний ДЦС-уудад хайлмал давсыг уураар халаах арга нь эдийн засгийн болон ашиглалтын хувьд илүү оновчтой шийдэлд тооцогдож байна. Мөн уураар халаах аргыг сонгосноор бага ачааллын үед турбинд орох хурц уураас тодорхой хэмжээгээр салган авч хайлмал давсыг халааснаар турбинд орох уурын зарцуулалт буурч, үйлдвэрлэх цахилгаан чадал багассанаар зуух ба турбиныг салангид горимоор ажиллуулах боломжтой болно.

3. Загварчлалын арга зүй

Энэхүү судалгаанд дулааны цахилгаан станц, сэргээгдэх эрчим хүч болон эрчим хүч хадгалах системүүдийн дулаан-техникийн процессын загварчлал, тооцоонд өргөн хэрэглэгддэг Ebsilion Professional программ хангамжийг ашигласан. Энэ программ нь дулаан болон массын баланс, энерги болон эксергийн шинжилгээнд суурилсан тооцооллыг нэгтгэн гүйцэтгэх боломж олгодог бөгөөд эрчим хүчний системийн суурь болон хувьсах горимыг нарийвчлан загварчлахад тохиромжтой [17]. Иймээс энэхүү программ дээр Бөөрөлжүүт ДЦС-ын процессын загварыг боловсруулсан бөгөөд тус загварыг 3-р зурагт үзүүлэв.



3-р зураг. Бөөрөлжүүт ДЦС-ын Ebsilion Professional дээрх загвар

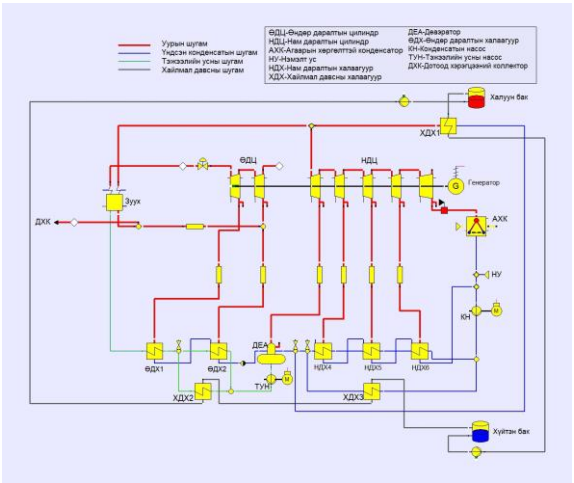
Процессын загварыг баталгаажуулахын тулд Бөөрөлжүүт ДЦС-ын 100% болон 50%-ын ачааллын горимд үндсэн параметрүүдийг үйлдвэрлэгчийн техникийн үзүүлэлттэй харьцуулсан. Хүснэгт 1-ээс харахад хамгийн их харьцангуй алдаа 1.74%-иас бага байгаа нь энэхүү судалгаанд ашигласан процессын загвар үнэн зөв болсон тул, цаашид судалгаа тооцоололд ашиглаж болно гэж үзсэн.

1-Р ХҮСНЭГТ. БӨӨРӨЛЖҮҮТ ДЦС-ЫН ҮЙЛДВЭРИЙН ӨГӨГДӨЛ БОЛОН ЗАГВАРЫН УТГЫН ҮНДСЭН ПАРАМЕТРҮҮДИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

Параметр	Горим	Үйлдвэрийн өгөгдөл	Загварын үр дүн	Харьцангуй алдаа (%)
Цахилгаан чадал, (МВт)	100%	150	150	0
	50%	75	75.002	0.003
Хэт халсан уурын даралт, (бар)	100%	132.4	132.4	0
	50%	73.5	73.5	0
Хэт халсан уурын зарцуулалт, (т/ц)	100%	462	462	0
	50%	227.8	227.8	0
Завсрын уурын даралт, (бар)	100%	30.3	30.3	0
	50%	15.6	15.6	0
Завсрын уурын зарцуулалт, (т/ц)	100%	382	382.24	0.063
	50%	195.8	196.3	0.255
Тэжээлийн усны температур, (°C)	100%	257.1	257.4	0.177
	50%	219.5	219.3	-0.091
Уурын хувийн зарцуулалт, (кг/кВт.ц)	100%	3.082	3.08	-0.065
	50%	3.035	3.037	0.074
Дулааны хувийн зарцуулалт, (кДж/кВт.ц)	100%	8274	8381.3	1.28
	50%	8855	9012.2	1.74

4. Дулаан хуримтлуурын системийн нэгтгэсэн загвар

Хайлмал давсыг халаах дулааны эх үүсвэрийг ихэвчлэн өндөр даралтын цилиндрт орох хурц уур болон нам даралтын цилиндрт орох завсрын уураас салган авч ашигладаг. Хурц уураас салган авч хайлмал давсыг халаах тохиолдолд өндөр даралтын цилиндрээс гарах, өөрөөр хэлбэл зууханд дахин халаагдахаар очих уурын зарцуулалт буурдаг. Үүний улмаас зуухны завсрын халаагуурт хэт халалт үүсэж, хоолой шатах эрсдэлтэй тул энэхүү судалгаанд хайлмал давсыг халаах дулааны эх үүсвэрээр завсрын халаагуурт анхны температур хүртлээ халаагдсан уур (завсрын уур)-ыг сонгон ашигласан. Ингэснээр зуухны системд нэмэлт өөрчлөлт хийх шаардлагагүй болох давуу талтай. Энэхүү судалгаанд дулаан хуримтлуулах системийг Бөөрөлжүүтийн ДЦС-тай нэгтгэх боломжит хоёр төрлийн загварыг боловсруулж 4 болон 5-р зурагт үзүүлэв.

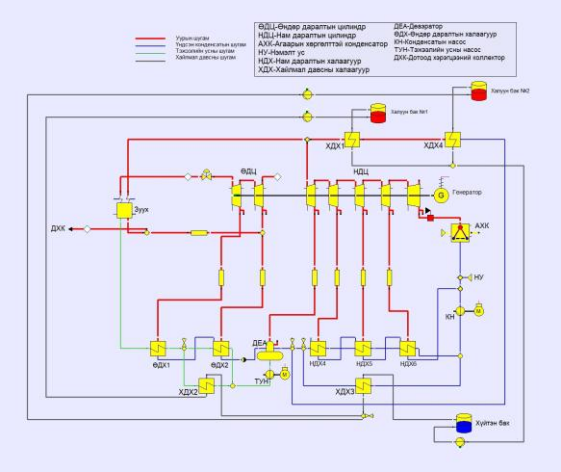


4-р зураг. Дулаан хуримтлуурын системийн нэгтгэсэн загвар №1

4-р зурагт үзүүлсэн загвар №1-д хүйтэн бакаас ирсэн хайлмал давсыг завсрын уураас тодорхой зарцуулалттай уур салган авч халаан халуун бакыг цэнэглэнэ. Завсрын уур хайлмал давсанд дулаанаа

өгсний дараа конденсацлагдаж, үүссэн конденсат нь деаэратор руу буцан орсноор бүтэн цикл болно.

Харин цэнэг суллах процессын үед халуун баканд хуримтлагдсан хайлмал давсаар оргил ачааллын үед тэжээлийн ус болон үндсэн конденсатыг сэргээн халаах авлагын уурын оронд халаана. Тэжээлийн ус, үндсэн конденсатад дулаанаа өгсөн хайлмал давс хөрж хүйтэн бак руу буцан хуримтлагдана. Тэжээлийн ус, үндсэн конденсатыг хайлмал давсаар халааснаар сэргээн халаагуурууд турбинаас авах уурын зарцуулалт буурч, үүний үр дүнд турбинд ажиллах уурын зарцуулалт нэмэгдэнэ. Ийнхүү ДЦС-ын цахилгаан үйлдвэрлэлийг богино хугацаанд нэмэгдүүлэх боломжтой болно.



5-р зураг. Дулаан хуримтлуурын системийн нэгтгэсэн загвар №2

5-р зурагт үзүүлсэн загвар №2 нь загвар №1-ээс ялгаатай нь уурын дулааныг “өндөр” болон “нам” температурын бүс гэсэн шаталсан байдлаар ашиглах зорилготой. Эхний халаагуурт завсрын уурын өндөр температурын бүсийн дулааныг ашиглан хайлмал давсыг халааж халуун бак №1-ийг цэнэглэнэ. Энэ шатанд уурын температур харьцангуй өндөр байдаг тул хайлмал давсыг илүү өндөр температурт халаан хадгалах боломж бүрддэг.

Эхний шатны халаагуурын дараа уур нь ханалтын температуртай чийглэг ханасан төлөвт шилжин дараагийн халаагуурт дамжин орно. Хоёр дахь халаагуурт энэхүү уурын үлдсэн дулааныг ашиглан хайлмал давсыг халааж халуун бак №2-ыг цэнэглэнэ.

5. Тооцооллын параметрүүд ба нөхцөлүүд

Ebsilion Professional программ хангамжийн алгоритмууд нь физик тэгшитгэлүүд, олон гишүүнт илэрхийлэл болон бодисын шинж чанарын муруйнууд дээр суурилдаг. Энэхүү судалгаанд тоон загварчлал, системийн гүйцэтгэлийн болон үр ашгийн шинжилгээний аргуудыг ашигласан. Судалгаанд хэрэглэсэн загварт ашиглагдсан зарим үндсэн тэгшитгэл, тооцооны томьёонуудыг дараах байдлаар үзүүлэв.

Эквивалент циклийн үр ашиг ($\eta_{эц}$) нь цэнэглэх болон цэнэг суллах хоёр процессыг хамтад нь үнэлэх үзүүлэлт бөгөөд дулаан хуримтлуурын системд хуримтлагдсан дулааныг цахилгаан энерги болгон хувиргах боломжийг илэрхийлдэг. Иймээс энэхүү үзүүлэлт нь дулаан хуримтлуурын системийн нийт ажиллагааны үр ашгийг тодорхойлоход чухал ач холбогдолтой. Эквивалент циклийн үр ашгийг дараах байдлаар тодорхойлно:

$$\eta_{эц} = \frac{\Delta N_{цс} \cdot \tau_{цс}}{\Delta N_{ц} \cdot \tau_{ц}} \cdot 100\% \qquad (1)$$

Энд: $\Delta N_{ц}$, $\Delta N_{цс}$ – Дулаан хуримтлуурын систем нэгтгэснээр цэнэглэх, цэнэг суллах процессд гарах чадлын өөрчлөлт, (МВт); $\tau_{ц}$, $\tau_{цс}$ – цэнэглэх, цэнэг суллах хугацаа, (ц)

Цэнэглэх, цэнэг суллах процессын чадлын өөрчлөлт:

$$\Delta N_{ц} = \Delta N_{н} - \Delta N_{цд} \qquad (2)$$

$$\Delta N_{цс} = N_{цсд} - N_{н} \qquad (3)$$

Энд: $\Delta N_{ц}$, $\Delta N_{цс}$ – Дулаан хуримтлуурын систем нэгтгэснээр цэнэглэх, цэнэг суллах процессын дараах гарах чадал, (МВт); $N_{н}$ – Цэнэглэх, цэнэг суллах процессын үед станцын ачааллын суурь горим дахь нэрлэсэн чадал, (МВт)

Цэнэг суллах хугацаа ($\tau_{цс}$) нь хайлмал давсны массын баланс дээр тулгуурлана.

$$\tau_{цс} = \frac{m_{ц} \cdot \tau_{ц}}{m_{цс}} \qquad (5)$$

Энд: $m_{ц}$, $m_{цс}$ – Дулаан хуримтлуурын системийн цэнэглэх, цэнэг суллах процессын хайлмал давсны массын урсгал, (т/ц)

Эксергийн үр ашгийг тооцох нь эрчим хүчний системийн загварчлал, гүйцэтгэлийн үнэлгээ болон ашиглалтын оновчлол хийхэд өргөн хэрэглэгддэг үр дүнтэй арга юм. Эксерги нь систем гадаад орчинтой термодинамик тэнцвэрийн төлөвт хүрэх үед гарган авч болох хамгийн их ашигтай ажлыг илэрхийлдэг [18]. Халаагуурын эксергийн үр ашиг:

$$\eta_{эк} = \frac{\Delta E_{хү}}{\Delta E_{ха}} \cdot 100\% \qquad (6)$$

Энд: $\Delta E_{ха}$, $\Delta E_{хү}$ – Халаагуурын халуун болон хүйтэн талын эксергийн баланс, (МВт).

Халаагуурын халуун болон хүйтэн талын эксергийн балансыг дараах байдлаар илэрхийлнэ:

$$\Delta E_{ха} = m_{ха} \cdot [(h_1 - h_2) - T_0 \cdot (s_1 - s_2)] \qquad (7)$$

$$\Delta E_{хү} = m_{хү} \cdot [(h_2 - h_1) - T_0 \cdot (s_2 - s_1)] \qquad (8)$$

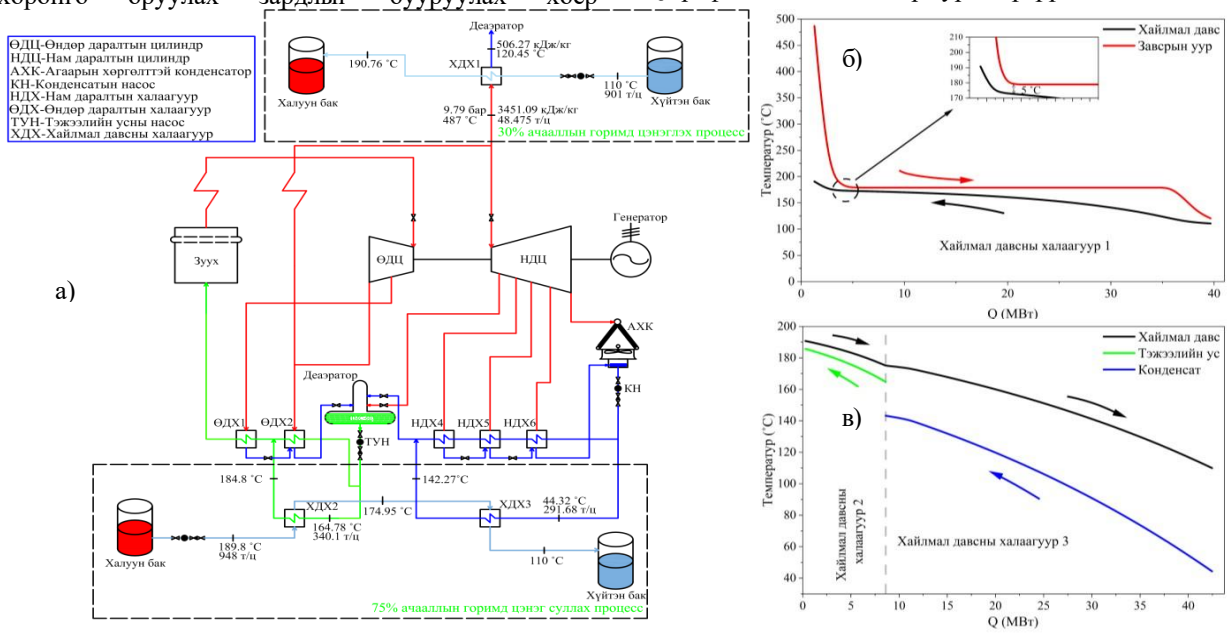
Энд: $m_{ха}$, $m_{хү}$ – Халуун, хүйтэн талын массын зарцуулалт, (т/ц); h_1, h_2 – Халаагуур луу орох, гарах ажлын биеийн дулаан агуулалт, (кДж/кг); s_1, s_2 – Халаагуур луу орох, гарах ажлын биеийн энтропи, (кДж/кг·К); T_0 – Орчны температур, (298 К)

III. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Дулааны эх үүсвэрээр ашиглах завсрын ууранс салган авах уурын зарцуулалтыг тооцохдоо НДЦ-т орох уурын зөвшөөрөгдөх хамгийн бага зарцуулалтаар хязгаарлана. Энэхүү хамгийн бага зарцуулалт нь турбины сүүлийн үеүдийн

хүрзмүүдийг хангалттай хэмжээнд хөргөх үүрэгтэй. Эх сурвалж [19]-т дурдсанаар хамгийн бага уурын зарцуулалт нь нэрлэсэн уурын зарцуулалтын 10% орчим байна [20]. Харин энэхүү судалгаанд тоног төхөөрөмжийн аюулгүй ажиллагааг хангах үүднээс уг утгыг 20% гэж нөөцтэйгөөр тооцсон болно.

Салган авсан уурыг хүйтэн бакаас ирэх хайлмал давстай дулаан солилцоо хийх үед уур нь конденсацийн фазын шилжилт хийдэг тул дулаан солилцооны хамгийн бага температурын зөрүүг тодорхойлох шаардлагатай. Энэхүү температурын зөрүүг сонгох нь эксергийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, хөрөнгө оруулах зардлыг бууруулах хоёр шаардлагын хоорондын баланс юм. Судалгаанд энэ зөрүү нь 5°C байхад үр ашиг сайжирч, зардал өсөхгүй байх тохиромжтой утга гэж баталсан [21]. Дээрх шаардлагуудыг ханган хайлмал давсны зарцуулалт, температур тооцоологдох юм. Загвар тус бүрд ачааллын 75%, 50% болон 30%-ын ачааллын горимд цэнэглэх процессыг, мөн практикт түгээмэл тохиолддог 75%-ын ачааллын горимд цэнэг суллах процессыг гүйцэтгэн гарах үр дүнг тооцсон. Цэнэглэх болон цэнэг суллах процессын жишиг горим дахь ажиллагааны параметрүүдийг тодорхойлсон зарчмын схем болон дулаан солилцооны үед үүсэх T–Q графикийг 6 болон 7-р зурагт үзүүлэв.



6-р зураг. а) Загвар №1-ийн дулаан хуримтлуурын системийг нэгтгэн, параметрүүдыг тодорхойлсон зарчмын схем; б) Хайлмал давсны халаагуур 1-ийн T-Q график; в) Хайлмал давсны халаагуур 2,3-ын T-Q график

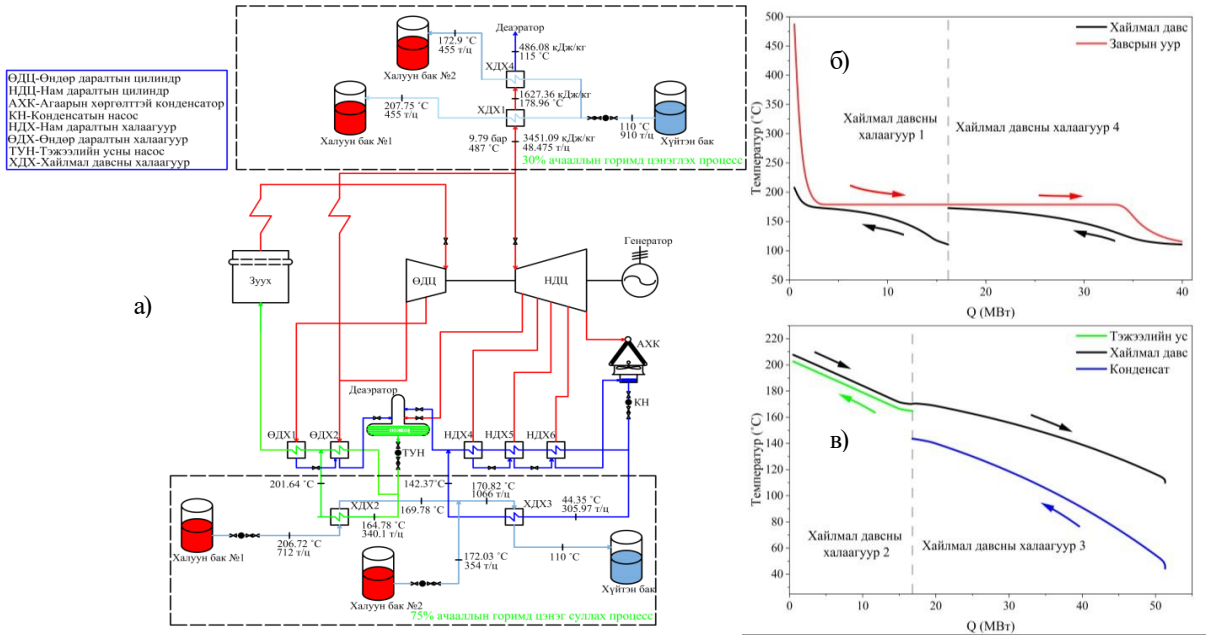
Зураг 6-д үзүүлсэн загвар №1-д хүйтэн бакаас ирэх 110°C температуртай, 901 т/ц зарцуулалттай хайлмал давсыг турбины завсрын ууранд халлаж 190.76°C температурт хүргэн халуун бакыг цэнэглэнэ. Салган авах уурын зарцуулалтыг тооцохдоо НДЦ-т орох уурын хамгийн бага зөвшөөрөгдөх зарцуулалтаар хязгаарласан бөгөөд 48.475 т/ц уурыг салган авна. Хайлмал давсыг халаасны дараа уур нь 120.45°C температуртай, 506.27 кДж/кг дулаан агуулалттай конденсат болж деаэратор руу буцна. Энэхүү халаагуурын хамгийн бага температурын зөрүү 5°C байна.

Цэнэг суллах процессын үед эхний халаагууранд деаэратороос гарах 340.1 т/ц зарцуулалттай тэжээлийн усыг 189.8°C температуртай, 948 т/ц зарцуулалттай хайлмал давсаар 164.78°C-ээс 184.8°C хүртэл халлаж ӨДХ1-ийн орох шугам руу өгнө. Энэ халаагуурын хамгийн бага температурын зөрүү мөн 5°C байна. Тэжээлийн усыг халаасны дараа хайлмал давсны температур 174.95°C хүртэл буурч, дараагийн халаагуурт дамжин орно.

Дараагийн халаагуурт конденсатороос гарах үндсэн конденсатыг 44.32°C-ээс 142.27°C хүртэл халласнаар хайлмал давсны температур 110°C хүртэл буурч, хүйтэн бак руу буцна. Деаэраторт орох тэжээлийн усыг хэт халлаах тохиолдолд ус буцлах эрсдэлтэй тул түүний температурыг хэвийн горимын утгад барих шаардлагатай.

Зураг 7-т үзүүлсэн загвар №2 нь хоёр халуун бактай бөгөөд ачааллыг тэнцвэржүүлэх зорилгоор хайлмал давсны зарцуулалтыг тэнцүү байхаар тооцсон. Цэнэглэх процессын үед эхний халаагууранд 110°C температуртай, 455 т/ц зарцуулалттай хайлмал давсыг турбины завсрын уурын өндөр температурын бүсийн дулаанаар халлаж, 207.75°C температурт хүргэн халуун бак №1-ийг цэнэглэнэ. Хайлмал давсыг халаасны дараа завсрын уурын температур 178.96°C хүртэл буурч, чийглэг ханасан уур хэлбэрээр дараагийн халаагуурт дамжин орно. Дараагийн халаагуурт уг уур нь 110°C температуртай, 455 т/ц зарцуулалттай хайлмал давсыг 172.9°C хүртэл халаасны дараа конденсацлагдаж, 115°C температуртай, 486.08 кДж/кг дулаан агуулалттай конденсат болон

деаэратор руу буцна. Эдгээр хоёр халаагуурын хамгийн бага температурын зөрүү 5°C байна. Цэнэг суллах процессын үед эхний халаагууруар деаэратороос гарах 340.1 т/ц зарцуулалттай тэжээлийн усыг 206.72°C температуртай, 712 т/ц зарцуулалттай хуримтлагдсан хайлмал давсаар 164.78°C-ээс 201.64°C хүртэл халааж, ӨДХ1-ийн орох шугам руу өгнө. Энэ халаагуурын хамгийн бага температурын зөрүү мөн 5°C байна. Эхний халаагууруас гарах 169.78°C температуртай хайлмал давс нь халуун бак №2-оос гарах 172.03°C температуртай хайлмал давстай холилдон 170.82°C температуртай, 1066 т/ц зарцуулалттай болсноор дараагийн халаагуурт орж конденсатороос гарах үндсэн конденсатыг 44.35°C-ээс 142.37°C хүртэл халаасны дараа хүйтэн бак руу буцна.



7-р зураг. а) Загвар №2-ын дулаан хуримтлуурын системийг нэгтгэн, параметруудыг тодорхойлсон зарчмын схем; б) Хайлмал давсны халаагуур 1,4-ийн T-Q график; в) Хайлмал давсны халаагуур 2,3-ын T-Q график

Дулаан хуримтлуурын системийн ажлын параметрүүдтэй уялдуулан хайлмал давсыг дөрвөн бүрэлдэхүүнт хайлмал давсны ($LiNO_3$–$NaNO_3$–KNO_3–$Ca(NO_3)_2$) найрлагаар сонгов. Сүүлийн үеийн судалгаагаар дөрвөн бүрэлдэхүүнт нитратын холимгийг ашиглах нь хайлах температурыг мэдэгдэхүйц бууруулж, дулаан хадгалах чадварыг сайжруулах боломжтой болохыг тогтоосон байна. Мөн олон бүрэлдэхүүнт нитратын холимог нь дулаан багтаамж өндөр, зуурамтгай чанар бага, дулаан дамжуулалт сайн зэрэг шинж чанартай тул дулаан хуримтлуурын системд ашиглахад давуу талтай гэж үздэг [22]. Сонгосон дөрвөн бүрэлдэхүүнт хайлмал давсны үндсэн шинж чанаруудыг 2-р хүснэгтэд үзүүлэв.

2-Р ХҮСНЭГТ. ДӨРВӨН БҮРЭЛДЭХҮҮНТ ХАЙЛМАЛ ДАВСНЫ ҮНДСЭН ШИНЖ ЧАНАРУУД

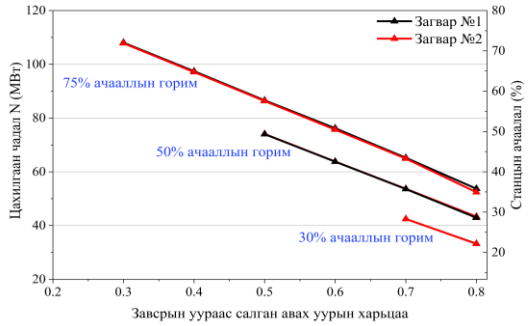
Параметр (нэгж)	Утга
Хайлах температур, (°C)	85
Задрах температур, (°C)	500
Нягт, (кг/м³)	1920
Дулаан багтаамж, (кДж/(кг·K))	1.56
Дулаан дамжуулалтын коэффициент, (Вт/(м²·K))	0.528
Зуурамтгай чанар, (МПа·с)	3.2

Хоёр төрлийн загварт завсрын уурын дулааныг өөр өөр байдлаар ашиглаж байгаа тул хайлмал давсны зарцуулалт, халуун бакны температур болон хадгалах дулааны хэмжээ харилцан адилгүй өөрчлөгдөж байна. Эдгээр хоёр загварын үндсэн үзүүлэлтүүдийг харьцуулан 3-р хүснэгтэд үзүүлэв.

3-Р ХҮСНЭГТ. ЗАГВАР ТУС БҮРИЙН 75%, 50%, 30% АЧААЛАЛТАЙ БАЙХ ҮЕД ЦЭНЭГЛЭХ ПРОЦЕССЫН ХАЙЛМАЛ ДАВСНЫ ЗАРЦУУЛАЛТ, ХАЛУУН БАКАНД ХАДГАЛАХ ДУЛААН, ХАЛУУН БАКНЫ ТЕМПЕРАТУР

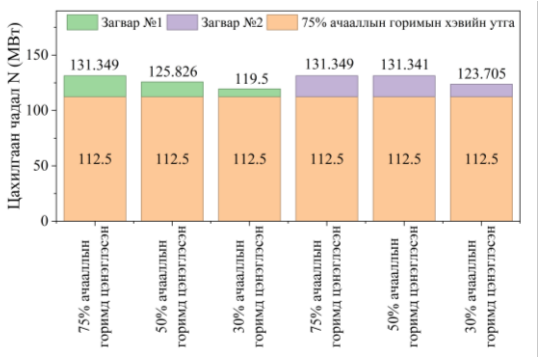
№	Цэнэглэх процесс	Хайлмал давсны зарцуулалт (т/ц)	Халуун бакаад хадгалах дулаан Q (МВт)	Халуун бакны температур (°C)	
				Халуун бак №1	Халуун бак №2
Загвар №2	75% ачаалын горимд	2308	174.4	272	213.9
	50% ачаалын горимд	1594	98.2	245.5	195.1
	30% ачаалын горимд	910	39.9	207.75	172.9
Загвар №1	75% ачаалын горимд	2277	172.5	243.73	
	50% ачаалын горимд	1571	96.8	219.91	
	30% ачаалын горимд	901	39.6	190.76	

8-р зураг завсрын ууранс салган авах уурын харьцаанаас хамааран станцын чадал хэрхэн буурч байгааг үзүүлэв. Цэнэглэх процессын үед завсрын ууранс салган авах уурын зарцуулалт ихсэх тусам станцын чадлын бууралт нэмэгдэж байна. Загвар №1 болон №2-ын хувьд завсрын ууранс салган авах уурын зарцуулалт ижил байгаа тул чадлын бууралт ойролцоо байна. Үүний үр дүнд станцын техникийн хамгийн бага ачааллыг 33.22 МВт буюу хэвийн ачааллын 22% хүртэл бууруулах боломжтой байна.



8-р зураг. Загвар №1, №2-ын цэнэглэх процесст гарах чадлын бууралт

9-р зурагт загвар тус бүрийн цэнэг суллах процессын үед гарах чадлын өсөлтийг үзүүлэв. Цэнэг суллах процессын үед загвар №2-ын халуун бакны температур загвар №1-ээс өндөр байгаа тул гарах чадлын өсөлт илүү байна. Загвар №2-ын 75% ачааллын горимд цэнэглэсэн хайлмал давсаар тэжээлийн усыг халаах явцад тэжээлийн усны температурыг хэвийн горимын утгаас хэтрүүлэхгүй байхаар тооцсон. Иймд хамгийн их чадлын өсөлт 18.849 МВт буюу 12.566 %-иар нэмэгдэх боломжтой байна.



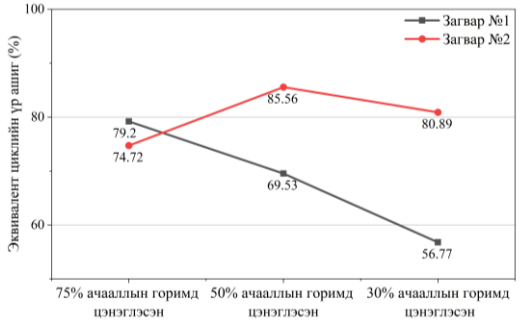
9-р зураг. Загвар №1, №2-ын цэнэг суллах процесст гарах чадлын өсөлт

Хайлмал давсны массын балансын тооцооны үр дүнд халуун бакыг 1 цагийн турш цэнэглэхэд хуримтлагдсан дулааныг ашиглан хэдэн цагийн турш цэнэг суллах боломжтойг тодорхойлж, тус үр дүнг 4-р хүснэгтэд нэгтгэн харуулав.

4-Р ХҮСНЭГТ. 75%, 50%, 30% АЧААЛЛЫН ГОРИМД ЦЭНЭГЛЭХ БА 75% АЧААЛЛЫН ГОРИМД ЦЭНЭГ СУЛЛАХ ХУГАЦАА

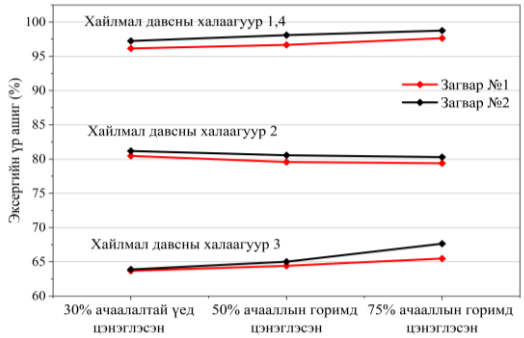
№	Цэнэглэх процесс	$\tau_ц$ (цаг)	$\tau_{цс}$ (цаг)
Загвар №1	75% ачааллын горим	1	2.52
	50% ачааллын горим	1	1.75
	30% ачааллын горим	1	0.95
Загвар №2	75% ачааллын горим	1	2.26
	50% ачааллын горим	1	1.41
	30% ачааллын горим	1	0.79

10-р зурагт эквивалент циклийн үр ашгийн өөрчлөлтийг үзүүлэв. Зурагт харагдаж байгаагаар загвар №2-ын хувьд эквивалент циклийн үр ашиг харьцангуй өндөр байна. Энэ нь цэнэг суллах үед гаргах чадлын өсөлт болон хайлмал давс ба тэжээлийн усны температурын зөрүү оновчтой тохирсонтой холбоотой юм. Харин загвар №2-ын 75% ачааллын горимд цэнэглэсэн дулааныг суллах үед тэжээлийн усны температур хэвийн горимын утгаар хязгаарлагдаж байгаа тул эквивалент циклийн үр ашиг харьцангуй бага гарч байна. Тэжээлийн усны температуртай хамгийн сайн зохицсон нөхцөл нь загвар №2-ын 50% ачааллын үед цэнэглэсэн дулаан байсан бөгөөд энэ горимд эквивалент циклийн үр ашиг хамгийн өндөр утгад хүрсэн байна.



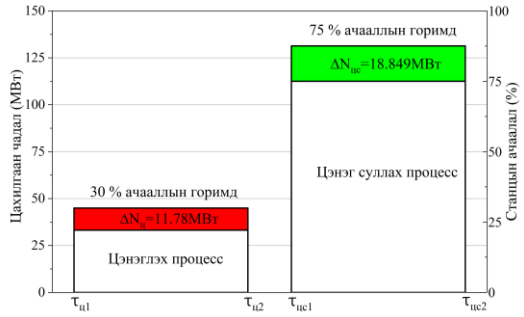
10-р зураг. Загвар №1, №2-ын эквивалент циклийн үр ашиг

11-р зурагт халуун бакыг цэнэглэх болон цэнэг суллах процессын үед хайлмал давсны халаагуурын эксергийн үр ашгийг харьцуулан үзүүлэв. Цэнэглэх процессын үед хайлмал давсны халаагуур 1 болон 4-ийн эксергийн үр ашгийг, харин цэнэг суллах процессын үед хайлмал давсны халаагуур 2 болон 3-ийн эксергийн үр ашгийг тус тус тооцоолсон. Загвар №2-ын хувьд цэнэглэх процесст ашиглагдах хайлмал давсны халаагуур 1 ба 4-ийн эксергийн үр ашгийг дунджаар авч, загвар №1-ийн хайлмал давсны халаагуур 1-тэй харьцуулсан. Цэнэглэх процессын үед уур болон хайлмал давсны хоорондох хамгийн бага температурын зөрүү 5°C байгаа тул эксергийн үр ашиг харьцангуй өндөр байна. Харин цэнэг суллах процессын үед тэжээлийн ус болон үндсэн конденсатын температурыг хэвийн горимын утгад барих шаардлагатай тул эксергийн алдагдал нэмэгдэхэд нөлөөлж байна.



11-р зураг. Загвар №1, №2-ын хайлмал давсны халаагуурын эксергийн үр ашиг

12-р зурагт жишиг горим дахь цэнэглэх, цэнэг суллах процессын хугацаагаар гарах чадлын өөрчлөлтийг үзүүлэв. Дулаан хуримтлуурын системийг ашигласнаар ДЦС-ын цахилгаан ачааллын маневрлах чадварыг сайжруулж, ачааллыг богино хугацаанд бууруулах болон нэмэгдүүлэх боломж бүрдэж байна.



12-р зураг. Жишиг горим дахь цэнэглэх, цэнэг суллах процессын хугацаагаар гарах чадлын өөрчлөлт

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү өгүүлэлд Бөөрөлжүүтийн 600 МВт-ын чадалтай ДЦС-ын нэг эрчим хүчний блокт дулаан хуримтлуурын системийг нэгтгэх боломжит хоёр төрлийн загварыг Ebsilion Professional программ хангамжийг ашиглан дизайны болон хувьсах горимд боловсруулж, системийн ажиллагааны гүйцэтгэл болон үр ашгийн үзүүлэлтүүдийг судлав. Дулаан хуримтлуурын системийг нэгтгэснээр зуухны ачааллыг өөрчлөхгүйгээр цахилгаан чадлыг бууруулах боломж бүрдэж, зуухны техникийн хамгийн бага ачааллын хязгаарыг зөрчихгүйгээр станцын техникийн хамгийн бага ачааллыг 30%-иас 22% хүртэл бууруулах боломжтойг тогтоов.

Мөн оргил ачааллын үед дулаан хуримтлуурын системд хадгалсан дулааныг ашиглан сэргээн халаах авлагын уурыг орлуулах замаар цахилгаан чадлыг 18.849 МВт-аар өсгөн богино хугацаанд цахилгаан чадлыг нэмэгдүүлснээр импортоор авах эрчим хүчний хэрэглээг тодорхой хэмжээгээр бууруулах нөхцөл бүрдэнэ.

Бөөрөлжүүт ДЦС-д нэгтгэх боломжит хоёр төрлийн дулаан хуримтлуурын системийн загварыг боловсруулж, системийн гүйцэтгэл болон үр ашгийг тооцоход эквивалент циклийн үр ашиг хамгийн өндөр гарсан горим нь 85.56% буюу загвар №2-ын 50%-ийн ачааллын горимд цэнэглэх процесс болох нь тогтоогдов. Энэхүү горимд цэнэглэх хугацааг дунджаар 5 цаг гэж үзвэл халуун баканд 491 МВт·цаг дулаан хуримтлуулах боломжтой бөгөөд уг дулааныг ашиглан цэнэг суллах процессын үед 132.82 МВт цахилгаан үйлдвэрлэх боломжтой байна.

ТАЛАРХАЛ

Энэхүү судалгааг гүйцэтгэхэд дэмжлэг үзүүлж, Ebsilon Professional программ хангамжийг судалгааны хугацаанд ашиглах боломжийг олгосон Iqony Solutions GmbH компанид гүн талархал илэрхийлье. Судалгааны ажлыг удирдсан доктор (PhD), дэд профессор Ш.Энхбаярт баярлалаа.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] International Energy Agency (IEA), *Global electricity review 2025*. Paris, France: International Energy Agency, 2025.

[2] International Energy Agency (IEA), *Flexibility in thermal power plants*. Paris, France: International Energy Agency, 2020.

[3] K. Poncelet, E. Delarue, W. D'haeseleer, "Flexibility of thermal power plants," *Energy Policy*, vol. 98, pp. 35–44, 2016.

[4] C. Xu, Z. Wang, X. Li, "Operational flexibility improvement of coal-fired power plants," *Energy Reports*, 2022.

[5] S. C. Stultz J. B. Kitto, *Steam: Its generation and use*, 41st ed. Babcock & Wilcox, 2015.

[6] R. Cao, Y. Hou, Z. Liu, L. Wang, H. Chen, "Improved structure for a molten-salt thermal storage-coupled coal-fired power unit," *Applied Thermal Engineering*, vol. 176, 2020.

[7] Y. Zhuang, J. Liu, J. Wang, "Dynamic simulation of TES-integrated coal-fired power plants," *Energy Conversion and Management*, vol. 199, 2019.

[8] Y. Sun, C. Xu, T. Xin, G. Xu, Y. Yang, "A comprehensive analysis of a thermal energy storage concept based on low-rank coal pre-drying for reducing the minimum load of coal-fired power plants," *Applied Thermal Engineering*, vol. 156, pp. 77–90, 2019.

[9] China Energy Engineering Group, "China's largest thermal power + molten salt energy storage project put into operation in Anhui," 2023.

[10] Эрчим хүчний зохицуулах хорооны стратеги төлөвлөгөө, 2023. https://energy.gov.mn/

[11] Г. Бямбатулга, Ш. Энхбаяр, М. Тайванбат, "600 МВт чадалтай Бөөрөлжүүтийн дулааны цахилгаан станцын технологийн судалгаа," ДШУИ-2024 эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэл, 2024.

[12] T. Bauer, D. Laing, R. Tamme, N. Pfleger, "Overview of PCMs for concentrating solar power in the temperature range 200 to 500°C," *Applied Energy*, vol. 94, pp. 328–336, 2012.

[13] X. Zhang, Y. Wang, J. Xu, H. Yang, "Thermodynamic and economic analysis of molten salt thermal energy storage integrated into coal-fired power plants," *Applied Thermal Engineering*, vol. 170, 115006, 2020.

[14] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, E. K. Stefanakos, "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 4, pp. 285–319, 2013.

[15] International Energy Agency (IEA), *Technology roadmap: Concentrating solar power*. Paris, France: International Energy Agency, 2020. Available: https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-concentrating-solar-power

[16] International Energy Agency (IEA), *Energy storage technology brief*. Paris, France: International Energy Agency, 2021. Available: https://www.iea.org/reports/energy-storage

[17] STEAG Energy Services GmbH, *EBSILON®Professional – User manual and technical documentation*, Version 17. Essen, Germany, 2023.

[18] E. H. Trinklein, G. G. Parker, T. J. McCoy, "Modeling, optimization, and control of ship energy systems using exergy methods," *Energy*, vol. 191, 116542, 2020. Available: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116542

[19] M. Richter, G. Oeljeklaus, K. Gorner, "Improving the load flexibility of coal-fired power plants by the integration of a thermal energy storage," *Applied Energy*, vol. 236, pp. 607–621, 2019. Available: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.099

[20] I. Khamlich, K. Zeng, G. Flamant, J. Baeyens, C. Zou, J. Li, "Technical and economic assessment of thermal energy storage in concentrated solar power plants within a spot electricity market," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, 110583, 2021. Available: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110583

[21] J. G. Cordaro, N. C. Rubin, R. W. Bradshaw, "Multicomponent nitrate salts for thermal energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011.

[22] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010.

ЦЭЦЭРЛЭГ ХОТЫН ДУЛААН ХАНГАМЖИЙГ САЙЖРУУЛАХ СУДАЛГААНЫ ЗАРИМ ҮР ДҮН

Амгаланбаярын БЯМБА-ОЧИР[1], Батсамбуугийн ӨЛЗИЙБАДРАХ[2]

[1.2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: amgalanbayrbymbaochir87@gmail.com[1]

Хураангуй: Архангай аймгийн төв Цэцэрлэг хот нь бүс нутгийн нийгэм, эдийн засаг, аялал жуулчлалын чухал төв бөгөөд хүн амын төвлөрөл, хот байгуулалтын өсөлт сүүлийн жилүүдэд эрчимжиж байна. Хотын дулаан хангамжийг одоогоор 13 ус халаах зуух бүхий жижиг эх үүсгүүрүүдээр хангаж байгаа бөгөөд нийт дулааны ачаалал 23.087 Гкал/ц, суурилагдсан хүчин чадал 24.8 Гкал/ц байна. Нөөц чадал ердөө 7% орчим байгаа нь системийн найдвартай ажиллагаанд эрсдэл үүсгэж байна. Мөн олон жижиг зуух ашиглаж буй нь түлшний зарцуулалт их, ашиглалтын зардал өндөр, байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөө ихтэй байна. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь Цэцэрлэг хотын өсөн нэмэгдэх дулааны хэрэгцээг хангах, технологийн уурын хэрэглээг дэмжих боломжийг нэмэгдүүлэн, бага чадлын дулаан ба цахилгааны төв (ДЦТ) байгуулах үндэслэлийг тодорхойлоход оршино. Судалгаанд дулааны ачааллын дүн шинжилгээ, технологийн уурын хэрэглээний үнэлгээ, уурын шугамын гидравлик тооцоо зэрэг аргуудыг ашигласан. Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд бага чадлын дулаанжуулалтын ДЦТ байгуулснаар дулаан, цахилгааныг хослон үйлдвэрлэж түлшний ашиглалтын коэффициентыг 70–85%-д хүргэх, технологийн уурын хэрэглээ бүхий хүнсний болон бүтээгдэхүүн боловсруулах үйлдвэрлэлийг хөгжүүлэх, хотын дулаан хангамжийн найдвартай байдлыг нэмэгдүүлэх боломжтой нь тогтоогдлоо. Иймд Цэцэрлэг хотын дулаан хангамжийн ирээдүйн хөгжлийг хангах стратегийн шийдэл нь төвлөрсөн бага чадлын ДЦТ байгуулах явдал гэж дүгнэв.

Түлхүүр үг: Дулаанжуулалт, хослон үйлдвэрлэл, уур хангамж, дулаан цахилгааны төв

I. УДИРТГАЛ

Монгол Улсын аймаг, сумын төвүүдэд дулаан хангамжийн систем ихэвчлэн жижиг ус халаах зууханд тулгуурласан, төвлөрөл сул, техник-эдийн засгийн үр ашиг багатай хэвээр байна. Архангай аймгийн төв Цэцэрлэг хотын хувьд хүн амын өсөлт, хот байгуулалтын тэлэлт, нийгмийн үйлчилгээний ачаалал нэмэгдэж байгаа нь дулаан хангамжийн системд шинэ шаардлага тавьж байна. Одоогийн дулааны эх үүсвэрүүд хүчин чадлын хязгаарт хүрч, нөөц чадал хангалтгүй байгаа нь системийн найдвартай ажиллагаанд эрсдэл үүсгэж байна. Ийм нөхцөлд дулаан, цахилгааныг хослон үйлдвэрлэх бага чадлын ДЦТ байгуулах боломжийг зайлшгүй судлах шаардлагатай.

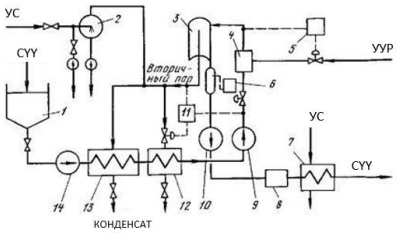
II. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ

Судалгааны объект нь Архангай аймгийн төв Цэцэрлэг хотын дулаан хангамжийн систем юм. Архангай аймаг нь 56.2 мянган км² нутаг дэвсгэртэй, 19 сум, 99 багтай бөгөөд нийт 93.6 мянган хүн амтай. Аймгийн төв Цэцэрлэг хотод 21,586 хүн ам, 6,508 өрх оршин сууж байна. Тус хот нь аймгийн нийгэм, эдийн засаг, боловсрол, эрүүл мэндийн төв бөгөөд хүн амын төвлөрөл сүүлийн жилүүдэд нэмэгдэж байна. Хотын дулаан хангамжийг одоогоор 13 ус халаах зуух бүхий тархмал эх үүсвэрээр хангаж байна. Нийт дулааны ачаалал 23.087 Гкал/ц бөгөөд суурилагдсан хүчин чадал 24.8 Гкал/ц байна. Нөөц чадал маш бага буюу ойролцоогоор 7% байгаа нь ачааллын оргил үед системийн найдвартай ажиллагааг алдагдуулах эрсдэлтэй. Мөн Архангай аймаг нь мал аж ахуйн томоохон бүс нутаг бөгөөд 4.4–4.8 сая толгой малтай. Энэ нь сүү, мах боловсруулах үйлдвэрлэл хөгжүүлэх түүхий эдийн томоохон нөөц болдог [1, 2]. Иймд Цэцэрлэг хотод хүнсний болон боловсруулах үйлдвэрүүдийг хөгжүүлэх боломжтой бөгөөд эдгээр үйлдвэрүүд технологийн уурын хэрэглээг бий болгох нөхцөлийг бүрдүүлээд байна. Үйлдвэр төлөвлөгдөж буй газрыг 1 дүгээр зурагт харууллаа.



1-р зураг. ДЦТ болон уурын хэрэглэгчдийн төлөвлөлт

1 дүгээр зургаас харахад технологийн уурын хэрэглэгчид болох шар өнгөөр төлөвлөсөн хэсэг эх үүсгүүрийн ойролцоо байгаа нь уур хангамжийн системийн дулаан алдагдал, даралтын алдагдал бага байх боломжтойг илтгэж байна. 2 дугаар зурагт сүү боловсруулах үйлдвэрийн уур хэрэглээний технологийн схемийг үзүүллээ [3].



2-р зураг. ДЦТ болон уурын хэрэглэгчдийн төлөвлөлт

III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Судалгаанд дараах үндсэн арга зүйг ашигласан. Үүнд:

1. Дулааны ачааллын шинжилгээ: Хотын одоогийн дулаан хангамжийн системийн хүчин чадал, ачааллын бүтэц, хэрэглээний өсөлтийн хандлагыг статистик болон инженерийн тооцооны аргаар үнэлэв [4].

$$Q_д = q_д \cdot V_д \cdot (t_д - t_{т.д}) \quad (1)$$

2. Технологийн уурын хэрэглээний үнэлгээ: Хүнсний болон бүтээгдэхүүн боловсруулах үйлдвэрийн уурын хэрэглээний дэлхийн болон үйлдвэрлэлийн жишиг үзүүлэлтүүдийг ашиглан Цэцэрлэг хотод үүсэх боломжит уурын ачааллыг тооцсон. 1 дүгээр хүснэгтэд жижиг, дунд үйлдвэрүүдийн жишиг хэрэглээ харуулав.

УУРЫН ЖИШИГ ХЭРЭГЛЭЭ

1-Р ХҮСНЭГТ

№	Үйлдвэрийн төрөл	Зориулалт	Уурын хэрэглээ, т/ц
1	Сүү боловсруулах	Пастеризации ба ариутгал	0.5–2
2	Мах боловсруулах	Дулаан боловсруулалт ба цэвэрлэгээнд	0.3–1.5
3	Ноос угаах	Ариутгал цэвэрлэгээ	0.5–1.5
4	Эмнэлэг, үйлчилгээ	Ариутгал цэвэрлэгээ	0.1–0.3

3. Уурын шугамын гидравлик тооцоо: Технологийн уур дамжуулах шугамын үндсэн параметрийг дараах байдлаар тодорхойлов. Шугам хоолойгоор нэвтрэн өнгөрөх уурын хурдыг 20-30 м/с-ийн хооронд сонгон тооцоолсон.

- Уурын зарцуулалт:

$$G = \rho \cdot u \cdot A \quad (2)$$

- Даралтын алдагдал:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2} \quad (3)$$

- Дулаанжуулалтын үнэлгээ

$$\eta = \frac{Q_{\text{дулаан}} + W_{\text{цахилгаан}}}{Q_{\text{түлш}}} \quad (4)$$

Бага чадлын ДЦТ-ийн дулаан ба цахилгааны хам үйлдвэрлэлийн үр ашгийг түлшний ашиглалтын коэффициентоор тодорхойлсон. Дулаанжуулалтын системд энэхүү коэффициент 70–85% хүрэх боломжтой.

IV. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ҮР ДҮН

Судалгааны үр дүнгээс дараах үндсэн дүгнэлтүүд гарсан.

- Одоогийн системийн хүчин чадлын нөөц хангалтгүй: Цэцэрлэг хотын дулааны эх үүсвэрүүд 24.8 Гкал/ц дээд хүчин чадалдаа ойртсон бөгөөд ирээдүйн ачааллыг хангах боломж хязгаарлагдмал.
- Технологийн уурын эрэлт үүсэх боломжтой: Хотын төлөвлөгөөнд тусгасан Сүү боловсруулах, мах боловсруулах, ноос угаах зэрэг үйлдвэрүүд байгуулагдвал нийт 2–4 т/ц уурын хэрэглээ бий болох боломжтой.
- Бага чадлын ДЦТ техникийн хувьд оновчтой шийдэл дулаанжуулалтын станц байгуулснаар дулаан, цахилгаан, технологийн уур зэргийг нэг эх үүсвэрээс нийлүүлэх боломжтой.
- Эдийн засгийн үр ашиг түлшний зарцуулалт 33 хувиар буурна, нэгж дулааны өртөг багасна, системийн найдвартай ажиллагаа нэмэгдэнэ
- Байгаль орчны үр ашиг олон жижиг зуухыг орлох, тоос, SO_2, NOx ялгарлыг бууруулах, хотын агаарын чанарыг сайжруулах

ДҮГНЭЛТ

Архангай аймгийн төв Цэцэрлэг хотын дулаан хангамжийн систем нь эх үүсгүүрийн суурилагдсан хүчин чадлын нөөц 7 хувьд хүрч, техник-эдийн засгийн үр ашиг багатай нөхцөлд ажиллаж байна. Хотын хүн амын өсөлт, шинэ барилга байгууламж, үйлдвэрлэлийн хөгжлийг хангахын тулд дулаан хангамжийн шинэ эх үүсвэр шаардлагатай байна.

Судалгааны үр дүнгээс харахад бага чадлын когенерацийн дулааны цахилгаан станц байгуулснаар дулаан, цахилгаан, технологийн уурыг нэг дор үйлдвэрлэж системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжтой. Мөн хүнсний болон боловсруулах үйлдвэрлэлийг хөгжүүлэх суурь дэд бүтцийг бүрдүүлэх ач холбогдолтой.

Иймд Цэцэрлэг хотод бага чадлын ДЦТ байгуулах нь техник, эдийн засаг, байгаль орчны хувьд үндэслэлтэй бөгөөд бүс нутгийн тогтвортой хөгжлийг дэмжих стратегийн шийдэл болох нь эргэлзээгүй юм

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Архангай аймгийн статистикийн эмхэтгэл, 2024.

[2] Монгол Улсын мал тооллогын урьдчилсан дүн, 2025.

[3] Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Справочник. (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн.4). Под общей ред. Клименко А.В. и Зорина В.М. М.: Издательство МЭИ, 2004. - 632 с.

[4] Б.Намхайням “Дулаан хангамжийн систем” Улаанбаатар хот, 2015 он

АЙМГИЙН ТӨВД БАГА ЧАДЛЫН ДЦТ БАЙГУУЛАХ СУДАЛГААНЫ ЗАРИМ ҮР ДҮН

Амгаланбаярын БЯМБА-ОЧИР[1], Батсамбуугийн ӨЛЗИЙБАДРАХ[1]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: amgalanbayrbymbaochir87@gmail.com[1]

Хураангуй: **Монгол Улсад эрчим хүчний хэрэглээ жилээс жилд нэмэгдэж байгаа боловч одоогийн дэд бүтэц энэ өсөлтийг бүрэн хангах боломж хязгаарлагдмал хэвээр байна. Ялангуяа нийслэлээс алслагдсан аймаг, сумдын хувьд хэрэглэгчдийн дулааны болон цахилгаан эрчим хүчний хангамж тогтворгүй, зарим бүс нутаг төвийн системээс алслагдсан байрлал нь эрчим хүчний найдвартай эх үүсгүүрийн шаардлагатай байгааг илтгэнэ. Тиймээс аймаг орон нутгийн хөгжил, үйлдвэрлэл үйлчилгээний өргөжилт, иргэдийн амьдралын чанарыг сайжруулахад дулааны болон цахилгаан эрчим хүчийг хослуулан үйлдвэрлэх орчин үеийн дулаан ба цахилгааны төв (ДЦТ) байгуулах шаардлага улам бүр тодорхой болж байна. Ихэнх аймгуудад бага чадлын ус халаах зуух ажиллуулан хэрэглэгчдийн дулааны хэрэглээг хангадаг нь үр ашиг багатай, байгаль орчинд сөрөг нөлөөтэй, мөн цахилгаан эрчим хүчний өсөн нэмэгдэж буй хэрэглээг хангах боломжгүйг илтгэнэ. Үйлдвэрлэл, үйлчилгээ, уул уурхай, хөдөө аж ахуйн бүтээгдэхүүн боловсруулах салбарууд орон нутагт хөгжихийн хэрээр тогтвортой дулааны, цахилгааны эрчим хүчний эх үүсгүүр зайлшгүй хэрэгцээтэй болж байна. Ийм нөхцөлд бага чадлын ДЦТ нь зөвхөн дулаан үйлдвэрлэх төдийгүй цахилгаан эрчим хүчийг давхар үйлдвэрлэх замаар орон нутгийн эрчим хүчний бие даасан байдлыг нэмэгдүүлэх стратегийн ач холбогдолтой шийдэл юм. Орон нутагт байгуулах бага чадлын ДЦТ-үүд нь эрчим хүчний системийн ачааллыг бууруулах, алслагдсан бүс нутгийг тогтвортой эрчим хүчээр хангах, мөн бүс нутгийн эдийн засгийн идэвхжил, хөрөнгө оруулалтыг дэмжих давхар үр өгөөжтэй. Иймээс ирээдүйн эрчим хүчний бодлогод орон нутгийн онцлог, өсөн нэмэгдэж буй эрчим хүчний хэрэглээг харгалзан аймаг бүрд ДЦТ байгуулах асуудлыг үе шаттайгаар хэрэгжүүлэх нь зүйтэй. Энэ нь Монгол Улсын эрчим хүчний аюулгүй байдлыг бэхжүүлэх, бүс нутгийн хөгжлийг жигд хангах, цаашлаад тогтвортой хөгжлийн зорилтыг хэрэгжүүлэхэд чухал юм.**

Түлхүүр үг: Эрчим хүчний хослон үйлдвэрлэл, дулаанжуулалт, дулаан хангамж.

I. УДИРТГАЛ

1. Цэцэрлэг хот нь Архангай аймгийн нийгэм, эдийн засгийн төв бөгөөд аялал жуулчлал, түүх соёл, байгаль хамгааллын чухал бүсүүд болох Тайхар чулуу, Чулуутын хавцал, Өгий нуур, Хоргын тогоо, Хорго-Тэрхийн цагаан нуур зэрэг стратегийн бүсүүдийн дэд бүтцийн тулгуур хот юм. Хотын хүн ам, барилгажилт өсөн нэмэгдэж байгаа нөхцөлд одоогийн олон бага чадлын ус халаах зуухнуудад тулгуурласан дулаан хангамжийн системийн (ДХС) нөөц чадал 7 хувь буюу суурилагдсан хүчин чадлын дээд хязгаарт хүрч, техник–эдийн засаг болон экологийн хувьд үр ашиггүй байдал үүсээд байна. Энэхүү өгүүллээр бага чадлын дулаан цахилгааны төв (ДЦТ) байгуулах судалгааны үр дүнгээс тайлагнах болно.

II. СУДАЛГААНЫ ЕРӨНХИЙ ҮНДЭСЛЭЛ

1. Нийгэм, хүн ам зүйн нөхцөл

Архангай аймаг 93.6 мянган хүн амтай, 56.2 мянган км² нутагтай. Цэцэрлэг хот 21,586 хүн ам, 6,508 өрхтэй бөгөөд аймгийн төвлөрсөн үйлчилгээ, боловсрол, эрүүл мэндийн байгууллагуудын ачаалал жил бүр өсөж байна. Хүн амын шилжилт хөдөлгөөн Цэцэрлэг хот руу төвлөрч, шинэ орон сууц, үйлчилгээний барилга нэмэгдэж дулаан хангамжийн нэгдсэн системд холбогдох зайлшгүй шаардлага үүсээд байна. Дулаан хангамжийн нэгдсэн сүлжээний төлөвлөлтийг 1 дүгээр зурагт үзүүлэв.



1-р зураг. Цэцэрлэг хотын дулаан хангамжийн төлөвлөлт

2. Одоогийн ДХС-ийн нөхцөл

Нийт 275 хэрэглэгчдийг дулаанаар хангахаар тус тусдаа 13 ширхэг бага чадлын ус халаах зуухны газрууд ажилладаг. Нийт дулааны ачаалал 23.087 Гкал/ц. Суурилагдсан хүчин чадал 24.8 Гкал/ц. Улмаар чадлын нөөц 7 хувьд хүрээд байна. Эрчим хүч үйлдвэрлэлд ашиглагддаг Баянтээг ордын нүүрсний үзүүлэлтийг 1-р хүснэгтэд харуулав.

БАЯНТЭЭГИЙН НҮҮРСНИЙ ҮЗҮҮЛЭЛТ [1]

1-Р ХҮСНЭГТ

№	Уурхайн нэр: Баянтээг		
	Үзүүлэлт	Нэгж	Утга
1	илчлэг	ккал/кг	3276.6
2	V	%	35.7
3	W	%	12
4	A	%	19
5	S	%	1.1
6	C	%	37.8
7	H	%	3.8
8	O	%	26.2
9	N	%	0.58

III. АСУУДЛЫН ШИНЖИЛГЭЭ

1. Тулгамдсан асуудлууд

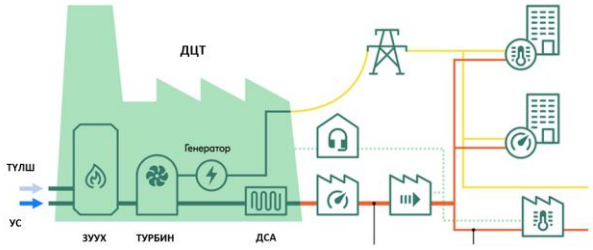
Тулгамдаж буй асуудлуудыг техникийн, эдийн засгийн үр ашгийн, байгаль орчны хэсгүүдэд хуваан авч үзэв. Үүнд:

- Техникийн асуудал: Бага чадлын ус халаах зуухны газруудын үндсэн тоноглолууд насжилт өндөртэй, автоматжуулалт сул, эх үүсгүүрийн нөөцийн дутагдалд орсон, засвар үйлчилгээний зардал өндөр.
- Эдийн засгийн үр ашиггүй байдал: Түлшний зарцуулалт өндөр, нэгж дулааны өөрийн өртөг өссөн, ашиглалтын зардал их.
- Байгаль орчны асуудал: Утааны хийн шүүлтүүрийн систем муу, тоос, хүхэрлэг хий, азотын ислийн ялгаруулалт их, хотын агаарын бохирдол нэмэгдсэн, дулаан хангамжийн өнөөгийн нөхцөл аялал жуулчлалын бүсэд сөрөг нөлөө үзүүлэх эрсдэлтэй.

2. Санал болгож буй шийдэл

Бага ашигт үйлийн коэффициенттой ус халаах зуухны газрууд нь түлшний их зарцуулалттай, дулааны алдагдал өндөр, улмаар нүүрстөрөгчийн давхар ислийн ялгарлыг нэмэгдүүлдэг сул талтай. Ийм нөхцөлд асуудлыг шийдвэрлэх үр дүнтэй арга нь бага чадлын дулаан ба цахилгааныг хослон үйлдвэрлэх төвийг нэвтрүүлэх явдал юм. Дулаан-цахилгаан хосолсон үйлдвэрлэлийн технологи нь нэг эх үүсвэрээс цахилгаан болон дулааныг зэрэг үйлдвэрлэх боломж олгож, түлшний ашиглалтыг мэдэгдэхүйц нэмэгдүүлдэг. Ингэснээр системийн нийт ашигт үйлийн коэффициент өсөж, түлшний зарцуулалт болон хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулна. Мөн төвлөрсөн удирдлагатай, жижиг чадлын ДЦТ-үүд нь хот суурин газрын дулаан хангамжийн найдвартай байдлыг сайжруулж, эрчим хүчний хэрэглээг илүү үр ашигтай, байгаль орчинд ээлтэй хэлбэрээр хангах боломжийг бүрдүүлдэг. ДЦТ-ын ажиллагааны зарчмын схемийг 2 дугаар зурагт үзүүлэв.

Судалгааны тооцооны хэсэгт Цэцэрлэг хотын дулааны эрчим хүчний хэрэглээний өсөлтийн дундаж хувь буюу 15 жилийн өсөлтийг жилд 3% тооцож 35.96Гкал/ц буюу 41.82МВт-ийн хэрэглээнд зориулж дараах шийдлийг дэвшүүлэв. Бага чадлын ДЦТ-ын ерөнхий үзүүлэлтийг 2 дугаар хүснэгтэд үзүүлэв.



2-р зураг. Дулаан ба цахилгааны төв (дулаанжуулалт)

БАГА ЧАДЛЫН ДЦТ-ЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ

№	Үзүүлэлт	Утга
1	Цахилгааны АҮК	35%
2	Дулааны АҮК	55%
3	Дотоод хэрэгцээ, алдагдал	10%
4	Нийт АҮК	100%

2 дугаар хүснэгтэд үзүүлсэн дулаанжуулалтын ерөнхий үзүүлэлтээр 42 МВт дулааны, 25-27 МВт цахилгааны суурилагдсан чадалтай ДЦТ төлөвлөх нь зохистой.

IV. ТООЦООНЫ АРГАЧЛАЛ, ҮР ДҮН

Дулаан хангамжийн системийн хэрэглэгчдийн ачааллыг тодорхойлохдоо барилгын дулааны алдагдал, хэрэглээний горим, гадна агаарын температурын өөрчлөлтийг тооцон дулааны хэрэгцээг тодорхойлдог. Үүн дээр үндэслэн зуух болон дулаан үйлдвэрлэлийн төхөөрөмжийн түлшний зарцуулалтыг илчлэгийн балансын аргаар тооцоолно. Харин түлшний зарцуулалтын хэмжээг түлшний доод илчлэг, тоног төхөөрөмжийн ашигт үйлийн коэффициенттой (АҮК) уялдуулан тодорхойлох нь чухал. Улмаар нүүрстөрөгчийн давхар ислийн ялгарлыг тооцоход түлшний нүүрстөрөгчийн ялгарлын коэффициентыг ашиглан нэгж түлш шатах үед үүсэх хүлэмжийн хийн хэмжээг үнэлдэг. Ийнхүү ачаалал, түлш, ялгарлын тооцоог нэгтгэн системийн үр ашиг, байгаль орчны нөлөөллийг иж бүрэн үнэлэх боломж бүрдэнэ. Дараах тооцооны аргачлалаар тооцоолно [2-4]. Үүнд:

- Дулааны ачаалал ба жилийн хэрэглээг тооцоолох, Гкал/ц

$$Q_{д} = q_{д} \cdot V_{д} \cdot (t_{д} - t_{г.д}) \quad (1)$$

- Хэрэгцээний халуун усны системийн дулааны ачаалал, Гкал/ц

$$Q_{хху}^{7.дунд} = \frac{a \cdot m \cdot c \cdot (t_{хал} - t_{хүй})}{T} \quad (2)$$

- Дулаацуулгын системийн жилийн хэрэглээ

$$Q_{д}^{жил} = Q_{д}^{жил} \cdot n_{д} = \overline{Q_{д}} \cdot Q'_{д} \cdot n_{д} \quad (3)$$

- Дулааны жилийн нийт хэрэглээ, Гкал/ц

$$Q_{нийт}^{жил} = Q_{д}^{жил} + Q_{хху}^{жил} + Q_{а}^{жил} \quad (4)$$

- Түлшний зарцуулалт, тн

$$B_{\text{Т}} = \frac{Q_{\text{нийт}}^{\text{жил}} \cdot 10^3}{Q_{\text{доод}}^{\text{аж}} \cdot n_{\text{зуух}}} \quad (5)$$

- Нүүрсхүчлийн хийн нийт ялгарал, тн

$$E_{co2} = M \cdot Q_{\text{доод}}^{\text{аж}} \cdot EF \cdot ce \cdot \frac{44}{12} \quad (6)$$

Дээрх аргачлалын дагуу тооцоолоход дулаацуулгын жилийн хэрэглээ $Q_{\text{д}}^{\text{жил}}$ = 48151.9Гкал, хэрэгцээний халуун усны дулааны жилийн хэрэглээ $Q_{\text{ХХУ}}^{\text{жил}}$ = 42550.5 Гкал, дулааны жилийн нийт хэрэглээ 90702.15 Гкал гарсан. Одоо ажилладаг бага чадлын ус халаах зуухны АҮК-ийг 0.6, төлөвлөгдөж буй ДЦТ-ийн уурын зуухны АҮК-ийг 0.9 -аар авч бодит болон жишмэл түлшний зарцуулалт, CO_2-ийн ялгарлыг тоолсон үр дүнгүүдийг нэгтгэн хүснэгт 3-т харууллаа.

ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

3-Р ХҮСНЭГТ

№	Зуухны АҮК	Үзүүлэлт	Утга, тн	E_{CO2}
1	0.6	$B_{\text{бодит}}$	46136.3	61339.7
2		$B_{\text{жишмэл}}$	21595.7	28712.2
3	0.9	$B_{\text{бодит}}$	30757.5	40893.1
4		$B_{\text{жишмэл}}$	14397.2	19141.5

Тооцооны үр дүнг харуулсан 3 дугаар хүснэгтээс тоон утгуудыг харьцуулахад АҮК ялгаатай ус халаах болон уурын зуухны бодит түлшний зарцуулалтын зөрүү 15378.8 тн, жишмэл түлшний зарцуулалтын 7198.5 тн гарч 33% -аар буурсан, мөн бодит түлшээр 20446.6 тн нүүрстөрөгчийн хийн ялгарал бага чадлын ДЦТ ажилласнаар буурсан үр дүн харагдаж байна.

ДҮГНЭЛТ

1. Цэцэрлэг хотын дулааны жилийн нийт хэрэглээ 90,702.15 Гкал байна. Үүнээс дулаацуулгын хэрэглээ 48,151.9 Гкал, хэрэгцээний халуун усны хэрэглээ 42,550.5 Гкал эзэлж байна. Одоогийн ашиглагдаж буй бага чадлын ус халаах зуухны АҮК 0.6 байхад төлөвлөж буй ДЦТ-ийн уурын зуухны АҮК 0.9 байхаар тооцсон нь системийн нийт үр ашгийг мэдэгдэхүйц нэмэгдүүлэх боломжтойг харуулж байна. Үүний үр дүнд бодит түлшний зарцуулалт 15,378.8 тн-оор, жишмэл түлшний зарцуулалт 7,198.5 тн-оор буурч, нийт түлшний хэрэглээ ойролцоогоор 33%-иар буурах боломжтой нь тогтоогдлоо.

2. Түлшний хэрэглээ буурснаар нүүрстөрөгчийн агууламж болон хүлэмжийн хийн ялгаралд мэдэгдэхүйц эерэг нөлөө үзүүлэхээр байна. Тооцооллоор бага чадлын ДЦТ ашигласнаар бодит түлшний хэрэглээ буурч, CO_2 ялгарал 20,446.6 тн-оор буурах боломжтой нь эрчим хүчний хэмнэлт болон уур амьсгалын өөрчлөлтийг сааруулах бодлоготой нийцэж байгааг харуулж байна.

3. Төвлөрсөн дулаан-цахилгааны төв-д цахилгаан фильтер, утаа шүүлтүүр, NOx бууруулах технологи зэрэг орчин үеийн цэвэрлэгээний системүүдийг нэвтрүүлэх боломжтой. Олон жижиг зуухыг орлох төвлөрсөн систем нэвтрүүлснээр тоосонцрын (PM) ялгарал 40–60%, хүхрийн давхар ислийн (SO_2) ялгарал 30–50% буурах боломжтой бөгөөд нүүрсхүчлийн хийн ялгарал түлшний хэмнэлттэй шууд хамааралтайгаар 33%-иар буурах тооцоо гарч байна. Иймд төвлөрсөн эх үүсвэр нь агаарын бохирдлыг бууруулах, хот суурин газрын экологийн нөхцөлийг сайжруулахад чухал ач холбогдолтой шийдэл болох нь харагдаж байна.

4. 42 МВт дулааны, 25–27 МВт цахилгааны суурилагдсан чадалтай төвлөрсөн бага чадлын ДЦТ байгуулах нь техник-эдийн засгийн хувьд үндэслэлтэй төдийгүй улсын хөгжлийн бодлоготой нийцэж байна. Тухайлбал, эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэх, төвлөрсөн дулаан хангамжийг хөгжүүлэх зорилт бүхий Төрөөс эрчим хүчний талаар баримтлах бодлого (2015–2030), бүсчилсэн хөгжил болон найдвартай эрчим хүчний хангамжийг дэмжих Алсын хараа–2050, мөн орон нутагт эрчим хүчний эх үүсвэр байгуулах зорилт бүхий Шинэ сэргэлтийн бодлого зэрэг бодлогын баримт бичгүүдийн зорилтуудтай бүрэн уялдаж байна. Иймд өсөн нэмэгдэж буй дулааны ачааллыг хангах, түлшний хэрэглээг бууруулах, агаарын бохирдлыг багасгах, бүс нутгийн тогтвортой хөгжлийг дэмжих стратегийн ач холбогдолтой шийдэл гэж дүгнэж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Н.Оюунцэцэг, Ж.Цэен-Ойдов, Дулааны станцын диплом, курсийн төслийн гарын авлага, Улаанбаатар, 2021.

[2] Б.Намхайням “Дулаан хангамжийн систем” Улаанбаатар хот, 2015 он

[3] О.Пүрэвжал, Дулаан хангамжийн системийн дулааны ба гидравлик горим, Улаанбаатар, 2023.

[4] Б.Намхайням, Н.Цолмон “Эрчим хүчний үр ашиг ногоон технологи” Улаанбаатар хот, 2023 он.

ТЭЛМЭН 110 КВ-ЫН ЦДАШ-ын ГЭМТЛИЙН ЗАЙГ ТАКАГИ АРГА БОЛОН МОНТЕ-КАРЛО СИМУЛЯЦААР ТОДОРХОЙЛОХ

Энх-Амгалангийн ХҮДЭРХУЯГ[1], Өлзийбатын БАЯРМАА[2]

[1.2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим Хүчний Инженерчлэлийн Сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим

Монгол улс, Улаанбаатар

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: hudreee01@gmail.com[1], ubayarmaa@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Эрчим хүчний системийн найдвартай, тогтвортой ажиллагааг хангах үндсэн нөхцөлүүдийн нэг нь цахилгаан дамжуулах агаарын шугамд гарсан гэмтлийн байршлыг богино хугацаанд, өндөр нарийвчлалтайгаар тодорхойлох явдал юм. Энэхүү судалгааны ажлаар цахилгаан дамжуулах агаарын шугамд (ЦДАШ)-д гарах нийт тасралтын дийлэнх хэсгийг эзэлдэг нэг фазын богино залгааны гэмтлийн байршлыг оновчтой тогтоох асуудлыг дэвшүүлж байна. Уламжлалт зайн аргаар гэмтлийн зайг тодорхойлоход салаа шугамын хүчний трансформаторын ачаалалтай үеийн хүчдэл тохируулагчийн өөрчлөлтийг алдаж тооцдоггүй нь гэмтлийн зайг тооцорход алдаа үүсэх шалтгаан болдог. Иймд судалгааны ажлын үндсэн зорилго нь шугамд гарсан гэмтлийн үеийн гүйдэл болон хүчдэлийн бодит өгөгдөлд тулгуурлан, хүчдэл тохируулагчийн нөлөөллийг системтэйгээр тооцож, гэмтлийн байршлыг автоматаар тооцоолж гаргах шинэчилсэн аргачлал боловсруулахад чиглэгдсэн. Судалгааны арга зүйн хувьд хүчдэл тохируулагчийн байрлалын өөрчлөлтийг тооцсон Такаги аргын сайжруулсан математик загварчлалыг ашигласан. Уг арга зүйгээ орчин үеийн программчлалын хэл болох Python дээр хөгжүүлж, өгөгдөл боловсруулах Pandas сан болон цахилгаан системийн горим тооцооны Pandapower санг хослуулан ашиглаж автоматжуулсан нь энэхүү ажлын шинэлэг тал болно. Боловсруулсан алгоритм нь реле хамгаалалтын төхөөрөмжөөс ирэх аваарын үеийн түүхий өгөгдлийг хүлээн авч, шаардлагатай хувьсагчдыг ялган загварчлалд орлуулах замаар гэмтэл гарсан цэг хүртэлх зайг тодорхойлон шийдвэрлэж байна. Алгоритмын ажиллагаа болон найдвартай байдлыг Тэлмэн чиглэлийн цахилгаан дамжуулах агаарын шугамын бодит өгөгдөл дээр симуляц хийж туршин үр дүнг баталгаажуулав. Туршилтын үр дүнгээс үзэхэд өгөгдөлд суурилсан автоматжуулсан алгоритмыг ашигласнаар уламжлалт аргын тооцооллын алдааг бууруулж, гэмтлийн байршил тодорхойлох нийт алдааг ±3%-ийн итгэмжит интервалд бүрэн барьж чадсан нь батлагдлаа. Энэхүү шийдэл нь хүний оролцоотой гар тооцооллын алдааг арилгах, шугамын үзлэг засвар үйлчилгээ хийх хугацааг хэмнэх, диспетчерийн шуурхай ажиллагааг дэмжих зэрэг практик өндөр ач холбогдолтой юм.**

Түлхүүр үг: Цахилгаан дамжуулах агаарын шугам (ЦДАШ), гэмтлийн байршил, РПН-ийн нөлөөлөл, Такаги арга, Монте-Карло симуляц

I. ОРШИЛ

Монгол улсын эрчим хүчний нэгдсэн систем, тэр дундаа Хангайн бүсийн эрчим хүчний системд 110 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугам (ЦДАШ) нь дамжуулах болон түгээх сүлжээний гол цөм болдог. Эдгээр шугамд гарсан гэмтлийг богино хугацаанд, өндөр нарийвчлалтайгаар илрүүлэх нь системийн тогтвортой ажиллагааг хангах, эдийн засгийн алдагдлыг бууруулах асар их ач холбогдолтой.

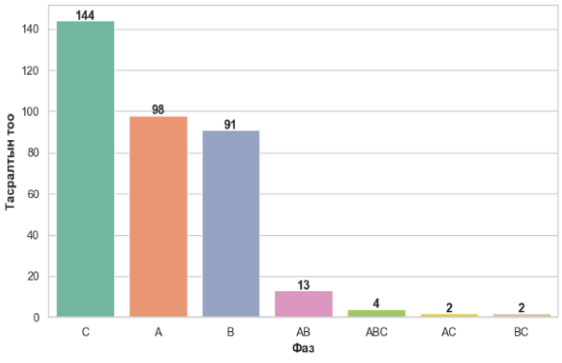
Хангайн бүсийн системийн төлөөлөл болох Тэлмэн чиглэлийн 110 кВ-ын ЦДАШ-д хийсэн олон жилийн статистик судалгаанаас үзэхэд шугамын тасралт доголдол нь тодорхой зүй тогтлуудтай байна.



1-р зураг. Тэлмэн 110 кВ-ын ЦДАШ-ын тасралтын шалтгааны судалгаа

Дээрх графикаас гэмтлийн шалтгааныг авч үзвэл шугамын өөрийн гэмтэл болон байгалийн гаднын хүчин зүйлээс үүдэлтэй тасралтууд давамгайлж байна. Мөн гэмтэл гарсан фазын статистикийг задлан шинжлэхэд нийт тасралтын дийлэнх хувийг нэг фазын богино залгаа эзэлж байгаа нь харагдаж байна.

Хангайн бүсийн тэлмэн ЦДАШ-ын 354 удаагийн тасралтын статистик боловсруулалт.



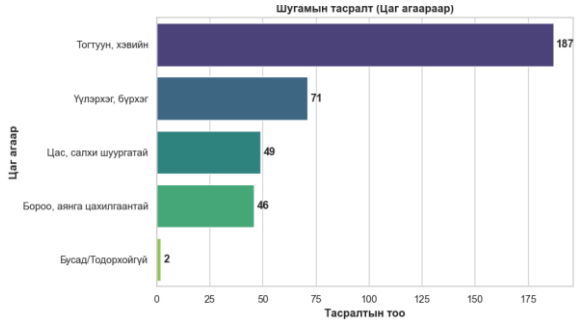
2-р зураг. Тэлмэн 110 кВ-ын ЦДАШ-ын тасралтын судалгаа (фазаар)

Цаг уурын нөхцөл байдлын хамаарлыг судалж үзэхэд нийт тасралтын дийлэнх нь цаг агаар тогтуун үед (шугамын өөрийн элэгдэл, дотоод шалтгаанаар) гарч байгаа хэдий ч, бороо, аянга цахилгаан, цас, салхи шуурга зэрэг байгалийн давагдашгүй хүчин зүйлсээс шалтгаалсан тасралтууд багагүй хувийг

эзэлж байна. Ялангуяа цаг агаарын ийм хүнд нөхцөлд хээр хөдөөгийн шугамын үзлэг, засвар үйлчилгээг цаг алдалгүй шуурхай зохион байгуулахад хүндрэлтэй байдаг тул гэмтлийн цэгийг автоматаар, өндөр нарийвчлалтай тогтоох шаардлага зүй ёсоор үүсэж байна.



3-р зураг. Тэлмэн 110 кВ-ын ЦДАШ-ын тасралтын судалгаа (сараар)



4-р зураг. Тэлмэн 110 кВ-ын ЦДАШ-ын тасралтад цаг агаарын нөлөөлсөн байдал

Эдгээр гэмтлийн үед реле хамгаалалт, автоматик хэрхэн ажилласан байдлыг дараах зурагт үзүүлэв.



5-р зураг. Тэлмэн 110 кВ-ын ЦДАШ-ын реле хамгаалалтын ажилласан байдал

Өнөөгийн байдлаар реле хамгаалалтын практикт гэмтлийн байршлыг тодорхойлохдоо нэг талын хэмжилттэй эсэргүүцлийн аргуудыг, тэр дундаа шилжилтийн эсэргүүцлийн нөлөөг бууруулах зорилгоор Такаги (Takagi) аргыг өргөнөөр ашиглаж байна. Гэвч бодит нөхцөл байдалд шугамын тооцооллын загвар болон хэмжилтийн төхөөрөмжүүдээс шалтгаалсан тодорхойгүй байдлууд үүсдэг. Ялангуяа олон салаа бүхий шугамын хувьд хүчний трансформаторын ачаалалтай үеийн хүчдэл тохируулагч (РПН)-ийн шатлалын өөрчлөлтийг уламжлалт тооцооллын аргачлалууд орхигдуулдаг.

Үүний зэрэгцээ реле хамгаалалтыг тэжээж буй гүйдлийн (ТА) болон хүчдэлийн трансформаторын (ТН) хэмжилтийн хувийн хазайлтыг тооцоололд оруулахгүй орхих нь эцсийн үр дүнд зайн тооцооллыг гажуудуулж, байршлыг буруу тодорхойлох гол шалтгаан болж байна [7]. Дээрх хэмжилтийн болон төхөөрөмжийн алдаанууд нь тогтмол хэмжигдэхүүн биш бөгөөд тодорхой магадлалын тархалттай байдаг тул математик статистикийн аргаар загварчлан авч үзэх шаардлагатай. Сүүлийн жилүүдэд эрчим хүчний салбарт өгөгдлийн шинжилгээ болон автоматжуулалтын алгоритмууд эрчимтэй нэвтэрч байгаа нь дэд станцын аваарын үеийн түүхий өгөгдлийг (raw data) магадлалын онолд тулгуурлан илүү нарийвчлалтай боловсруулах өргөн боломжийг олгож байна.

Иймд энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь 110 кВ-ын ЦДАШ-ын аваарын үеийн өгөгдөлд тулгуурлан, РПН-ийн шатлалын өөрчлөлт болон хэмжилтийн трансформаторуудын алдааны тархалтын магадлалын загварыг боловсруулахад оршино. Уг математик загварыг орчин үеийн Python программчлалын хэл, өгөгдөл боловсруулах Pandas болон системийн горим тооцооны Pandapower сангуудыг хослуулан ашиглаж кодчиллоо. Ингэснээр хэмжилтийн тодорхойгүй байдлуудыг Монте-Карло (Monte Carlo) симуляцын аргаар шийдвэрлэж, гэмтлийн байршлыг автоматаар, итгэмжит өндөр нарийвчлалтайгаар тооцоолж гаргах шинэчилсэн алгоритм хөгжүүлж байгаа нь бидний дэвшүүлж буй үндсэн шийдэл болно.

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Тэлмэн чиглэлийн 110 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугамд гарсан гэмтлийн байршлыг тодорхойлохдоо Такаги (Takagi) аргын математик загварыг хэмжилтийн алдааны тархалтын магадлалын загвартай хослуулан хөгжүүллээ. Тооцооллыг автоматжуулах зорилгоор Python программчлалын хэл дээр Монте-Карло (Monte Carlo) симуляцын алгоритм боловсруулав.

1. Такаги аргын математик загварчлал

Такаги арга нь гэмтлийн үеийн болон аваарын өмнөх үеийн гүйдлийн параметрүүдийг ашиглан шилжилтийн эсэргүүцлийн нөлөөг арилгах замаар гэмтэл хүртэлх зайг тогтоодог. Гэмтэл гарсан цэг хүртэлх зайг (L) дараах тэгшитгэлээр тодорхойлно.

$$L = \frac{Im(V_F \cdot I_{pre}^*)}{Im(Z_L \cdot I_F \cdot I_{pre}^*)} \quad (1)$$

Энд: V_F болон I_F нь гэмтлийн үеийн хүчдэл ба гүйдлийн фазор, I_{pre}^* нь аваарын өмнөх гүйдлийн хосмог фазор, Z нь шугамын нэгжийн эсэргүүцэл юм. Уламжлалт аргаар тооцоход салаа шугамын трансформаторын РПН болон хэмжүүрийн трансформаторуудын алдаа нь хувьсагчдад шууд нөлөөлж зайн тооцооллыг гажуудуулдаг.

2. Хэмжилтийн алдаа болон РПН-ийн магадлалын загвар

Дэд станцын хүчдэлийн (ТН) болон гүйдлийн трансформатор (ТА)-ын хэмжилтийн алдаа, түүнчлэн РПН-ийн шатлалын өөрчлөлтөөс (-10%-иас $+10\%$) үүсэх тодорхойгүй байдлыг тогтмол утгаар авч үзэх боломжгүй юм. Иймд эдгээр алдааг санамсаргүй хэмжигдэхүүн гэж үзэн Хэвийн (Гауссын) тархалтын магадлалын загварт оруулаа [6]. Хэмжилтийн алдааны магадлалын нягтын функцийг дараах байдлаар илэрхийлнэ.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \mathrm{e}^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2)$$

Энд: $f(x)$ нь магадлалын нягтын функц, x нь санамсаргүй хувьсагч буюу хэмжүүрийн трансформатор болон РПН-ийн шатлалаас үүсэх алдааны хэлбэлзэл юм. μ нь математик хүлээлт бөгөөд үүнд Такаги аргаар тооцоолсон зай L-ийг орлуулан авсан. Харин σ нь тухайн хэмжилт болон төхөөрөмжийн нарийвчлалын ангиллаас хамаарсан стандарт хазайлт. Монте-Карло симуляцийн аргаар зайн тооцооллыг гүйцэтгэхдээ хэмжүүрийн трансформаторуудын алдаа болон өгөгдлийн тодорхойгүй байдлыг (2) дугаар тэгшитгэл буюу Хэвийн тархалтын (Normal Distribution) хуулиар загварчлан тооцсон.

Уламжлалт Такаги аргад (Томьёо 1) хэмжүүрийн трансформаторын алдаа болон хүчний трансформаторын РПН-ийн шатлалын өөрчлөлтийг нэгтгэн тусгаж, Монте-Карло симуляцад зориулан дараах өргөтгөсөн математик загварыг боловсруулав:

$$L_M = \frac{I_m[V_F(1 + \Delta U_{\text{РПН}} + \varepsilon_V) \cdot I^*_{pre}]}{I_m[Z_L \cdot I_F(1 + \varepsilon_I) \cdot I^*_{pre}} \quad (3)$$

Энд:

- L_M −Алдааг тооцсон Монте-Карло симуляцийн зайн тооцоолол,
- $\Delta U_{\text{РПН}}$ − Хүчний трансформаторын РПН-ийн шатлалын өөрчлөлтөөс үүсэх хүчдэлийн харьцангуй өөрчлөлт,
- ε_V болон ε_I − Хүчдэлийн (ТН) болон гүйдлийн (ТА) трансформаторын хэмжилтийн санамсаргүй алдаа.

Энэхүү (3) тэгшитгэл дэх ε_V болон ε_I хувьсагчдыг өмнөх (2) дугаар тэгшитгэлд заасан Хэвийн тархалтын магадлалын хуулиар санамсаргүй байдлаар үүсгэж, олон дахин давтан бодолт (iteration) хийснээр гэмтлийн байршлын итгэмжит интервалыг тодорхойлсон болно.

3. Python болон Pandapower ашигласан алгоритмын боловсруулалт

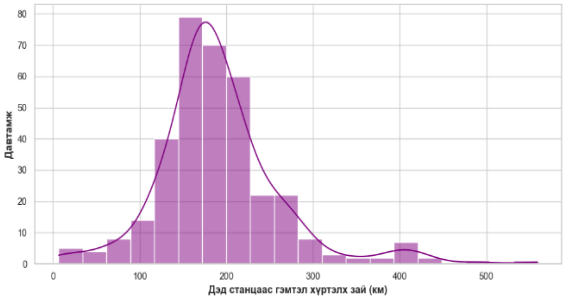
Реле хамгаалалтын төхөөрөмжөөс бүртгэгдсэн аваарын үеийн түүхий өгөгдлийг (raw data) Python хэлний Pandas санг ашиглан хүлээн авч шүүнэ. Цахилгаан системийн горим тооцооны Pandapower санг ашиглан шугамын загварыг үүсгэх ба Томьёо (2)-т заасан хэвийн тархалттай санамсаргүй алдааны утгуудыг numpy.random.normal функцээр үүсгэнэ.

Эдгээр хувьсагчдыг Томьёо (1)-д орлуулах Монте-Карло симуляцын 10,000 болон түүнээс дээш удаагийн давтамжтайгаар ажиллуулна. Энэхүү олон дахин давтагдсан магадлалын тооцооллын үр дүнд шугамын гэмтлийн байршил нь нэг цэгээр бус, харин итгэмжит интервал буюу өндөр магадлал бүхий зайн хязгаараар нарийвчлагдан гарах юм.

III. ТУРШИЛТ, ҮР ДҮНГИЙН ШИНЖИЛГЭЭ

Тэлмэн чиглэлийн 110 кВ-ын ЦДАШ-ын бодит параметрүүдэд үндэслэн цахилгаан системийн горим тооцооны Pandapower санд системийн загварыг үүсгэж, нэг фазын богино залгааны горимын симуляц гүйцэтгэлээ. Туршилтын үндсэн зорилго нь уламжлалт Такаги аргаар тооцсон үр дүнг бидний боловсруулсан магадлалын загварт суурилсан Python алгоритмын үр дүнтэй харьцуулан шинжлэхэд оршино.

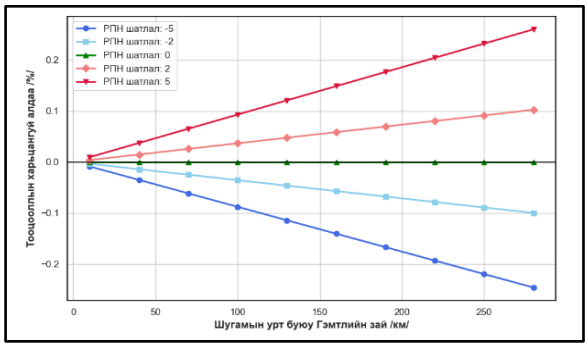
Симуляц хийхийн өмнө Тэлмэн чиглэлийн шугамд гарсан бодит гэмтлүүдийн дэд станцаас алслагдсан зайн тархалтыг боловсруулан гаргасныг Зураг 6-д харуулав. Энэхүү бодит датанд тулгуурлан дараах туршилтуудыг хийж гүйцэтгэсэн.



6-р зураг. Тэлмэн 110 кВ-ын ЦДАШ-д гэмтэл гарсан зайн тархалт (км-ээр)

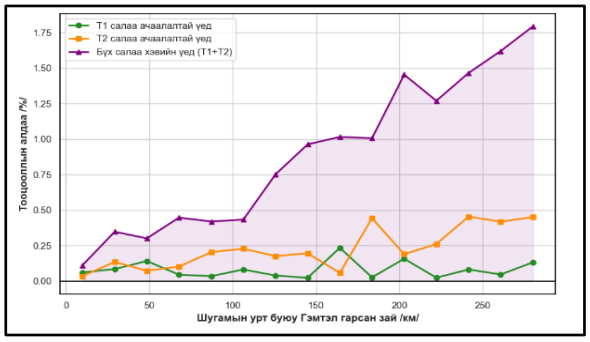
1. РПН-ийн байрлалыг тооцоогүй үеийн алдааны шинжилгээ

Уламжлалт аргаар тооцоолох үед салаа шугамын хүчний трансформаторын РПН-ийн шатлал -10%-иас +10% хүртэл өөрчлөгдөхөд гэмтлийн зайн тооцоололд үүсэх алдааны хамаарлыг Зураг 7-д харуулав. РПН-ийн өөрчлөлт нь шугамын эквивалент эсэргүүцэлд хийсвэр өөрчлөлт оруулдаг бөгөөд гэмтлийн цэг шугамын төгсгөл рүү ойртох тусам зайн тооцооллын алдаа шугаман бусаар огцом өсөж байгаа нь туршилтаар батлагдсан болно.



7-р зураг. Трансформаторын РПН-ийн байрлалыг тооцоогүйгээс үүсэх зайн тооцооллын алдааны муруй

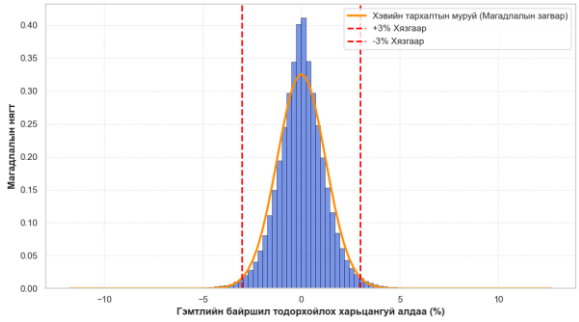
Мөн түүнчлэн, салаагаар гүйх гүйдлийг тооцоогүй үед гарах алдаа нь гэмтлийн байршил тодорхойлох аргын нийт алдаанд хэрхэн нөлөөлж байгаа хамаарлыг 8-р зурагд үзүүлэв.



8-р зураг. Салааны гүйдлийг тооцоогүй үеийн алдаа шугамын уртаас хамаарах байдал

2. Монте-Карло симуляци болон хэмжилтийн алдааны үр дүн

Хэмжилтийн трансформаторуудын (ТА, ТН) нарийвчлалын ангиллаас хамаарсан алдаа болон РПН-ийн байрлалын тодорхойгүй байдлыг хэвийн тархалттайгаар авч, санал болгож буй загвар дээр Python программ ашиглан 3,500,000 удаагийн Монте-Карло симуляц хийж гүйцэтгэв. Симуляцын үр дүнд олон дахин давтагдсан хэмжилтийн тооцооллын алдаа нь Гауссын тархалтад захирагдаж байгааг Зураг 9 харуулж байна.



9-р зураг. Монте-Карло симуляц (Такаги аргын нарийвчлал)

3. Сайжруулсан алгоритмын үр дүн

Боловсруулсан алгоритмын дагуу реле хамгаалалтын төхөөрөмжөөс ирсэн аваарын үеийн өгөгдлийг Pandas сангаар шүүж, магадлалын загвараар тооцоолсны үр дүнд РПН болон хэмжилтийн алдаанаас үүдэлтэй хийсвэр хазайлтыг математик аргаар залруулсан. Туршилтын үр дүнгээс үзэхэд уламжлалт аргаар тооцоход гарч байсан өндөр хэлбэлзэлтэй тооцооллын алдаа нь энэхүү шинэчилсэн аргачлалаар эрс буурч, нийт алдааны хэмжээ ±3%-иас ихгүй түвшинд (итгэмжит интервалын хүрээнд) тогтворжиж байна. Энэ нь гэмтлийн байршлыг өндөр нарийвчлалтайгаар автоматаар тодорхойлох бүрэн боломжтойг нотолж байна.

III. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар 110 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугам (ЦДАШ)-д гарсан нэг фазын богино залгааны гэмтлийн байршлыг тодорхойлох уламжлалт аргын тооцооллын алдааг бууруулах шинэчилсэн аргачлалыг амжилттай боловсруулласан. Судалгааны үр дүнд дараах дүгнэлтүүдийг гаргав. Үүнд:

1. Салаа шугамын хүчний трансформаторын ачаалалтай үеийн хүчдэл тохируулагч (РПН)-ийн шатлалын өөрчлөлт болон хэмжүүрийн трансформаторуудын хувийн алдаа нь гэмтлийн зайн тооцоололд шууд нөлөөлдөг бөгөөд эдгээрийг тогтмол утгаар бус, хэвийн (Гауссын) тархалттай магадлалын загвараар тооцох нь бодит байдалд хамгийн нийцтэй болохыг тогтоолоо [6], [7].
2. Такаги (Takagi) аргын математик загварчлалыг магадлалын онолтой хослуулан, орчин үеийн Python программчлалын хэл (Pandas, Pandapower сангууд) дээр 3.5 сая удаагийн Монте-Карло симуляцын алгоритм бичиж хэрэгжүүлсэн нь өгөгдөлд суурилсан автоматжуулсан төгс шийдэл болж чадсан.
3. Тэлмэн чиглэлийн 110 кВ-ын ЦДАШ-ын аваарын үеийн өгөгдөл дээр хийсэн симуляцын үр дүнгээс үзэхэд, шинэчилсэн алгоритмыг ашигласнаар тооцооллын хийсвэр хазайлтыг математик аргаар залруулж, гэмтлийн байршил тодорхойлох нийт алдааг ±3%-ийн итгэмжит интервалд барих бүрэн боломжтойг баталлаа.

Энэхүү судалгааны үр дүн нь цахилгаан дамжуулах шугамын үзлэг, засвар үйлчилгээний хугацааг ихээхэн хэмнэх, хүний хүчин зүйлээс хамааралтай тооцооллын алдааг бүрэн арилгах болон диспетчерийн шуурхай ажиллагааг дэмжих зэрэг практик өндөр ач холбогдолтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Ө. Баярмаа, Ж. Арслан, "110 кВ-ын цахилгаан дамжуулах агаарын шугамын гэмтлийн байршил тодорхойлох аргачлалын судалгаа", *ШУТИС-ийн Эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэл*, Улаанбаатар хот, 2023 он.

[2] "Цахилгаан байгууламжийн дүрэм (БД 43-101-03)", *Монгол улсын дэд бүтцийн яам*, Улаанбаатар, 2004 он.

[3] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima, "Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892-2898, 1982.

[4] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer et al., "Pandapower - an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6510-6521, 2018.

[5] W. McKinney, "Data structures for statistical computing in python," in *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, pp. 51-56, 2010.

[6] M. Zhang, Y. Li, and H. Chen, "An Improved Takagi Algorithm for Fault Location Considering Load Tap Changer Variations,"

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 135, p. 107534, 2022.

[7] A. Smith, J. Doe, "Probabilistic Fault Location in Transmission Lines Using Monte Carlo Simulation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 4, pp. 2105-2114, 2021.

[8] S. Wang et al., "Impact of Instrument Transformer Errors on Distance Protection and Fault Location Accuracy," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1245, 2023.

[9] K. Meier, L. Thurner, "Automated Short-Circuit Analysis and Protection Coordination in Python Using Pandapower," *Electric Power Systems Research*, vol. 190, p. 106850, 2021.

[10] Ч. Ундрам, Б. Бат-Эрдэнэ, "Цахилгаан дамжуулах шугамын тасралтын шалтгаан, статистик дүн шинжилгээ," *ШУТИС-ийн Эрдэм шинжилгээний бүтээлийн эмхэтгэл*, Улаанбаатар, дугаар 22, хуудас 45-51, 2022 он.

[11] [11] J. Taylor, R. Singh, "Data-Driven Fault Detection and Location in Smart Transmission Grids Using Python Data Structures," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 15420-15431, 2023.

[12] [12] A. Kumar et al., "Recent Advancements in Fault Location Techniques for Overhead Transmission Lines: A Comprehensive Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 113945, 2024

БКЗ-220 ЗУУХНЫ ГАЛЫН ХОТЛЫН АЭРОДИНАМИК ЗАГВАРЧЛАЛЫН СУДАЛГААНЫ ЗАРИМ ҮР ДҮН

Чулуундоржийн САНДУЙБАЗАР[1], Доржийн ДАВААЦЭРЭН[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Дулааны цахилгаан станцын инженерчлэлийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: mglhung66@gmail.com[1], davaatserend@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Энэхүү өгүүлэлд БКЗ-220-100 маркийн зуухны галын хотлын аэродинамикийн загварчлалын судалгааны талаар судалж үзлээ. Галын хотлын аэродинамикийн судалгааны хувьд БКЗ-75-39, БКЗ-420-140 маркийн зуухнуудыг судалж үзсэн байдаг боловч манай улсын хувьд БКЗ-220-100 зуухны галын хотлын аэродинамикийн судалгааг компьютер симуляцын загвар боловсруулах замаар судалж үзээгүй байдаг бөгөөд уг зуухны галын хотлын аэродинамикийн загварчлалыг компьютер симуляцын ANSYS программ ашиглаж гаргаж авсан зарим үр дүнгийн талаар оруулсан болно.**

Түлхүүр үг: **Зуух, уурын зуух, галын хотол, симуляц, аэродинамик.**

I. УДИРТГАЛ

Манай улсын дулааны цахилгаан станцуудын үндсэн тоног төхөөрөмж болох БКЗ-220-100 зуухны насжилт уртсаж байгаатай холбоотойгоор түүний шаталтын процессыг сайжруулах нь стратегийн ач холбогдолтой юм.

Уг зуухыг найдвартай ажиллуулахын тулд тоосон нүүрс, хоёрдогч агаарын замын аэродинамикийн тодорхойломжийг байгуулан 6 асаагууруудад орох зарцуулалт, статик напоруудыг шалгаж, жигд бус байвал шалтгааныг нь тодорхойлж, асаагууруудын өмнөх статик ба хурдны напорыг тэнцвэржүүлэх арга хэмжээ авч хэрэгжүүлнэ [1].

Өнөөдрийн байдлаар станц хэвийн ажиллаж байгаа боловч зуухан цехийн тоноглолын насжилт, уурын үйлдвэрлэл, хэрэглээнээс авч үзвэл нөөц зуухны дутагдалд орж болзошгүй байдал үүсээд байна. Эл хүндрэлээс сэргийлэхийн тулд хамгийн түрүүнд авч хэрэгжүүлбэл зохих арга хэмжээний нэг нь зуухнуудын хэвийн, найдвартай ажиллагааг хангах явдал чухал юм [2].

Судлаачид аэродинамик судалгааны ажлыг гүйцэтгэхдээ математик загварчлалын аргаар үндсэн процессын тооцоог гүйцэтгэсний дараа үндсэн симуляцын загвар дээр судалгааны ажлыг гүйцэтгэн үр дүнг гарган авсан байх ба энэ нь физик загвар дээр туршилт гүйцэтгэх, өөрөөр хэлбэл бодит тоноглол дээр туршилт хийж үндсэн тоноглолыг эрсдэлд оруулахаас сэргийлэх боломж олгодгоороо давуу талтай юм [4-5, 8-12].

Зуухны аэродинамикийн судалгааг орчин үед математик загварчлалын арга, компьютер загварчлалын арга, физик загварчлалын арга гэх үндсэн 3 аргаар хийдэг. Эхний арга нь цэвэр математик тооцооллын үндсэн дээр хийгддэг бол 2 дахь арга нь математик тооцооллыг компьютероор хийлгэж, дүрслэн харуулах болон зарим нэг сайжруулалт хийх боломж олгодгоороо давуу талтай [8-12].

Зуухны галын хотол дахь хийн урсгалын аэродинамик бүтэц нь түлш, агаарын холилт, шаталтын эрчим болон халах гадаргуунуудын дулаан солилцоонд шууд нөлөөлдөг гол хүчин зүйл юм.

Өмнө хийгдэж байсан судалгааны ажлуудад БКЗ-75-39 болон БКЗ-420-140 маркийн зуухнуудын галын хотлын аэродинамик процессыг компьютер загварчлалын аргуудаар судалж байсан тооцооны үр дүнгүүд бий [9-12]. Гэвч БКЗ-220-100 маркийн зуухны галын хотлын аэродинамик бүтцийг орчин үеийн математик загварчлалын (CFD) буюу компьютер симуляцын аргаар нарийвчлан судалсан ажил хараахан хийгдээгүй байна.

II. БКЗ-220-100 МАРКИЙН ЗУУХНЫ ЗАГВАР

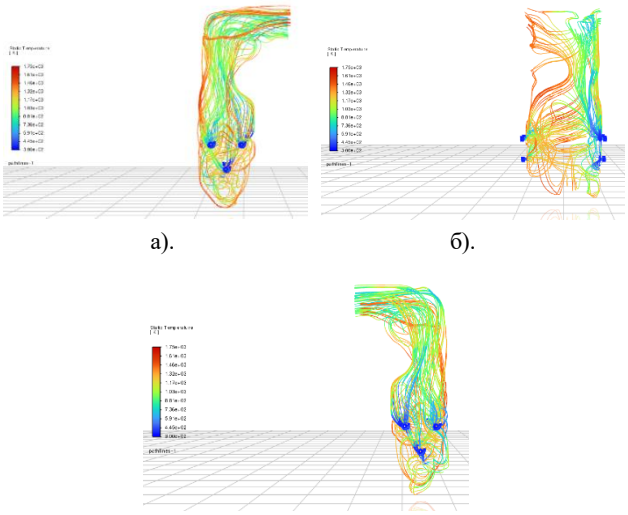
Энэхүү судалгааны ажил нь БКЗ-220-100 маркийн зуухны галын хотлын аэродинамикийн судалгааг компьютер симуляцын аргаар нарийвчлан харуулах, түлшний шаталтын үр ашгийг дээшлүүлэх болон горим ажиллагааг оновчлох онолын болон практик үндэслэлүүдийг таамаглах, загварыг сайжруулах боломжийг эрэлхийлэхэд чиглэн хийгдсэн.

Судалгааны ажлын загварыг компьютер симуляцын Ansys 2025 R2 student version дээр хийсэн ба энэ программын анхны хувилбар Ansys 2.0 нэртэйгээр 1971 онд гарснаас хойш тасралтгүй хөгжсөөр сүүлийн хувилбар нь Ansys 2026 нэртэй болоод байна.

БКЗ-220-100 маягийн зуухны тоос бэлтгэлийн системийн тооцоо болон зуухны дулааны бүрэн тооцоог Баянтээгийн уурхайн нүүрс түлж байх үед хийж гүйцэтгэсэн. Зуухны дулааны тооцоог хийхэд Баянтээгийн нүүрсний дулаан гаргах доод чадвар $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$=3440 ккал/кг, галын хотлын илүүдэл агаарын коэффициент α=1.2, алхан тээрэмтэй шууд үлээлгийн схемтэй тоос бэлтгэлийн системтэй байхаар анхны өгөгдөл авч хийлээ. Тооцооны үр дүнд анхдагч агаарын хурд 22 м/сек, хоёрдогч агаарын хурд 27м/сек, тооцоот түлшний зарцуулалт 11.77 кг/сек байхыг онолын тооцоогоор тодорхойлсон.

БКЗ-220-100 маркийн зуух нь галын хотлын хажуугийн 2 хананд байрласан 6 ширхэг дун хэлбэрийн хуйлруулагч бүхий асаагуураар түлш агаарын холимгийг галын хотолд өгдөг. Компьютер загварчлалын Ansys программд БКЗ-220-100

маркийн зуухны галын хотлын загварыг оруулж тооцооллыг 300 итерацийн хүрээнд тооцон үр дүнг гаргаж авсан ба асаагуур дахь тоосон нүүрс агаарын холимгийн хуйралтын хэлбэр, температурын орны тархалтыг гарган авсан үр дүнг дараах 1-р зурагт үзүүллээ.



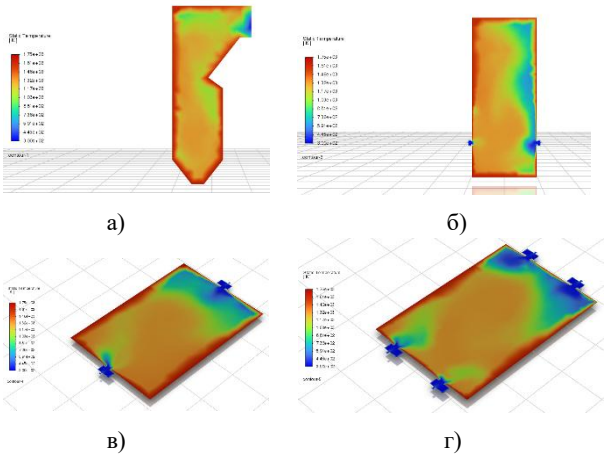
а). б).

в).

1-р зураг. Галын хотол дахь нүүрс аэрохолимгийн тархалт. а - баруун талаас, б - нүүрэн талаас, в - зүүн талаас харагдах байдал.

Асаагуурыудаас гарах урсгалын хуйралт жигд байгаа ч галын хотол дотор тэдгээрийн тархах байдал жигд бус байгаагаас шалтгаалан галын хотлын хажуу ханыудад урсгалын механик хүчдэл ихээхэн үйлчилж байгаа учраас энэ хэсэгт дулааны хүчдэл онцгой нөлөө үзүүлж байгаа нь харагдаж байна.

БКЗ-220-100 маркийн зуухны галын хотол дахь температурын тархалтыг 2-р зурагт үзүүллээ.



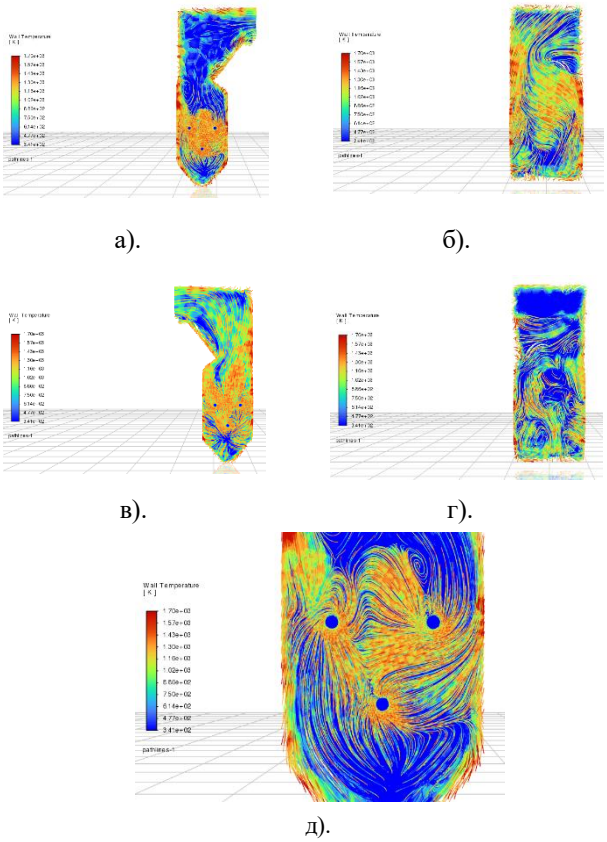
а) б)

в) г)

2-р зураг. Галын хотлын температурын тархалт. а - Галын хотлын баруун талаас дагуу огтлол хийсэн байдал. б - Нүүрэн талаас хөндлөн огтлол хийсэн байдал. в - Доод эгнээний асаагуурын түвшнээр хөндлөн огтлол хийсэн байдал. г - Дээд асаагуурын түвшнээр хөндлөн огтлол хийсэн байдал.

Галын хотлын баруун хананд байрлах асаагууруудын түлшний шаталтаас үүсэх температурын тархалт нь жигд бус, галын хотлын нийт ханын дагуу илүү өндөр температурын бүс үүссэн нь дээрх зурагт харагдаж байна. Галын хотлын төв рүү чиглэсэн шаталт үүсгэж чадахгүй байгаагаас болж хажуу ханууд руу чиглэж байна. Үүнээс үүдэн асаагуурын хажуу ханыг дулааны хүчдэлд оруулах, шлакдуулах нөхцөлийг бий болгодог байна [8]. Галын хотлын зүүн хананд байрлах асаагууруудын хувьд жигд галын хотлын төв рүү чиглэсэн шаталт явагдаж байгаа учраас төв хэсэгт тогтмол температурын бүс бий болгож байна. Харин баруун хананд байрласан асаагууруудын урсгалын хурд бага байгаа мэт харагдаж байна. Үүнээс үүдэн галын хотлын дээд хэсэгт зүүн хана руу шахагдсан урсгалын хуйралт бий болж байна. Энэ тохиолдолд галын хотолд урсгалын тархалт буюу дөлний тархалтыг жигдрүүлэх үүднээс баруун хананд байрлах асаагууруудад өгөх анхдагч болон хоёрдогч агаарын урсгалуудын хурдыг тодорхой хэмжээнд нэмэгдүүлж, галын хотол дахь дөлний тархалтыг жигдрүүлэх арга хэмжээ авах хэрэгтэй юм.

Галын хотлын өндрийн дагуух болон хөндлөн огтлол дахь аэрохолимгийн урсгалын хөдөлгөөнийг 3-р зурагт үзүүллээ.



а). б).

в). г).

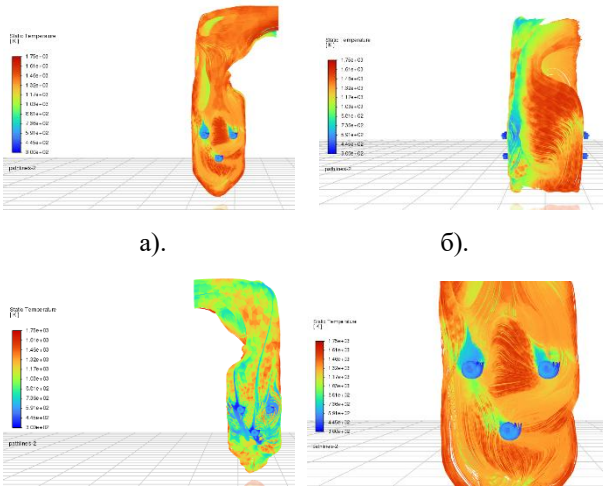
д).

3-р зураг. Аэрохолимгийн галын хотлын хананд үзүүлэх нөлөө ба температурын тархалт. а - баруун талаас, б - нүүрэн талаас, в - зүүн талаас, г - ард талаас, д - асаагуур орчмын харагдах байдал.

Эдгээр зургуудаас харахад асаагуураас гарч буй аэрохолимгийн урсгал нь галын хотлын төв рүү чиглэхээс илүүтэйгээр асаагууруудын орчмын хана болон түүний эргэн тойронд хуйрал үүсгэж, гадаад буцах хүчдэлийн орон хүчтэй үүсдэг учраас асаагууруудын ойр орчмын халах гадаргуу дулааны хэт хүчдэлд ажиллаж, элэгдэлд өртдөг нь эндээс

харагдаж байна. Энэ тухай ч мөн өмнө хийгдсэн судалгааны бүтээлүүдэд дурдсан байдаг [8].

Галын хотол дахь нүүрсний тоосны хөдөлгөөний траекторыг 4-р зурагт үзүүллээ.

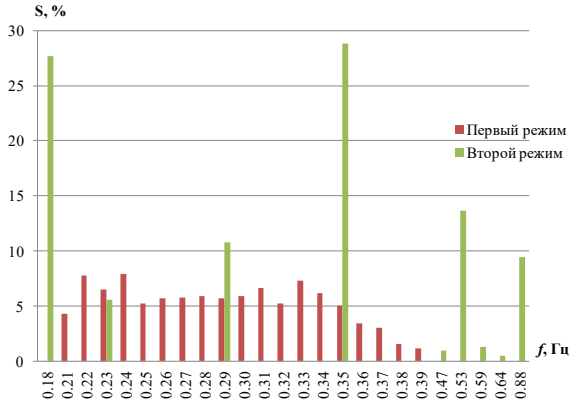


а). б).

в). д).

4-р зураг. Галын хотол дахь нүүрсний тоосны хөдөлгөөний траектор. а - баруун талаас, б - нүүрэн талаас, в-зүүн талаас, д - асаагуур орчмын харагдах байдал.

Дээрх зургуудаас харахад нүүрсний тоосонцрууд галын хотол доторх хийн урсгалын нөлөөгөөр хэрхэн хөдөлж байгаа нь ажиглагдаж байна. Асаагуураас гарч байгаа тоосон нүүрсний тодорхой хэсэг нь дээш чиглэсэн урсгалд авталгүйгээр зуухны доод хэсэгт хатуу хэсгүүдийн хуйлрал үүсгэж, зуухны доод хэсэг рүү унаж шаардагдах эрсдэлийг үүсгэж байна. Эдгээр хэсгүүд шаталтын бүсээс гарч бүрэн шатаж амжилгүй механик дутуу шаталтыг нэмэгдүүлж, зуухны ашигт үйлийн коэффициентыг бууруулах үндсэн нөхцөл болдог. Дутуу шатсан нүүрсний хэсгүүд хүйтэн воронкийн хэсэгт наалдаж шаарга болж хатуурснаар үнс зайлуулах төхөөрөмжийн ажиллагаанд хүндрэл учруулах нөлөөтэй юм. Иймд асаагууруудад өгөх анхдагч болон хоёрдогч агаарын урсгалуудын хурдыг тодорхой хэмжээнд нэмэгдүүлэх замаар дөлний цөмийг хэт доошлохоос сэргийлэх хэрэгтэй. Мөн асаагууруудын налалтын өнцөг болон тэдгээрийн байрлуулсан өндрийн түвшнийг өөчлөх замаар дээр дурдсан хүндрэлүүдээс сэргийлэх боломжтой юм.



5-р зураг. Чөлөөт эжекцийн болон албадмал инженкцийн үед, дөлөн дэх температурын тархалтын давтамжийн ялгаа. улаан – чөлөөт эжекцийн горимд, ногоон – албадмал инжекцийн горимд [13].

Дээрх зургаас харахад, ялангуяа албадмал инжекцийн горимд дөлөн дэх температурын тархалт нь 5…29 Гц давтамжаар тархдаг болох нь харагдаж байна [13].

Харин уг судалгааны ажилд дөлний тархалтын давтамжийг судлаагүй болно. Иймд галын хотол дотор дөлний тархах бүсэд температур хэдэн Гц давтамжтай тархдаг болохыг судалж тогтоох нь зуухны технологийг сайжруулахад ихээхэн түлхэц болох юм. Энэ судалгаа гүйцэтгэж үйлдвэрлэлд нэвтрүүлсэн тохиолдолд металлургийн салбарын бүтээгдэхүүний нэг болох зуухны экран хоолойн үйлдвэрлэл тухайн давтамжид тэсвэрлэх чадвар бүхий хоолойд шилжсэнээр эрчим хүчний зуухнуудын экран хоолойн насжилтын хугацаа багагүй хэмжээгээр өсөх болно. Тоноглолын насжилт нэмэгдэхэд үйлдвэрлэлийн үр ашиг нэмэгдэх нь судлаач танд ойлгомжтой биз ээ.

ДҮГНЭЛТ

БКЗ-220-100 маркийн зуухны галын хотлын аэродинамикийн загварчлалыг компьютер загварчлалын аргаар судалснаар дараах дүгнэлтүүдийг гаргалаа.

1. Галын хотлын аэродинамик загварчлалын дүнд галын хотлын зарим хэсгийн экран хоолой бусад хэсгүүдээсээ илүү өндөр дулааны хүчдэлд ажиллаж байгааг тодорхойллоо. Ингэснээрээ тухайн хэсгүүдийн дулааны ачааллыг бууруулах шаардлагатай болохыг мэдсэний дээр халах гадаргууг эрсдэлээс хамгаалах нөхцөлийг тодорхойлох боломжтой болсон.
2. Симуляцын загварчлалын дүнд шлакдалтыг бууруулах, дутуу шаталтыг багасгах зорилгоор авах арга хэмжээг төлөвлөх боломжийг бий болголоо.
3. Ansys программын тусламжтайгаар галын хотолд, дөлний тархалтын үед, температурын тархалтын давтамжийн талаар судалж экран хоолойн үйлдвэрлэлийг шинэ түвшинд гаргаж чадахуйц судалгааны ажил хийх шаардлагатай байна.

4.Компьютерын симуляцын программ хангамжуудыг ашигласнаар бодит тоноглол дээр туршилт хийж, үндсэн тоноглолыг эрсдэлд оруулахаас бүрэн сэргийлэх боломжийг бүрдүүлж байгаа юм. Энэхүү технологи нь техникийн салбарын мэргэжилтнүүдэд судалгаа, туршилтын зардлыг бууруулах, аюулгүй байдлыг хангах өргөн боломжийг олгож байгаа тул энэ төрлийн программ хангамжийн хэрэглээг нэмэгдүүлэх зайлшгүй шаардлагатай байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Цэен-Ойдов Ж. Зуухны төхөөрөмжийн туршилт, зүгшрүүлэлт. –УБ.: 2015 он. 492 х

[2] Д.Анударь, Д.Даваацэрэн, Ж.Цэен-Ойдов, ЭРДЭНЭТ ДЦС-ЫН БКЗ-75-39 ФБ МАЯГИЙН ЗУУХНЫ ТУРШИЛТ, СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН. “Эрчим хүчний сургууль үүсгэн байгуулагдсаны 60 жил(2020 он)-ийн ойд зориулсан” Бакалавар, Магистр, Доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал, УБ. № 26/254, 2021 оны 3-р сар. 116-120 х.

[3] Д.Ичинноров, Г.Мөнхжаргал, Л.Билгүүнбаяр, Б.Лувсанбалдан, Д.Даваацэрэн, БКЗ-75-39 ФБ МАЯГИЙН ЗУУХНЫ ТУРШИЛТ СУДАЛГААНЫ ЗАРИМ ҮР ДҮН. “Эрчим хүчний сургууль үүсгэн байгуулагдсаны 60 жил(2020 он)-ийн ойд зориулсан” Бакалавар, Магистр, Доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал, УБ. № 26/254, 2021 оны 3-р сар. 212-218 х.

[4] М.Мөнхгэрэл, Д.Батгэрэл, Д.Даваацэрэн, Д.Чимэдсүрэн, УХАА ХУДАГИЙН ЦАХИЛГААН СТАНЦЫН НХ-35/3.82-450 ЗУУХНЫ ЦИКЛОНЫ АЖИЛЛАГААНЫ СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН. “Эрчим хүчний сургууль үүсгэн байгуулагдсаны 60 жил(2020 он)-ийн ойд зориулсан” Бакалавар, Магистр, Доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал, УБ. № 26/254, 2021 оны 3-р сар. 218-221 х.

[5] М.Мөнхгэрэл, Д.Даваацэрэн, Д.Чимэдсүрэн, УХАА ХУДАГИЙН ЦАХИЛГААН СТАНЦЫН НХ-35/3.82-450 ЗУУХНЫ ДУТУУ ШАТАЛТЫН СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН. “Эрчим хүчний сургууль үүсгэн байгуулагдсаны 60 жил(2020 он)-ийн ойд зориулсан” Бакалавар, Магистр, Доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал, УБ. № 26/254, 2021 оны 3-р сар. 442-445 х.

[6] Г.Өсөхбаяр, П.Нанжид, А.Мөнх-Эрдэнэ, Д.Даваацэрэн, БАГАНУУР БОЛОН ШИВЭЭ-ОВООГИЙН НҮҮРС ТҮЛЖ БУЙ БКЗ-75-39 МАЯГИЙН ЗУУХНЫ ДХЦЭХ-НИЙ ХЭРЭГЛЭЭГ ХАРЬЦУУЛСАН МАТЕМАТИК ЗАГВАРЧЛАЛЫН СУДАЛГАА. “Ухаалаг эрчим хүч-оюутаны оролцоо” Бакалавар, Магистр, Доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал, УБ. № 26/253, 2019 оны 3-р сар. 31-34 х.

[7] Х.Бөртжин, Д.Даваацэрэн, ЗУУХНЫ ГАЛЫН ХОТЛЫН СУДАЛГААНД ТӨСӨӨТЭЙН ОНОЛЫГ АШИГЛАХ. “Ухаалаг эрчим хүч-оюутаны оролцоо” Бакалавар, Магистр, Доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал, УБ. № 26/253, 2019 оны 3-р сар. 41-44 х.

[8] Б.Дөлгөөн, Б.Бум-Эрдэнэ, Б.Энх-Оргил, Д.Даваацэрэн, БКЗ-75-39 ФБ ЗУУХНЫ ГАЛЫН ХОТЛЫН СИМУЛЯЦЫН АЭРОДИНАМИК СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН. “Ухаалаг эрчим хүч-оюутаны оролцоо” Бакалавар, Магистр, Доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал, УБ. № 26/253, 2019 оны 3-р сар. 249-252 х.

[9] Г.Даваасүрэн, Ж.Цэен-Ойдов, НХ-35/3.82-450 МАЯГИЙН ЗУУХНЫ АҮК-ийг ДЭЭШЛҮҮЛЭХ СУДАЛГАА. “Эрчим хүч-техник, технологи” Бакалавар, Магистр, Доктор оюутны эрдэм шинжилгээний бага хурал, УБ. № 5/210, 2017 оны 3-р сар. 145-149 х.

[10] Ж.Жулдыз. БКЗ-420-140 зуухны галын хотлын аэродинамикийн судалгаа. Техникийн ухааны магистрын зэрэг горилсон бүтээл. УБ. 2019. 88х.

[11] Б.Энх-Оргил. БКЗ-420-140 зуухны галын хотлын аэродинамикийн судалгаа. Техникийн ухааны магистрын зэрэг горилсон бүтээл. УБ. 2020. 78х.

[12] Б.Бум-Эрдэнэ. БКЗ-75-39 ФБ маягийн зуухны хувьсах горимын ажиллагааны үеийн галын хотлын аэродинамикийн судалгаа. УБ. 2020. 87х.

[13] Д.Даваацэрэн. Газодинамика и теплообмен при соударении закрученных газовых струй. Докторын зэрэг горилсон бүтээл. ОХУ. Екатеринбург хот. УХИС. 2015 он. 170 х.

ХӨДӨЛГҮҮРИЙН ХУРДНЫ ТОХИРУУЛГЫН ПИД БА ФАЗЗИ ЛОГИК КОНТРОЛЛЕРУУДЫН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

Баярсайханы НЭРГҮЙ[1], **Лхагвасүрэнгийн АТАРЦЭЦЭГ**[2]
[1,2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: bayraabambuu@gmail.com[1], l.atartsetseg@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Энэхүү өгүүлэлд Англий TecQuipment брэндийн CE110 серво хөдөлгүүрийн хурдны тохируулгын системийг уламжлалт ПИД (PID) болон Фаззи логик контроллер (FLC) ашиглан MATLAB/Simulink орчинд загварчлан, үр дүнг харьцуулсан болно.. Судалгааны гол зорилго нь хөдөлгүүрийн динамик хариу үйлдлийг сайжруулах, тохируулгын системийн тогтворжилтын хугацааг багасгах, хэт тохируулгыг оновчтой хэмжээнд барих замаар тохируулгын чанарыг дээшлүүлэхэд оршино. Туршилт болон симуляцын үр дүнгээс үзэхэд Фаззи логик контроллер нь ПИД контроллертой харьцуулахад тогтворжилтын хугацааг 33.3%-иар (5.0 сек) бууруулж, систем дэх хоцрогдол болон хэт тохируулгыг үр дүнтэйгээр арилгаж байгаа нь тогтоогдож байна. Судалгааны үр дүн нь Фаззи логик контроллер нь шугаман бус шинж чанартай үйлдвэрлэлийн серво системүүдийн хурдны тохируулгад илүү өндөр нарийвчлалтай, идэвхтэй ажиллагааг үзүүлэх боломжтойг баталж байна.**

Түлхүүр үг: CE110, Fuzzy logic controller, ПИД контроллер, матлаб симулинк

I. УДИРТГАЛ

Орчин үеийн технологийн процессын автоматжуулалт нь үйлдвэрлэлийн технологийн процессыг үнэн зөв хянах, хэмжих, орчин үеийн автоматикийн техник хэрэгслийг нэвтрүүлэх, автоматжуулсан удирдлагын системийг байгуулахад чиглэж байна [1]. Автомат тохируулгын системийн оновчтой удирдлага нь үйлдвэрлэлийн процессын аюулгүй ажиллагаа, найдвартай байдал, үр ашиг зэрэг олон хүчин зүйлд шууд нөлөөлдөг. Уламжлалт ПИД контроллер нь динамик системийг тохируулахад өргөн хэрэглэгддэг бөгөөд хэрэглэхэд хялбар, найдвартай давуу талтай. Гэхдээ зарим нарийн динамик системд хариу үйлдэл удаан, хурдны алдаа үүсдэг тул илүү уян хатан удирдлагын аргууд шаардлагатай болдог. Иймд Fuzzy logic controller (FLC)-ийг ашигласнаар системийн урьдчилан таамаглах боломжгүй нөхцөлийг илүү оновчтой удирдах боломжтой бөгөөд хурдны хариу үйлдлийг сайжруулж, системийн тогтвортой байдлыг нэмэгдүүлдэг.

II. ОБЪЕКТ

CE110 хөдөлгүүрийн хурд тохируулах систем

CE110 нь хөдөлгүүрийн хурдыг тохируулах, хөдөлгүүрийн ажиллагааг П, ПИ, ПИД тохируулгын хуулиар удирдах, хянах зориулалттай туршилтын төхөөрөмж юм [2]. CE120 аналог дижитал контроллер, CE2000 программ хангамжтай хослон ажилладаг. Хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектыг 1-р зурагт үзүүлэв.



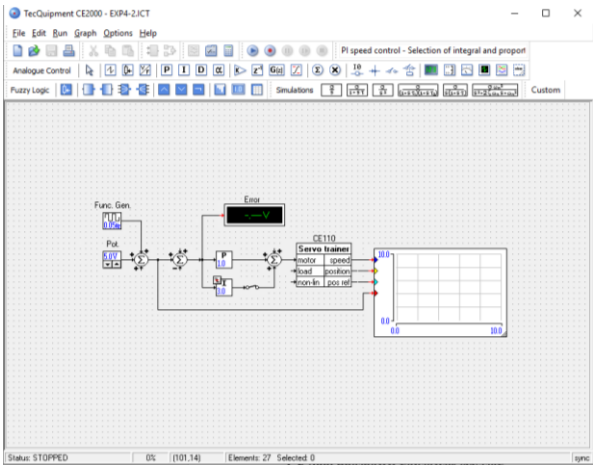
1-р зураг. CE110 хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объект

Хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектод хөдөлгүүрийн хурд хэмжих тахометр, янз бүрийн ачаалал өгөх зориулалттай цахилгаан генератор, цахилгаан хөдөлгүүр, өнцгийн байршил заагч зэрэг багтсан байдаг. CE120 аналог дижитал контроллерыг 2-р зурагт үзүүлэв.



2-р зураг. CE120 контроллер

Аналог ба дижитал хянах төхөөрөмж нь үйлдлийн генератор, дижитал вольтметр, тэжээлийн блок, потенциометр, нийлбэрлэх төхөөрөмж, П, ПИ болон ПИД блок, оролт гаралтын модуль зэргээс бүрдэнэ. Тохируулгыг удирдах CE2000 программ хангамжийн дэлгэцэд харагдах байдлыг 3-р зурагт үзүүлэв.

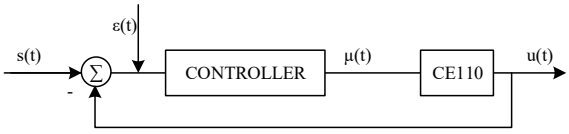


3-р зураг. CE2000 программ хангамжаар автомат удирдлагын схем байгуулсан байдал

CE2000 программ хангамжаар нэг болон олон хүрээт автомат удирдлагын бүтцийн схемийг энгийн программын орчинд хийж болдог.

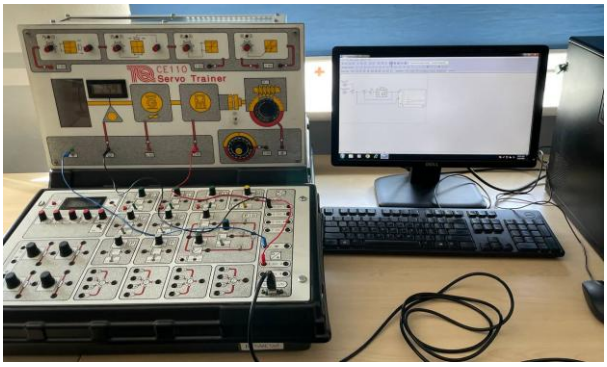
III. ТУРШИЛТ

Туршилтын ажлын зорилго нь Хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектын шилжилтийн тодорхойломжийг туршилтаар гарган авч математик загвар болох дамжуулалтын функцийг тодорхойлоход оршино. Мөн ПИД контроллерын хөглөлтийн параметрийн оновчтой утгыг тодорхойлно. Хөдөлгүүрийн хурдыг тохируулах автомат тохируулгын битүү системийн бүтцийн схемийг 4-р зурагт үзүүлэв.



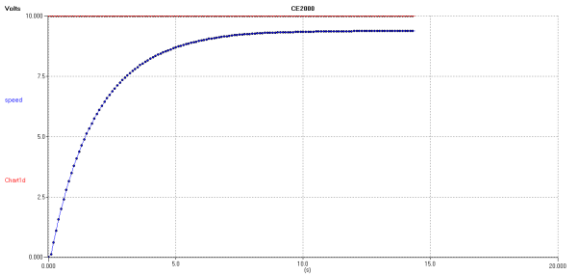
4-р зураг. Хөдөлгүүрийн хурдыг тохируулах автомат тохируулгын битүү системийн бүтцийн схем

Дээрх бүтцийн схемийн дагуу хөдөлгүүрийн хурд тохируулах туршилтын схем холбосон байдлыг 5-р зурагт үзүүлэв.



5-р зураг. Объект болон контроллерыг холбосон байдал

Холболтын дагуу туршилтыг хийж нэгж шаталсан үйлчлэл өгөх үеийн хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектын шилжилтийн тодорхойломжийг гарган авна. Автомат тохируулгын систем (АТС)-ийн шилжилтийн тодорхойломжийг 6-р зурагт үзүүлэв.



6-р зураг. АТС-ын шилжилтийн тодорхойломж

Объектын шилжилтийн тодорхойломжийг уламжлалт арга буюу аппроксимаци хийж тогтворжилтийн утга болон тооцоонд шаардлагатай хэмжигдэхүүнүүдийг олно. Шилжилтийн тодорхойломжоос тооцоонд шаардлагатай утгуудыг гарган авбал:

T_0=1.714 $К_\mu$=0.938 $t_п$=0.357 $h(t_п)$=0.154

Эндээс:

$$в = \frac{h(t_п)}{Кμ} = \frac{0.154}{0.938} = 0{,}164$$

n=1 болж номограм ашиглан дараах утгуудыг олсон.

$$\frac{T_{a_1}}{T_0} = 0.7125 \quad \frac{t_{па}}{T_{a_1}} = 0.258 \quad \frac{T_{a_2}}{T_{a_1}} = 0.15$$

T_0=1.714с учир $T_{a_1} = 1.22$ $T_{a_2} = 0.183$

$t_{па} = 0.315$ $\tau_a = 0.042$гарч байна.

Дамжуулалтын функц нь:

$$W_{об}(p) = \frac{Кμ \cdot e^{-pτ}}{(T_1 p+1)(T_2 p+1)^n} = \frac{0.938 \cdot e^{-0{,}042p}}{(1.22p+1)(0.183p+1)^1} \quad (1)$$

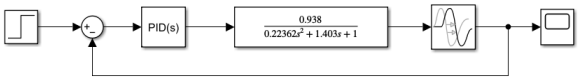
Энэ дамжуулалтын функцийг ашиглаад объектын комплекс давтамж болон фаз давтамжийн тодорхойломжийг гарган авна. Ингэснээр оновчтой нөөцийн мужийн графикийг байгуулан ПИД контроллерын хөглөлтийн параметрийн пропорционалийн коэффициент K_p, интегралчлалын хугацааны тогтмол $T_и$ ба дифференциалчлалын хугацааны тогтмол $T_д$ -ийн оновчтой утгыг тооцооноос $K_p^{онов} = 1{,}84$; $T_u^{онов} = 2{,}16с$; $T_д^{онов} = 0{,}21\ с$ гэж тодорхойлов.

IV. МАТЛАБ ПРОГРАММ ХАНГАМЖ АШИГЛАН ХАРЬЦУУЛАЛТ

1. ПИД контроллер

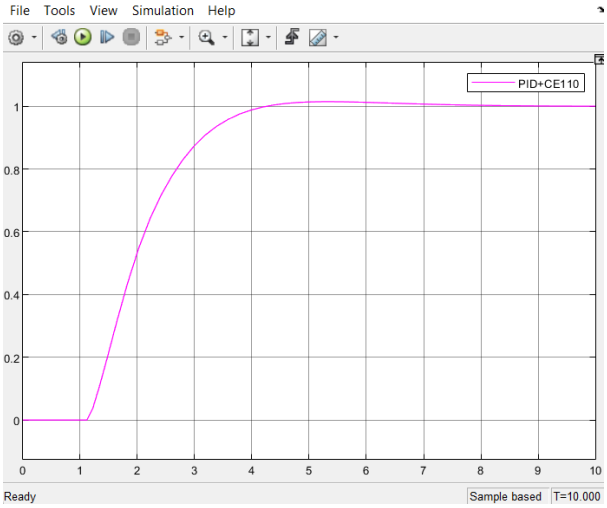
Sperry ба Minorsky нар анхны завины автомат удирдлагын (steering autopilot) системийг хөгжүүлсэн бөгөөд тэдний шинэ санаачилга, шинжлэх ухааны бүтээлүүд нь завины автомат хяналтын зориулалттай гуравтын буюу пропорциональ-интеграл-дериватив (PID) контроллер-ын үүсэлд гол үүрэг гүйцэтгэсэн [3],[5]. ПИД контроллер нь хамгийн энгийн тохируулгын систем бөгөөд түгээмэл ашиглагддаг. П контроллер нь өгсөлтийн хугацааг бууруулах боловч хэзээ ч системийн алдааг арилгаж чаддаггүй. И контроллер нь системийн алдааг арилгаж болох боловч энэ нь түр зуурын арга хэмжээ юм. Д контроллер нь системийн тогтворжилт, найдвартай ажиллагааг дээшлүүлдэг мөн хэт тохируулгыг багасгадаг сайн талтай.

Матлаб программ хангамжийн симулинк хэрэгсэлийг хэрэглэн 4-р зургийн дагуу бүтцийн схем холбоно. Матлаб симулинк дээр ПИД контроллерыг ашиглан хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектыг байгуулсан загварыг 7-р зурагт үзүүлэв.



7-р зураг. Хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектыг байгуулсан загвар

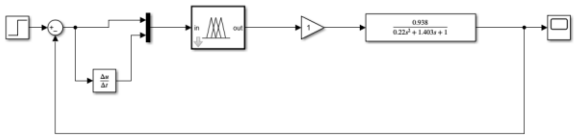
ПИД контроллерын хөглөлтийн параметрийн оновчтой утгаар хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектын шилжилтийн тодорхойломжийг 8-р зурагт үзүүлэв.



8-р зураг. ПИД контроллертой хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектын шилжилтийн тодорхойломж

2. Фаззи логик контроллер

Фаззи логик контроллерын суурийг анх Lotfi Zadeh 1965 онд тавьсан [6]. FLC нь уламжлалт тоон удирдлагаас ялгаатай, логик дүрэмд суурилсан хяналтын систем. FLC-д оролт, гаралт нь fuzzy set-ээр илэрхийлэгддэг бөгөөд дүрмүүдийн сан (rule base) нь нөхцөл ба шийдвэрийг логик холбоосоор тодорхойлдог; inference system нь дүрмүүдийг боловсруулж, defuzzification процессоор бодит тоон утгад хөрвүүлдэг. Ингэснээр FLC нь системийн хурдан хариу үйлдэл, тогтвортой байдал, хурдны алдааг багасгах боломжийг олгодог. Нэг үгээр хэлбэл илүү уян хатан удирддаг. Матлаб программ хангамжийн симулинк хэрэгсэлийг хэрэглэн 4-р зургийн дагуу бүтцийн схем холбоно. Матлаб симулинк дээр FLC ашиглан хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектыг байгуулсан загварыг 9-р зурагт үзүүлэв.



9-р зураг. Хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектыг байгуулсан загвар

FLC-ийн Membership Functions буюу оролт болон гаралтын утгуудыг [-1, 1] хооронд нормальчилсан гэж үзвэл дараах 5 төрлөөр ашиглаж болно:

NB: Negative Big (Сөрөг их)

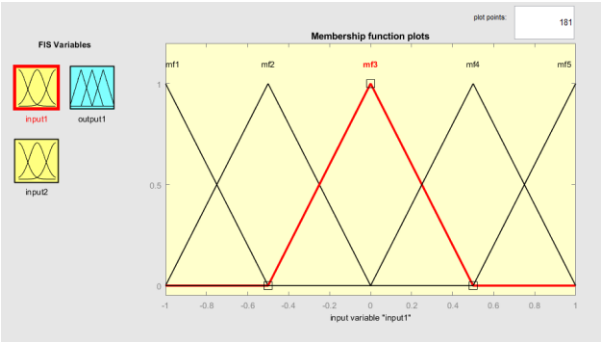
NS: Negative Small (Сөрөг бага)

ZE: Zero (Тэг)

PS: Positive Small (Эерэг бага)

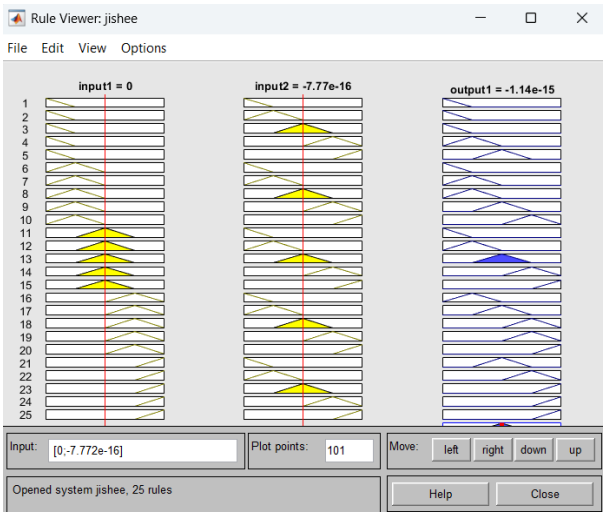
PB: Positive Big (Эерэг их)

FLC-ийн оролт, гаралтын тохируулгыг 10-р зурагт үзүүлэв.



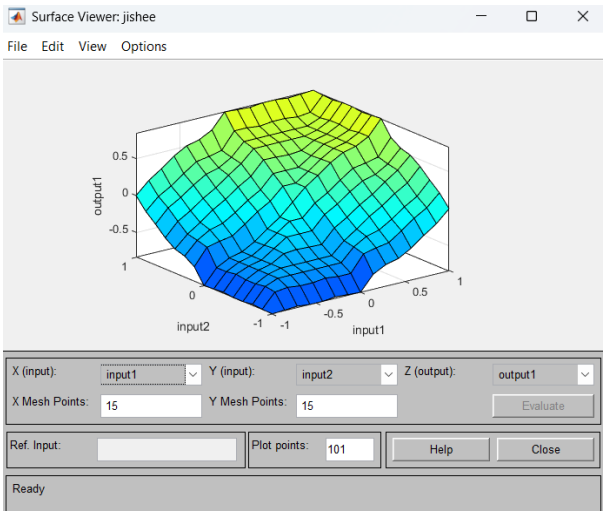
10-р зураг. FLC-ийн тохируулга

Fuzzy rule viewer буюу дүрэм нь системийн оролтууд болох алдаа-input1, алдааны өөрчлөлт-input2 хоёулаа тэг (ZE) утгатай байх үед гаралтын дохио-output1 тэг буюу тогтвортой утга дээр байна. FLC-ийн дүрмийг 11-р зурагт үзүүлэв.



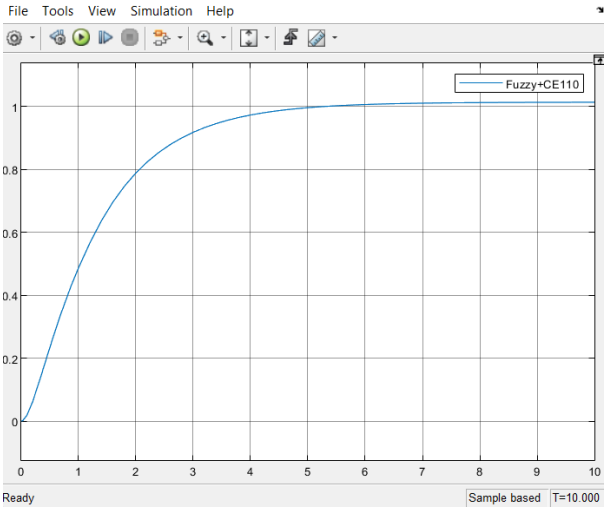
11-р зураг. FLC-ийн дүрэм

Дээрх оролт, гаралтын тохируулга болон дүрмийн дагуу FLC-ийн тохируулгын surface viewer ашигласан гаралтын утгыг 12-р зурагт үзүүлэв.



12-р зураг. FLC-ийн гаралтын утга

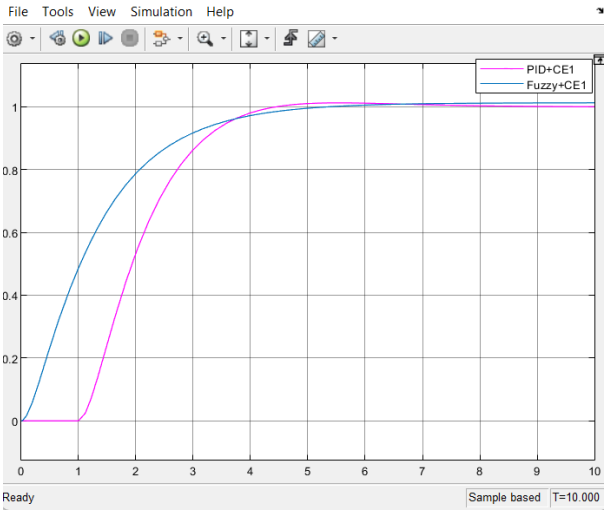
FLC ашигласан хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектын шилжилтийн тодорхойломжийг 13-р зурагт үзүүлэв.



13-р зураг. Fuzzy logic контроллертой хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектын шилжилтийн тодорхойломж

3. ПИД болон Fuzzy контроллерын харьцуулалт

ПИД контроллер нь энгийн, найдвартай бөгөөд олон төрлийн үйлдвэрлэлийн системд батлагдсан боловч системийн нарийн динамик шинж чанарт тохируулахад зарим хязгаарлалттай байдаг. Матлаб симулинк дээр Fuzzy logic контроллер болон ПИД контроллер ашиглан хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектын шилжилтийн тодорхойломжийг 14-р зурагт үзүүлэв.



14-р зураг. Хөдөлгүүрийн хурд тохируулах объектын шилжилтийн тодорхойломж

Харьцуулсан графикийн үр дүнг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв.

ХАРЬЦУУЛСАН ҮР ДҮН

1-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	ПИД	FLC
Тогтворжилтын хугацаа, с	7,5	5,0
Хэт тохируулга, %	1,5	0
Тогтворжсон алдаа, с	0	0

ДҮГНЭЛТ

Хөдөлгүүрийн хурдны тохируулгад ПИД ба Fuzzy logic контроллерын харьцуулсан судалгааг CE110 лабораторийн стенд дээр туршиж гүйцэтгэлээ. Туршилтаар объектын дамжуулалтын функцийг тодорхойлон Матлаб программ хангамжийн симулинк хэрэгслийг ашиглаж харьцуулсан болно.

1. *Динамик шинж чанарын үзүүлэлт*

FLC нь системийн хариу үйлдэл эхний агшинд маш идэвхтэй байж, өсөлтийн хугацаа (Rise time) хамгийн бага утгыг үзүүлж байна. Тогтворжилтын хугацаа (Settling time) нь 5 секунд байгаа нь системийн динамик ажиллагаа маш өндөр байгааг илтгэж байна. Мөн туршилтын графикаас харахад FLC нь хэт тохируулга (Overshoot) байхгүй буюу апериодик хэлбэрээр ажиллаж байна.

ПИД контроллер нь системд мэдэгдэхүйц хоцролт (Dead time) үүсгэж байгаа бөгөөд тогтворжилтын хугацаа нь 7.5 секунд байна. Энэ нь FLC-той харьцуулахад тогтворжилт 33%-иар удаан байгааг харуулж байна.

2. *Тохируулгын чанар ба тогтворжилт*

ПИД контроллер нь тодорхой хэмжээний хэт өсөлт (overshoot) үүсгэж байгаа нь системийн инерц болон шугаман бус шинж чанарыг нөхөх чадвар сул байгааг харуулж байна. Харин fuzzy logic контроллер нь алдаа болон алдааны өөрчлөлтийг тооцоолдог тул CE110 стендийн шугаман бус нөлөөллийг илүү оновчтой засаж, хурдны өөрчлөлтөд уян хатан хариу үйлдэл үзүүлж байна.

3. *Ерөнхий дүгнэлт*

Туршилтын үр дүнгээс үзэхэд, fuzzy logic контроллер нь хөдөлгүүрийн хурдны удирдлагад ПИД контроллероос илүү хурдан хариу үйлдэлтэй, хэт тохируулга багатай, тогтворжилт сайтай болох нь батлагдлаа. Иймд нарийвчлал болон хурд хүчний өндөр шаардлага бүхий хөдөлгүүрийн тохируулгад fuzzy logic контроллерыг ашиглах нь илүү үр дүнтэй байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Ц.Эрдэнэцэцэг, Д.Үлэмж, “Автомат удирдлагын онол”, Улаанбаатар, 2023 он.

[2] Ц.Эрдэнэцэцэг, Д.Үлэмж, “Автомат удирдлагын систем, автоматжуллалт” лабораторын ажлын гарын авлага , Улаанбаатар, 2019 он.

[3] Geoff N Roberts “Trends in marine control systems” IFAC Proceedings Volumes Volume 40, Issue 17, 2007, Pages 315-322

[4] Д.Түвшинбаатар, Д.Даваадорж, Д.Үлэмж “Олон хүрээт автомат тохируулгын системийн тооцоо”, Улаанбаатар, 2009 он

[5] Minorsky N. (1922). "Directional stability..." Journal of the American Society of Naval Engineers, 34(2), 280–309.

[6] Zadeh L.A. (1965). "Fuzzy sets." Information and Control, 8(3), 338–353.

[7] R. Arulmozhiyal, R. Kandiban “Design of Fuzzy PID controller for Brushless DC motor” 2012 International Conference on Computer Communication and Informatics, DOI - 10.1109/ICCCI.2012.6158919

МОНГОЛ ОРНЫ БАГА ХУРДНЫ САЛХИНЫ НӨХЦӨЛД VORTEX BLADELESS САЛХИН ТУРБИН АШИГЛАХ БОЛОМЖ

Галтын МӨНХТҮШИГ[1], Болорсүхын САЙХАНБИЛЭГ[2], Батбилэгийн АЗЖАГАЛ[3], Оттонбаярын БАТТҮВШИН[4], Эрдэнэбатын МӨНХТУЯА[5]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Шинэ Сэргээгдэх эрчим хүчний тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: e.munkhtuya@must.edu.mn[5]

Хураангуй: **Сүүлийн жилүүдэд дэлхий дахинд сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээ тогтвортой нэмэгдэж, салхины эрчим хүчний технологи хурдтай хөгжиж байна. Уламжлалт далбаат салхин турбин нь өндөр суурилуулалтын зардал, механик элэгдэл, дуу чимээ, байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөө зэрэг асуудалтай байдаг. Үүний улмаас хот суурин газар болон бага салхины бүсэд үр ашигтай ажиллуулахад хүндрэлтэй. Vortex Bladeless салхин турбин (VBWT) нь эргэлдэгч далбаа ашиглахгүйгээр салхины урсгалын чичиргээ (Vortex Induced Vibration, VIV)-ийг ашиглан цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэдэг шинэ технологи юм. Турбины хэлбэлзлийн давтамж салхины үүсгэх VIV давтамжтай ойролцоо эсвэл тэнцүү үед резонанс үүсэж, хэлбэлзлийн механик энерги шугаман генератораар цахилгаан энерги болгон хувирдаг. Энэхүү технологи нь дуу чимээ багатай, аюулгүй ажиллагаатай, хотын барилга байгууламжийн дээвэр дээр суурилуулахад тохиромжтой давуу талтай. Судалгаанд ШУТИС-ийн Т байрны дээвэр дээр суурилуулсан цаг уурын станцын 2025–2026 оны 1 жилийн салхины өгөгдлийг ашигласан. Дундаж салхины хурд 1.33 м/с, зонхилох чиглэл нь хойд-зүүн (NE) зүг байгааг тогтоосон. Үндсэн үр дүнд тухайн байршилд өндөр хүчин чадлын турбин суурилуулах боломжгүй ч, сургалт, туршилт, судалгааны зориулалтаар жижиг хүчин чадлын VBWT ашиглах боломжтойг харуулсан. Энэхүү судалгаа нь хот суурин газрын бага салхины нөхцөлд Vortex турбиныг ашиглах боломжийг судалсан.**

Түлхүүр үг: Vortex Induced vibration, электромагнет генератор, далбаагүй салхин турбин, Улаанбаатар хотын салхины урсгал, сэргээгдэх эрчим хүч

I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд дэлхий дахинд сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээ тогтвортой нэмэгдэж, салхины эрчим хүчний технологиуд хурдтай хөгжиж байна. Салхины эрчим хүч нь нүүрстөрөгчийн ялгаруулалт багатай, уур амьсгалын өөрчлөлтөд ээлтэй, олон төрлийн цаг уурын нөхцөлд ашиглах боломжтой сэргээгдэх эрчим хүчний гол эх үүсвэрүүдийн нэг юм.

Гэсэн хэдий ч уламжлалт далбаат салхин турбинууд нь суурилуулалтын зардал өндөртэй, хөдөлгөөнтэй механик эд ангиудаас шалтгаалан элэгдэлтэй, дуу чимээ их гаргадаг, мөн шувуу болон байгаль орчинд сөрөг нөлөө үзүүлэх зэрэг асуудлуудтай тулгардаг. Энэ нь хотын орчин болон бага салхины дундаж хурдтай бүсүүдэд энэхүү салхин турбиныг ашиглахад үр ашиг муутай байдаг.

Vortex Bladeless салхин турбин (VBWT) нь эргэлдэгч далбааг ашиглахгүйгээр салхины энергиэс цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх шинэ технологи юм.Энэхүү судалгааны зорилго нь Монгол орны салхины нөхцөлд, тухайлбал академийн барилгын дээвэр дээр Vortex төрлийн далбаагүй салхин турбин ашиглах боломжийг үнэлж, салхины өгөгдлөөр турбины ажиллагааны тохиромжтой нөхцөлийг тодорхойлж, дизайн болон суурилуулалтын зөвлөмжийг илрүүлэх явдал юм. Технологийн энэхүү шийдэл нь байгаль орчинд ээлтэй байх зарчмыг дээд зэргээр хангаад зогсохгүй, сэргээгдэх эрчим хүчний хүртээмжийг нэмэгдүүлэх замаар Монгол улсын эрчим хүчний салбарын тогтвортой хөгжилд үнэтэй хувь нэмэр оруулах боломжтойг энэхүү өгүүллээр нотлохыг зорив.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТЫН ТУХАЙ



1-р зураг. СЭХ-ний судалгааны лабораторийн харагдах байдал

Энэхүү судалгааны объект нь ШУТИС-ийн Т байрны дээвэр дээр суурилуулсан цаг уурын станцын мэдээллийг ашиглан боловсруулалт хийсэн. Салхины нөөцийн 3 жилийн өгөгдлийг боловсруулж, Монгол орны нөхцөлд Vortex Bladeless салхин турбин (VBWT) суурилуулан ашиглах боломжийн судалгааг хийх юм.

Судалгаанд ашигласан тоног төхөөрөмжүүд:

- Турбины загвар: Rexco 5-BLADE Vertical Axis Wind Turbine 1кВт
- Цаг уурын станцын загвар: Weather station GW1101

Судалгаанд дараах үзүүлэлтүүдийг авч үзсэн:

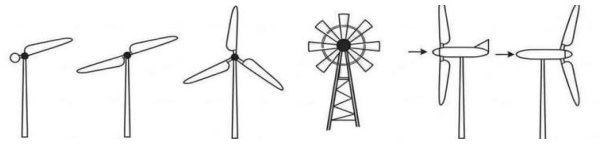
- Турбины төрөл: Далбаагүй (Vortex Bladeless) салхин турбин
- Генераторын төрөл: Шугаман (Linear) электромагнит генератор
- Өндөр: 10 м
- 1 ширхэг турбины хүчин чадал: 1кВт
- Турбин ажиллаж эхлэх салхины хурд: 1.2-1.5 м/с
- Нэрлэсэн чадлаа гаргах салхины хурд: 3-5 м/с
- Турбины ажиллагаа зогсох салхины хурд: 25 м/с

Судалгаанд 2025–2026 он хүртэлх 1 жилийн салхины өгөгдлийг ашигласан бөгөөд өгөгдөлд дундаж хурд, хамгийн их хурд, стандарт хазайлт болон зонхилох салхины чиглэл багтсан.

Турбины сонголт нь Монгол орны бага хурдны салхины нөхцөлд үр ашигтай ажиллах боломжийг харгалзан хийсэн бөгөөд бага хэмжээтэй, дуу чимээ багатай, хот болон алслагдсан бүсэд суурилуулахад тохиромжтой. Судалгааны объект нь турбины эрчим хүчний үйлдвэрлэл, салхины нөхцөлтэй уялдах байдлыг үнэлэх үндсэн зорилготой юм.

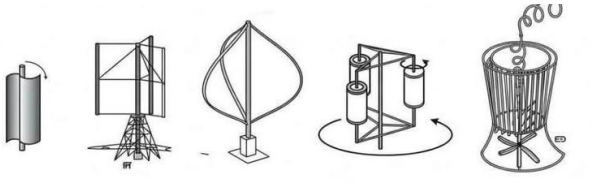
III. САЛХИН ТУРБИНЫ ТӨРӨЛ

Салхин турбин нь салхины кинетик энергийг механик эргэлтийн энерги болгон хувиргаж, улмаар генераторын тусламжтайгаар цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэдэг төхөөрөмж юм. Уламжлалт салхин турбинуудыг роторын эргэлтийн гол тэнхлэгийн байрлалаас хамааран хэвтээ тэнхлэгт (*Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT*) болон босоо тэнхлэгт (*Vertical Axis Wind Turbine, VAWT*) гэсэн үндсэн хоёр төрөлд ангилдаг.Хэвтээ тэнхлэгт салхин турбин нь роторын гол тэнхлэг нь газрын гадаргатай параллель байрладаг бөгөөд далбаанууд салхины чиглэл рүү харсан байрлалтай байдаг. Харин босоо тэнхлэгт салхин турбин нь роторын гол тэнхлэг нь газрын гадаргатай перпендикуляр буюу босоо байрлалтай тул салхины чиглэлээс үл хамааран эргэлдэх боломжтой байдаг.



2-р зураг. Хэвтээ тэнхлэгтэй салхин турбинууд

Хэвтээ тэнхлэгт турбинууд нь өнөө үед хамгийн өргөн хэрэглэгддэг салхины эрчим хүчний технологи бөгөөд өндөр үр ашигтай ажилладаг.



3-р зураг. Босоо тэнхлэгтэй салхин турбинууд

Босоо тэнхлэгт салхин турбинууд нь хот суурин газар болон салхины тогтворгүй чиглэлд дасан зохицох чадвартайгаараа онцлогтой байдаг.

IV. САЛХИНЫ НӨӨЦИЙН ҮНЭЛГЭЭ

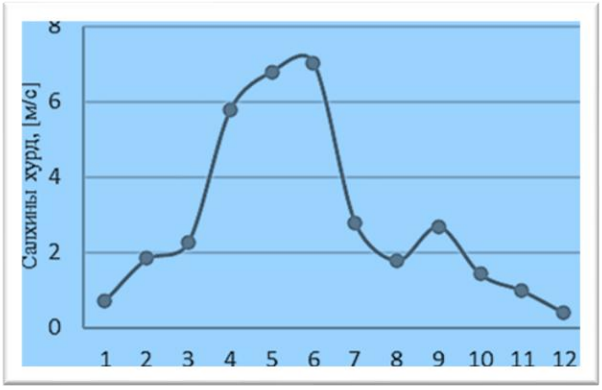
2025–2026 оны хугацаанд хэмжигдсэн салхины хурдны өгөгдлийг нэгтгэн статистик боловсруулалт хийсэн. Үндсэн үзүүлэлтүүдийг дараах хүснэгтэд харуулав.

САЛХИНЫ НӨӨЦИЙН ҮНЭЛГЭЭ

1-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Утга
Дундаж салхины хурд	1.33 м/с
Хамгийн их салхины хурд	5.4 м/с
Стандарт хазайлт	0.81 м/с

Дундаж салхины хурд 1.33 м/с байгаа нь тухайн байршил нь бага салхитай бүс болохыг харуулж байна. Иймээс нөхцөлд том хүчин чадлын салхин турбин суурилуулахад тохиромжгүй боловч жижиг хүчин чадлын турбин турших болон сургалтын зориулалттай систем байгуулах боломжтой.



4-р зураг. Салхины жилийн горим

Салхины чиглэлийн өгөгдлийг 8 үндсэн чиглэлд ангилан шинжилсний дүнд хойд-зүүн (NE) чиглэл давамгайлж байгаа нь тогтоогдлоо. Давтамжийн тоон үзүүлэлтээс харахад нийт ажиглалтын хамгийн их хувь нь NE чиглэлд (226 удаа) бүртгэгдсэн байна. Үүний дараа хойд (N) чиглэл 71 удаа ажиглагдсан бөгөөд бусад чиглэлүүд харьцангуй бага давтамжтай байна.

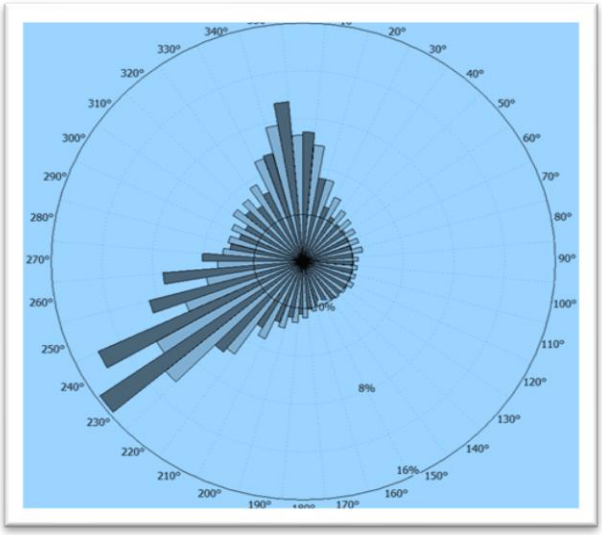
САЛХИНЫ ЧИГЛЭЛИЙН ДАВТАМЖ

2-Р ХҮСНЭГТ.

Чиглэл	Давтамж
NE (Хойд-зүүн)	226
N (Хойд)	71
SE (Зүүн-Өмнө)	33
E (Зүүн)	30
S (Урд)	29
NW (Баруун-Хойд)	19

SW (Баруун-Урд)	8
W (Баруун)	6

Энэ нь тухайн судалгааны байршилд салхи ихэвчлэн хойд болон хойд-зүүн зүгээс салхилах хандлагатай байна. . Ийм салхины тархалт нь тухайн орчны газарзүйн байрлал, барилгын байрлал, хотын салхины урсгалын онцлог зэрэг хүчин зүйлтэй холбоотой.



5-р зураг. Салхины зонхилох чиглэлийг харуулсан салхин дэлбээ

Салхины чиглэлийн энэхүү мэдээлэл нь салхины эрчим хүчний системийг төлөвлөхөд чухал ач холбогдолтой. Ялангуяа салхин турбин суурилуулах үед турбины чиглэл тохируулах систем (yaw system) болон суурилуулалтын байршлыг зөв төлөвлөхөд ашиглагдана. Зонхилох чиглэл нь хойд-зүүн байгаа тул турбиныг тухайн чиглэлд илүү үр ашигтайгаар салхи хүлээн авах боломжтой байдлаар байрлуулах шаардлагатай.

Салхины хурдны статистик тархалтыг илэрхийлэхэд Weibull тархалтыг өргөн ашиглагддаг.

Weibull тархалтын магадлалын функцийг дараах томьёогоор тодорхойлно.[3]

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \qquad (1)$$

k *– хэлбэршилтийн параметр*

c *– масштабын параметр*

САЛХИНЫ ПАРАМЕТР

3-Р ХҮСНЭГТ.

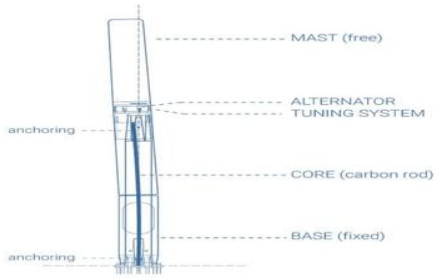
Параметр	Утга
Хэлбэрийн параметр (k)	1.74
Масштабын параметр (c)	1.50 м/с

k параметрийн утга 2-оос бага байгаа нь салхины хурд их хэлбэлзэлтэй, бага салхитай нөхцөл байгааг илтгэнэ.

V. VORTEX ТЕХНОЛОГИЙН АЖИЛЛАХ ЗАРЧИМ, ЭД АНГИУД

Салхин цахилгаан станцын технологид гарч буй нэгэн сонирхолтой шийдэл бол Bladeless Wind Turbine буюу далбаагүй салхин турбин юм. Уламжлалт турбинууд шиг эргэлдэх далбаа ашиглахгүйгээр цахилгаан гаргаж авдгаараа онцлогтой.[1]

1. Ажиллах зарчим: Уламжлалт салхин сэнс нь салхины урсгалаар далбааг эргүүлж механик энерги үүсгэдэг бол далбаагүй турбин нь Vortex Shedding буюу "Хуйларсан урсгалын саатлын" зарчим дээр тулгуурлан Vortex Induced Vibration буюу хуйлралаас үүдэлтэй савлах хөдөлгөөн хийж хэлбэлзлийн амплитуд утгад хүрч системийн өөрийн давтамжтай гадаад хүчний давтамж тэнцэх үед хамгийн их энерги гаргах онцгой нөхцөл бүрдсэнээр генераторын ороомог дундуур Electromagnetic соронз хөдөлж цахилгаан эрчим хүч үүсгэдэг.[2]

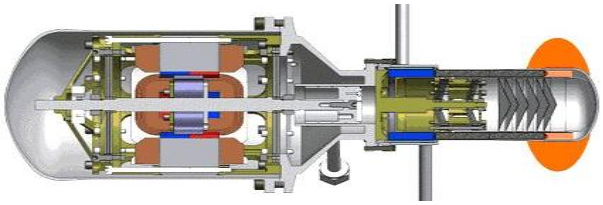


6-р зураг. Далбаагүй салхин турбины бүтэц, харагдах байдал

1. Маст(Mast): Ихэвчлэн carbon fiber болон полимерээр хийдэг хөнгөн цилиндр хэлбэртэй босоо багана. Энэ нь салхины урсгалаас хуйларсан хүчийг авч савлан хэлбэлзэл үүсгэх үүрэгтэй.[11]

2. Уян хатан суурь (Carbon Rod): Баганын доод хэсэгт байрлах карбон файбер тулгуур. Энэ нь баганыг хугаралгүйгээр чөлөөтэй савлах боломжийг олгоно.[11]

3. Шугаман Альтернатор (Linear Alternator): Механик хэлбэлзлийг цахилгаан энерги болгох гол төхөөрөмж бөгөөд цахилгаан соронзон индукцийн хууль дээр үндэслэн баганын ёроолд байгаа elevtromagnet соронзон ороомог дотор нааш цааш хөдлөх ба ингэснээр ороомог дундуур нэвтрэх соронзон орны урсгал тасралтгүй өөрчлөгдөнө. Соронзон урсгал өөрчлөгдөх бүрд зэс утсан дахь электронууд хөдөлгөөнд орж, цахилгаан гүйдэл үүснэ. Соронзон нэг тийш хөдлөхөд гүйдэл нэг чиглэлд, буцахдаа эсрэг чиглэлд урсаж хувьсах гүйдэл (AC) үүсгэдэг.[12]



7-Зураг. Шугаман альтернатор (Linear Alternator)

4. Тохируулгын соронзон систем (tuning system): Салхины хурд өөрчлөгдөхөд баганын хэлбэлзэх давтамжийг салхины давтамжтай тааруулж байнгын резонанс үүсгэхэд туслах соронзон бүтэц бөгөөд салхины хурд өөрчлөгдөхөд турбин резонансаас гарч, савлагаа нь зогсох эрсдэлтэй. Уг системийн соронзонгуудыг ижил туйлаар өөд өөдөөс нь харуулж байрлуулснаар тэд бие биедээ түлхэх хүч үзүүлж соронзон орон хүчтэй байх тусам багана хатуу болж хурдан хэлбэлзэнэ, соронзон орон сул байвал багана зөөлөн болж хэлбэлзлээ удаашруулах зарчмаар ажилладаг байна. Турбин дээрх мэдрэгч салхины хурдыг тогтмол хэмжинэ. Салхины хурднаас хамаарч мэдрэгч тохируулгын соронзон систем руу очих цахилгаан гүйдлийг ихэсгэж багасгадаг ба ингэснээр соронзонгуудын түлхэлцэх хүчийг тохируулах нөхцөл бүрдэнэ.[13]

VI. МОНГОЛ УЛСАД VORTEX ТЕХНЕЛОГИЙГ АШИГЛАХ

Vortex турбин эргэлдэх эд анги, тос тосолгоо шаардлагагүй. Механик үрэлт байхгүй тул хөлдөлтөөс шалтгаалж гацах эрсдэл маш бага. Баганын хэлбэлзэл нь мөс тогтохоос сэргийлэх нөлөө үзүүлдэг. Энэ систем нь бүрэн битүүмжлэгдсэн байдаг тул элс орох араа, холхивч байхгүй элэгдэл бага, ашиглалтын хугацаа урт байна. Хот суурин орчинд уламжлалт салхин турбиныг ашиглахад тодорхой хүндрэлүүд гардаг. Үүнд дуу чимээ ихтэй, хөдөлгөөнт далбаа нь шувуу болон хүрээлэн буй орчинд нөлөөлөх, мөн их хэмжээний зай талбай шаарддаг зэрэг асуудлуудтай.



8-р зураг. Шинэ төрлийн Vortex салхин турбины хэрэглээ

Харин далбаагүй салхин турбин нь эргэлдэх далбаа байхгүй тул дуу чимээ харьцангуй бага, аюулгүй ажиллагаа өндөр, бүтцийн хувьд энгийн бөгөөд хотын барилга байгууламжийн дээвэр дээр суурилуулах боломжтой зэрэг давуу талтай.

Мөн тооцоогоор Улаанбаатар хотын салхины чиглэл зүүн хойд зүг буюу 230 градусын чиглэлээс ирж байгаа учраас турбины ашигтай ажиллах чиглэлийг дээрх зүгт харуулан газрын гадаргатай перпендикуляраар байрлуулах шаардлагатай. Энэхүү турбин нь нэг ширхэг нь 1кВт эрчим хүч үйлдвэрлэх хүчин чадалтай ба Улаанбаатар хотын дундаж салхины хурд 1.33м/с байна. Эндээс 20кВт-ын суурилагдсан хүчин чадалтай бага оврын салхин станц байгуулсан гэж үзвэл 26,280кВт.ц/жил эрчим хүч жилд үйлдвэрлэнэ гэж тооцлоо.

Салхины хувийн чадал ба салхин турбины гаргах чадал, үйлдвэрлэх эрчим хүчний хэмжээг дараах тэгшитгэлүүдээр тооцно.

$$P=0.5\cdot\rho\cdot A\cdot V^3 \qquad (2)$$

Энд: P- салхины хувийн чадал, ρ-агаарын нягт, A-салхин турбины роторын диаметр, V-салхины дундаж хурд.

Салхин турбины бодит үйлдвэрлэх эрчим хүчний томъёо:

$$P_{цах}=0.5\cdot\rho\cdot A\cdot V^3\cdot C_p \qquad (3)$$

Энд: нь C_p турбины чадлын коэффициент юм.

СИСТЕМИЙН ХҮЧИН ЧАДАЛ, ҮР АШИГ, ХӨРӨНГӨ ОРУУЛАЛТ

4-Р ХҮСНЭГТ.

Байршил	**Чадал кВт**	**Орлого /сая ₮/**	**Хөрөнгө оруулалт /сая ₮/**	**Нөхөх хугацаа /жил/**
Улаанбаатар хотын төвд (Орон сууцны дээвэр дээр)	20	7.687	80	10.4

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар Монгол орны хот суурин газрын бага салхины нөхцөлд Vortex Bladeless салхин турбины ашиглах боломжийг үнэлэв. Судалгаанд 2025-2026 оны хугацаанд ШУТИС-ийн Т байрны дээвэрт суурилуулсан цаг уурын станцын өгөгдлийг ашиглан дундаж салхины хурд, хамгийн их хурд, стандарт хазайлт, зонхилох салхины чиглэлийг шинжилсэн. Судалгааны үр дүнгээр дундаж салхины хурд 1.33 м/с, зонхилох чиглэл нь хойд-зүүн (NE) зүг байгааг тогтоосон.VBWT нь салхины урсгалаас үүсэх хуйлралыг ашиглан механик хэлбэлзлийг цахилгаан эрчим хүч болгон хувиргадаг. Судалгаагаар тухайн байршлын жилийн цахилгаан эрчим хүчний үйлдвэрлэл ойролцоогоор 26,280 кВт.ц байх ба Монгол улсын хувьд уг технологийг нэвтрүүлэх нь уламжлалт салхины станцыг орлох бус, харин түүний хүрч чадахгүй байгаа бага чадлын, эрс тэс бүс нутгийн орон зайг нөхөх стратеги юм.

Энэхүү судалгаа дараах ач холбогдолтой:

1. Хот суурин газрын бага салхины нөхцөлд VBWT-ийн ажиллагааны боломжийг үнэлсэн,
2. Турбины суурилуулалт, чиглэл тохируулах зөвлөмжийг тодорхойлсон,

3. Хот суурин газрын дуу чимээ багатай, аюулгүй, жижиг хүчин чадлын салхины систем төлөвлөхөд академик суурь мэдээлэл болсон.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] R. S. Eldawy, A. A. Ghorab, and M. M. Sayed, “A State-of-the-Art Review on Vortex Induced Vibrations Phenomenon Bladeless Wind Turbine Technology,” J. Sci. Res. Rep., vol. 30, no. 11, pp. 1045–1056, Nov. 2024.

[2] H. Kang, J. Kook, J. Lee, and Y.-K. Kim, “A Novel Small-Scale Bladeless Wind Turbine Using Vortex-Induced Vibration and a Discrete Resonance-Shifting Module,” Appl. Sci., vol. 14, no. 18, Art. 8217, 2024.

[3] H. Kang, S. Han, and Y.-K. Kim, “Design Optimization of a Small-Scaled Vortex-Induced Vibration Bladeless Wind Turbine with Binary Resonance Controller,” Appl. Sci., vol. 16, no. 1, Art. 553, Jan. 2026.

[4] I. Bahadur, “Dynamic Modeling and Investigation of a Tunable Vortex Bladeless Wind Turbine,” Energies, vol. 15, no. 18, Art. 6773, Sep. 2022.

[5] “Design and Analysis of Vortex Bladeless Wind Turbine,” Materials Today: Proceedings, vol. 47 Pt. 16, pp. 5584–5588, 2021

[6] A. Younis et al., “Design and Development of Bladeless Vibration-Based Piezoelectric Energy-Harvesting Wind Turbine,” Appl. Sci., vol. 12, no. 15, Art. 7769, 2022.

[7] C. Kamal Samy et al., “Design of Portable Vortex Bladeless Wind Turbine: Preliminary Study,” J. Adv. Res. Appl. Mech., 2021.

[8] L. Yin Kwong and D. Han, “Design Optimization of Vortex-Induced Vibration Bladeless Wind Turbines for Urban Energy Harvesting,” Trends in Renewable Energy, vol. 11, no. 2, pp. 255–279, Oct. 2025.

[9] G. L. Tenorio et al., “Stiffness Impact on the Design and Sustainable Functioning of Vortex Bladeless Turbines,” in 9th Int’l Eng. Sci. Technol. Conf., Panama City, 2024.

[10] J. Nejadali, “Design Improvement of the Small-Scale Vortex-Induced Bladeless Wind Turbine Considering the Characteristic Length of the Oscillating Structure,” Iran. J. Sci. Technol., Trans. Mech. Eng., vol. 48, no. 4, pp. 1839–1850, 2023.

[11] MDPI Bladeless Wind Turbine: Design and Optimization Using Vortex-Induced Vibrations. Applied Sciences Journal, 2024.

[12] Elsevier Performance Analysis of Bladeless Wind Turbine Systems. Renewable Energy Journal, 2025. Journal of Scientific Research and Reports A Review on Bladeless Wind Turbine Technology., 2024.

[13] Journal of Scientific Research and Reports A Review on Bladeless Wind Turbine Technology., 2024.

ДХС-ИЙН ДУЛААНЫ ДЭД СТАНЦ ДАХЬ ДАРАЛТ, ДАРАЛТЫН ЗӨРҮҮНИЙ ХЭМЖИХ ХЭРЭГСЭЛ БА ТОХИРУУЛГЫН ЭЛЕМЕНТИЙН СОНГОЛТЫН СУДАЛГАА

Дарьсүрэнгийн МИЧИДМАА[1], Халзангийн ЦОЛМОН[2], Лхагвасүрэнгийн АТАРЦЭЦЭГ[3]

[1,2,3]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: kh.tsolmon@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Улаанбаатар хотын туйлын хүйтэн нөхцөл (−39°C)-д ажиллах 3.5 Gcal/h дундаж ачаалалтай орон сууцны дулааны дэд станц (ДДС)-д зориулсан даралт (PT) болон даралтын зөрүүний (DPT) хэмжих хэрэгсэл болон тохируулгын элементийн сонголтын нэгдсэн аргачлалыг боловсруулахад энэ судалгаа чиглэв. −39°C ба IP65+ шинжүүрт тэргүүн жин өгсөн 8 шалгуур бүхий жинлэсэн MCDM аргаар Emerson (Rosemount), Endress+Hauser (E+H), Yokogawa, Danfoss — 4 үйлдвэрлэгчийн хэрэгслийг харьцуулан, ±20%-ийн мэдрэмжийн шинжилгээгээр сонголтын тогтвортой байдлыг баталгаажуулав. PT-302 байрлалд Rosemount 3051S, DPT-301 байрлалд Rosemount 3051CD нь нарийвчлал ±0.04%, SIL 2/3, HART 7+FF давуу талаар тэргүүлсэн бөгөөд −39°C нөхцөлд шууд суурилуулалтыг зөвлөв. ABB ACS580 VFD нэвтрүүлснээр ~$41,000/жил хэмнэлт, 1.7–2.4 жилийн эргэн төлөгдөх хугацааг тооцов. Энэ аргачлал нь хүйтэн нөхцөлтэй орнуудын ДДС-д хэрэглэгдэх боломжтой загварыг бий болгов.**

Түлхүүр үг: ДДС, даралт хэмжих, хэмжих хүрээ, үйлдвэрлэгч.

I. УДИРТГАЛ

Улаанбаатар хот нь дэлхийн хамгийн хүйтэн нийслэлийн нэг бөгөөд гадна агаарын тооцоот температур −39°C [2], халаалтын улирал 245 хоног буюу жилд ~5,880 цаг үргэлжилдэг. Хотын дулааны хэрэглэгдэхүүний 90 гаруй хувийг ДЦС-2, ДЦС-3, ДЦС-4 болон АДС хангадаг бөгөөд 1,200 гаруй дулааны дэд станц (ДДС) анхдагч ба хоёрдугаар хэлхээний технологийн холбоос болж ажилладаг [1].

Одоогийн байдлаар Улаанбаатарын олон ДДС-д даралт болон даралтын зөрүүний хэмжих хэрэгслийн сонголт нэгдсэн аргачлалгүй, ихэвчлэн үнийн шалгуур буюу нэг параметрт тулгуурлан хийгддэг. Үүний улмаас тохируулга гар горимоор явагддаг тул температурын хэлбэлзэл ±5–8°C-д хүрч, дулааны алдагдал болон гидравлик тэнцвэргүй байдал үүсдэг [3]. Даралтын зөрүүний хэмжлийн нарийвчлал нь насосны эрчим хүчний хэмнэлт болон хэрэглэгчдэд хүргэх ажлын биеийн гидравлик тогтвортой байдлыг шууд тодорхойлдог тул энэ асуудал онцгой ач холбогдолтой [6].

Олон улсын судлаачид ДДС-ийн хэмжих хэрэгслийн сонголтын асуудлыг тодорхой хэмжээнд судалсан боловч голчлон Скандинавын −20°C хүртэлх нөхцөлд тулгуурласан байдаг. Gadd, Werner [3] болон Frederiksen, Werner [6] нар ДДС-ийн ерөнхий автоматжуулалтын асуудлыг судалсан ч −39°C туйлын хүйтэн нөхцөлд зориулсан, MCDM аргаар 4 үйлдвэрлэгчийн нэгдсэн харьцуулалт хийгдэж байгаагүй байна. Олон улсын тооцооны аргачлалуудад ажлын температурын хязгаарыг ихэвчлэн −20°C хүртэл тооцдог [3, 6] тул Улаанбаатарын нөхцөлд тусгайлсан сонголтын арга зүй шаардлагатай.

Энэ судалгааны зорилго нь −39°C туйлын хүйтэн нөхцөлд ажиллах орон сууцны ДДС-ийн анхдагч хэлхээний даралт (PT) болон даралтын зөрүүний (DPT) хэмжих хэрэгсэл болон тохируулгын элементийг объектив, давтагдах, баримтжуулах боломжтой аргаар сонгох нэгдсэн аргачлал боловсруулахад оршино. Судалгааны зорилтууд: (1) −39°C ба IP65+-г нарийвчлал, IEC 61511 SIL сертификаттай тэнцүү тэргүүн жинд тавьсан MCDM систем боловсруулах; (2) Emerson, E+H, Yokogawa, Danfoss — 4 үйлдвэрлэгчийн нэгдсэн харьцуулалт хийх; (3) мэдрэмжийн шинжилгээгээр сонголтын тогтвортой байдлыг баталгаажуулах.

Судалгааны шинэлэг тал: (1) −39°C нөхцөл болон IEC 61511 аюулгүй байдлын стандартыг нэгтгэсэн шинжүүрийн жингийн тогтолцоо; (2) хүйтэн нөхцөлтэй орнуудад хуулбарлагдах загвар; (3) MCDM аргын субъектив байдлыг ±20%-ийн мэдрэмжийн шинжилгээгээр баталгаажуулсан нь тус тус юм.

II. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ

Судалгааны объект нь Улаанбаатар хотын ДХС-д холбогдсон дундаж ачаалалтай (3.5 Gcal/h) орон сууцны хорооллын ДДС юм. Энэ ангилал нь 150–400 орон сууцтай хорооллыг дулаанаар хангадаг, Улаанбаатарын нийт ДДС-ийн 60 гаруй хувийг эзэлдэг [1, 2]. ДДС нь ялтсан дулаан солилцуурт дамжуулан дулаацуулгын систем болон хэрэгцээний халуун усны системийг тусад нь хангана.

Судалгааны объект болох ДДС нь Улаанбаатарын орон сууцны хорооллын дулааны дэд станц бөгөөд 150–400 орон сууцтай хорооллыг дулаанаар хангадаг дундаж ачаалалтай ДДС-ийн ангилалд хамаарна. Энэ ангилал нь Улаанбаатарын нийт ДДС-ийн 60 гаруй хувийг эзэлдэг [1] тул судалгааны үр дүн нь өргөн хэрэглэгдэх чанартай. ДДС нь ялтсан дулаан солилцуураар дамжуулан халаалтын хоёрдугаар хэлхээ болон хэрэгцээний халуун усны системийг тусад нь хангадаг.

Одоогийн байдлаар суурилуулсан хэмжих хэрэгслүүд нь гадна агаарын тооцоот температур −39°C-д тохирсон техникийн үзүүлэлтгүй тул хэмжлийн найдвартай байдал хангалтгүй байдаг — энэ нь судалгааны гол актуальчлал юм.

Улаанбаатарын дулааны сүлжээний системд ДДС-ийн автоматжуулалтын үндсэн зорилгод дараах зүйлс орно: барилгын дотор агаарын температурыг захиалгын түвшинд тохируулж барих; хэрэгцээний халуун усны температурыг тохируулах; анхдагч хэлхээний өгөх ба буцах ерөнхий шугамын усны даралтын зөрүүг тогтмол барих; калориферыг хөлдөхөөс хамгаалах; насосны автомат болон алсын удирдлагыг хангах.

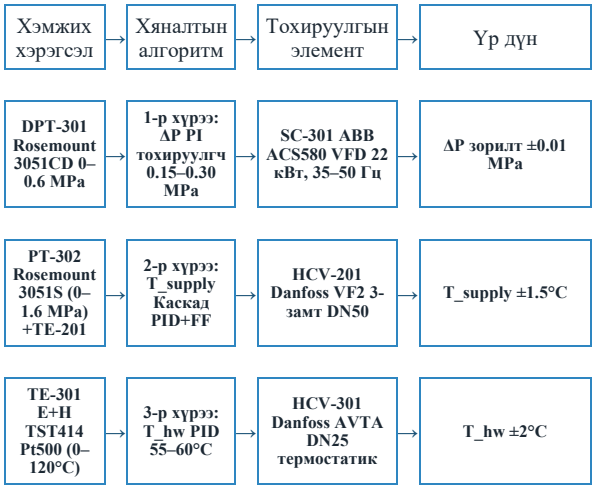
Судалгааны зорилго болох 1-р хүрээ (анхдагч сүлжээний ΔP хяналт)-ын параметрүүдийг Хүснэгт 1-д, 3 хяналтын хүрээний бүтцийг Зураг 1-д харуулав.

ДУНДАЖ АЧААЛАЛТАЙ ОРОН СУУЦНЫ ДДС-ИЙН ТООЦООНЫ ҮЗҮҮЛЭЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Утга	Нэгж	Тайлбар
Дулааны тооцооны ачаалал	3.5	Гкал/ц	~250 орон сууц
Хамгийн бага T	−39	°C	Улаанбаатарын ажиглалт
Халаалтын улирал	245	хоног	≈5,880 ц/жил
Анхдагч сүлжээний P	0.80–1.00	MPa	ДЦС параметр
Тохируулга ΔP (1-р хүрээ)	0.15–0.30	MPa	VFD хувьсах горим
Анхдагч сүлжээний T_supply	90–130	°C	Цаг агаараар
Өгөх усны T_supply	65–90	°C	—
ХХУ-ны T_hw	55–60	°C	СНиП 2.04.01-85 [8]

Халаалтын үед −39°C-д гадаа байрлах DPT-301 ба PT-302 хэмжих хэрэгслүүд ажиллах шаардлагатай.



1-р зураг. Орон сууцны ДДС-ийн хэмжил, хяналтын хүрээний диаграмм

Уламжлалт импульсийн шугам хөлдөх эрсдэлтэй тул гурвалсан тохируулгын хаалтыг ашиглан шууд суурилуулалт хийхийг зөвлөдөг [10, 17].

III. АРГА ЗҮЙ

Хэмжих хэрэгслийн сонголтод олон шинжүүрээр дүгнэсэн үнэлгээний аргыг (MCDM) ашиглав [5, 7]. Шинжүүр бүрийг 1–10 оноогоор үнэлж, WS = Sum(wi x si) томьёогоор нийт жинлэсэн оноог тооцоолж, хамгийн өндөр WS-тэй хэрэгслийг сонгоно. Дөрвөн үйлдвэрлэгч — Emerson (Rosemount), E+H, Yokogawa, Danfoss — харьцуулсан бөгөөд PT-302 байрлал (даралт, 0–1.6 MPa) ба DPT-301 байрлал (даралтын зөрүү, 0–0.6 MPa)-д үнэлгээг тус тусад нь хийсэн.

Шинжүүрийн жингийн үндэслэл: нарийвчлалд w=0.20 өгсний учир нь PI хяналтын алдааны утгад шууд нөлөөлдөг — нарийвчлал 2 дахин буурахад даралтын зөрүүний хяналтын алдаа тэр хэмжээгээр нэмэгддэг [7]. SIL сертификатад w=0.15 өгсний учир нь IEC 61511 аюулгүй байдлын функциональ стандарт анхдагч хэлхээнд SIL 2+ шаардлагыг тодорхой заасан [9]. Ажлын температурын хүрээнд w=0.15 өгсний учир нь Улаанбаатарын −39°C нь Европын стандарт −20°C-аас 19°C илүү хүйтэн [2] тул энэ шинжүүр Скандинавын аргачлалуудаас ялгаатай, онцгой ач холбогдолтой юм. IP хамгаалалтад w=0.10 өгсний учир нь гадаа байрлалтад IEC 60529 [10]-ийн дагуу IP65+ минимум шаардлага байдаг.

Оноо өгөх арга зүй: тухайн байрлалын ажлын параметрт хамгийн тохиромжтой техникийн үзүүлэлтэд 10 оноо өгч, шаардлагаас хазайх бүрд пропорциональ оноо хасав. Нарийвчлалын шинжүүрт: ±0.04% → 10 оноо; ±0.065–0.075% → 9 оноо; ±0.1% → 8 оноо; ±0.5% → 7 оноо. SIL сертификатад: SIL 2/3 → 10 оноо; SIL 2 → 10 оноо; сертификатгүй → 4–5 оноо [9]. Ажлын температурын хүрээнд: −40°C хүртэл → 9 оноо; −40°C-аас доош → 10 оноо өгөв.

Мэдрэмжийн шинжилгээ: шинжүүр бүрийн жинг ±20%-иар өөрчилж (тухайлбал нарийвчлалын w=0.20-г 0.16–0.24 болгох гэх мэт), нийт WS-ийн өөрчлөлт болон эрэмбийн тогтвортой байдлыг шалгав. ±20% өөрчлөлтийн аль ч тохиолдолд Rosemount тэргүүн байрлалаа хадгалсан нь сонголтын найдвартай байдлыг баталгаажуулж байна.

ШИНЖҮҮРИЙН ҮНЭЛГЭЭ БА ҮНДЭСЛЭЛ (−39°C БА IP65+ ШИНЖҮҮР)

2-Р ХҮСНЭГТ.

Шинжүүр	Үнэлгээ	Үндэслэл	Эх сурвалж
Нарийвчлал	0.20	ΔP PI хүрээний чанарыг шууд тодорхойлно	Seborg [7]
SIL сертификат	0.15	IEC 61511 SIL 2+ — аюулгүй байдлын хамгаалалт	IEC 61511[9]
Ажлын T хүрээ	0.15	Хамгийн бага T=−39°C [2]; Европын −20°C-аас 19°C илүү	СНиП [2]
IP хамгаалалт	0.10	Гадаа байрлалтад IP65+ минимум шаардлага	IEC 60529 [10]
Хэмжих хүрээ	0.10	Ажлын P-аас ≥20% нөөцтэй байх шаардлага	Liptak [5]
HART/Протокол	0.10	ECL Comfort 210/310, Modbus RTU нийцэл	Danfoss [11]

Шинжүүр	Үнэлгээ	Үндэслэл	Эх сурвалж
Үйлчлэх хугацаа	0.10	PI хүрээний интеграцийн хугацаатай нийцэх	Seborg [7]
Өртөг	0.10	Нийт хөрөнгө оруулалтын хүрээнд оновчлох	Зах зээлийн үнэ

IV. YP ДҮН

1. Хэмжих хэрэгслийг дүгнэсэн үнэлгээ

PT-302 байрлалд (0–1.6 MPa) Rosemount 3051S нь нарийвчлал ±0.04%, SIL 2/3, HART 7+FF-ийн давуу талаар тэргүүлэв [17]. Danfoss MBS

4510 нь ECL Comfort-тай шууд нийцтэй, өртөг хамгийн бага ч нарийвчлал ±0.5% ба SIL 2 сертификатгүй тул анхдагч сүлжээний PI хүрээнд тохиромжгүй.

PT-302 БАЙРЛАЛЫН 4 ҮЙЛДВЭРЛЭГЧИЙН ҮНЭЛГЭЭ (0–1.6 MPA)

3-Р ХҮСНЭГТ.

Шинжүүр	w	E+H	RM	Yoko.	Danf.
Хэмжих хүрээ	0.10	9(0-2.5MPa)	9(0-2.5MPa)	9(0-3MPa)	9(0-1.6MPa)
Нарийвчлал	0.20	9(±0.075%)	10(±0.04%)	8(±0,1%)	7(±0.5%)
Хариу хугацаа	0.10	9(<100мс)	9(<100мс)	9(<100мс)	8(<500мс)
Ажлын T	0.15	9(-40/+85℃)	8(-40/+121℃)	8(-40/+120℃)	9(-40/+85℃)
IP хамгаалалт	0.10	10(IP67)	10(IP67)	9(IP67)	9(IP67)
HART/Протокол	0.10	8(HART 7)	9(HART 7+FF)	7(HART 5)	5(4-20мА)
SIL сертификат	0.15	10(SIL2)	10(SIL2/3)	10(SIL 2)	5(--)
Өртөг (~$)	0,10	7(~900)	7(~1200)	9(~800)	10(~400)
WS нийт	0.10	9.05	9.10	8.60	7.60

Хүснэгт 2-оос харахад PT-302 байрлалд Rosemount 3051S 4 үйлдвэрлэгчийн дундаас тэргүүлэв [17]. Нарийвчлалын шинжүүрт: Rosemount ±0.04% → 10 оноо, E+H PMP55 ±0.075% → 9 оноо — тиймээс E+H-аас 0.05 оноогоор давуу. Yokogawa EJA430E нь ажлын температурын шинжүүрт (−40/+120°C, 8 оноо) буурсан. Danfoss MBS 4510 нь хамгийн бага үнэтэй, ECL Comfort-тай шууд нийцтэй ч нарийвчлал ±0.5% ба IEC 61511 SIL 2 сертификатгүй тул [9, 15] анхдагч хэлхээний PI хяналтын хүрээнд тохиромжгүй.

DPT-301 байрлалд (0–0.6 MPa) Rosemount 3051CD тэргүүлэв. Danfoss MBS 3000 хоёр-мэдрэгчийн арга хамгийн бага: $\Delta P = P_1 - P_2$ зөрүүгээр алдаа ±1.0% болж нийлнэ, SIL 2- сертификатгүй [18]. Тохируулгын элементэд: ABB ACS580 VFD (SC-301, Profinet, IP54+), Danfoss VF2 гурвалсан хавхалга (HCV-201, DN50) сонгох боломжтой.

DPT-301 БАЙРЛАЛЫН 4 ҮЙЛДВЭРЛЭГЧИЙН ЖИНЛЭСЭН ҮНЭЛГЭЭ (0–0.6 MPA)

4-Р ХҮСНЭГТ.

Шинжүүр	w	E+H	RM	Yoko.	Danf.
Хэмжих хүрээ	0.10	9(0-1.6MPa)	9(0-2.5MPa)	8(0-1.0MPa)	7(0-0.6MPa x2)
Нарийвчлал	0.20	9(±0.075%)	10(±0.04%)	9(±0.065%)	6(±1.0%)
Шинэчлэгдэх хугацаа	0.10	8(<200мс)	9(<100мс)	9(<100мс)	7(< 1000мс)
Ажлын T	0.15	9(-40/+85℃)	9(-40/+121℃)	9(-40/+85℃)	9(-40/+8℃)
IP хамгаалалт	0.10	10(IP67)	10(IP67)	9(IP67)	9(IP67)
HART/Протокол	0.10	9(HART 7)	9(HART 7+FF)	7(HART 5)	5(4-20мА)
SIL сертификат	0.15	10(SIL 2)	10(SIL 2/3)	10(SIL 2)	4(--)
Өртөг (~$)	0.01	7(~1800)	8(~1600)	9(~1400)	10(~600x2)
WS нийт	1.00	8.95	9.35	8.85	6.95

Хүснэгт 3-аас харахад DPT-301 байрлалд Rosemount 3051CD тодорхой зөрүүтэй тэргүүлэв [18]. E+H PMD75 ба Yokogawa EJX110A нь ойролцоо үнэлгээтэй боловч нарийвчлалын шинжүүрт Rosemount (±0.04% → 10 оноо) тэдэнтэй харьцуулахад 1 оноогоор давуу байсан нь нийт WS-ийн ялгааг шийдвэрлэв. Danfoss MBS 3000 хамгийн доор эрэмбэлэгдсэн: $\Delta P = P_1 - P_2$ хасалтын аргын нийлмэл алдаа ±1.0%, IEC 61511 SIL 2 сертификатгүй [9, 15]. ±20%-ийн мэдрэмжийн шинжилгээний аль ч тохиолдолд Rosemount 3051CD тэргүүн байрлалаа хадгалсан.

2. Эдийн засгийн үнэлгээ

Скандинавын орнуудын гадна агаарын температур −20°C нөхцөлд Gadd, Werner [3], үнэлж тогтоосон байдаг. Энэ судалгаанд −39°C-ийн нөхцөлөөс шалтгаалан ажлын температурын хүрээ ба IP хамгаалалт нийлэн нийт үнэлгээний 25%-ийг эзэлсэн нь Скандинавын аргачлалуудаас [3, 6] ялгарах гол онцлог юм. ABB ACS580 VFD [13]-ийн нэвтрүүлэлт ~$41,000/жил хэмнэлт, 1.7–2.4 жилийн эргэн төлөгдөх хугацаатай. Danfoss MBS нь Монголын ДДС-д өргөн хэрэглэгддэг, ECL Comfort-тай шууд нийцтэй, өртөг бага давуу талтай [15]. Гэвч IEC 61511 SIL 2 сертификатгүйн улмаас [9] анхдагч хэлхээний аюулгүй байдлын хүрээнд хэрэглэж болохгүй; хоёрдогч хэлхээний суурь даралтын хяналт (PT-304, PT-305) болон дохиоллын байрлалд тохиромжтой.

Жилийн нийт хэмнэлт:

$30,000 + $11,000 ≈ $41,000/жил.

Эргэн төлөгдөх хугацаа:

$68,000/$41,000 ≈ 1.7 жил — $97,000/$41,000 ≈ 2.4 жил.

Судалгааны хязгаарлалт: нэг ДДС-ийн загварт үндэслэсэн, MCDM аргын субъектив байдлыг AHP аргаар харьцуулаагүй, бодит суурилуулалтын дараах хяналт хийгдээгүй болно.

V. ДҮГНЭЛТ

1. Гадна агаарын тооцоот температур −39°C ба IP65+ шинжүүрт тэргүүн жин өгсөн 8 шинжүүр бүхий жинлэсэн MCDM аргаар PT-302 ба DPT-301 гэсэн 2 тусдаа байрлалд 4 үйлдвэрлэгчийн объектив харьцуулалтыг хийж, ±20%-ийн мэдрэмжийн шинжилгээгээр сонголтын тогтвортой байдлыг нотолсон. Нарийвчлал, SIL сертификат, ажлын температурын хүрээнд нийт 50%-ийг оноосон шинжүүрийн тогтолцоо нь −39°C нөхцөлд тохирсон, Скандинавын аргачлалуудаас [3, 6] ялгарах онцлогтой.

2. Үйлдвэрлэгч Rosemount 3051S нь PT-302 байрлалд нарийвчлал ±0.04%, SIL 2/3, HART 7+FF давуу талаар сонгогдов [17]; Rosemount 3051CD нь DPT-301 байрлалд ΔP хяналтад нарийвчлал ±0.04%, SIL 2/3 давуу талаар тэргүүлэв [18]. DPT-301-д −39°C-д импульсийн шугамын хөлдөх эрсдэлийг арилгахын тулд гурвалсан тохируулгын хаалтаар шууд суурилуулалт хийхийг зөвлөж байна.

3. Danfoss MBS 4510 ба MBS 3000 нь ECL Comfort нийцэл ба өртгийн давуу талтай ч нарийвчлал ±0.5%, ±1.0% ба IEC 61511 SIL 2 сертификатгүйн улмаас [9, 15] анхдагч хэлхээний аюулгүй байдлын системд тохиромжгүй. Danfoss MBS-ийг хоёрдогч хэлхээний суурь даралтын хяналт (PT-304, PT-305) болон дохиоллын байрлалд ашиглах нь зохистой — өртгийн давуу тал болон ECL Comfort нийцэл практик ач холбогдолтой.

4.ABB ACS580 VFD [13] нэвтрүүлснээр анхдагч хэлхээний ΔP PI хяналтаар түлшний зарцуулалт 8–12%, цахилгааны зарцуулалт 20–35% хэмнэгдэж ~$41,000/жил нийт хэмнэлт; $68,000–$97,000 хөрөнгө оруулалт 1.7–2.4 жилд эргэн төлөгдөнө. Энэ үр дүн нь 4-р үеийн ДХС (4GDH) [4]-д шилжихэд шаардагдах автоматжуулалтын эдийн засгийн үндэслэлийг Улаанбаатарын нөхцөлд баталгаажуулж байна.

5.Энэ аргачлал нь −39°C болон адил хүйтэн нөхцөлтэй орнуудын (Монгол, Казахстан, ОХУ-ын хойд бүс) ДДС-д хэрэглэгдэх боломжтой загварыг бий болгов. ISA-5.1-2022 [16] стандартын тэмдэглэгээг ашигласан хяналтын хүрээний схем нь олон улсын хэрэглэгчдэд ойлгомжтой. Цаашид: (а) бодит суурилуулалтын дараах хяналтын хэмжилтээр загварыг баталгаажуулах; (б) AHP аргаар MCDM-ийн субъектив байдлыг харьцуулан шинжлэх; (в) 4GDH [4]-д шилжих техник-эдийн засгийн нарийвчилсан судалгаа хийх шаардлагатай.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] ЭЦТЕГ. Улаанбаатар хотын дулааны сүлжээний статистик тоймын тайлан. УБ: ЭЦТЕГ, 2024.

[2] СНиП II-А.6-72. Барилгын цаг уур. УБ: БХБЯ, 1972. [Тооцооны Т: −26°C, туйлын Т: −39°C]

[3] Gadd H., Werner S. Achieving low return temperatures from district heating substations. Applied Energy, 2014, vol. 136, pp. 59–67. doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.048

[4] Lund H., Werner S. et al. 4th Generation District Heating (4GDH). Energy, 2014, vol. 68, pp. 1–11. doi:10.1016/j.energy.2014.02.089

[5] Lipták B.G. Instrument Engineers' Handbook, Vol. 2. 4th ed. CRC Press, 2018.

[6] Frederiksen S., Werner S. District Heating and Cooling. Studentlitteratur AB, 2013.

[7] Seborg D.E., Edgar T.F., Mellichamp D.A. Process Dynamics and Control. 4th ed. Wiley, 2016.

[8] СНиП 2.04.01-85. Барилгын дотоод ус хангамж ба бохир усны систем. М.: Госстрой, 1986.

[9] IEC 61511-1:2016. Functional Safety — Safety Instrumented Systems. Geneva: IEC, 2016.

[10] IEC 60529:2013. Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code). Geneva: IEC, 2013.

[11] Danfoss A/S. Application Handbook: District Heating Substation Automation. Danfoss, 2023.

[12] ЭБЭГ. Дулааны эрчим хүч ба шатах хэрэглэгдэхүүний тариф. УБ: ЭБЭГ, 2025.

[13] ABB Ltd. ACS580 General Purpose Drive — Hardware Manual. Rev. C. Helsinki: ABB, 2022.

[14] ЭЦТЕГ. Улаанбаатарын дулааны сүлжээний статистик мэдээлэл ба цахилгааны тариф. УБ: ЭЦТЕГ, 2024.

[15] Danfoss A/S. MBS 3000/4510 Pressure Transmitter — Technical Datasheet. Danfoss, 2023.

[16] ISA-5.1-2022. Instrumentation Symbols and Identification. Research Triangle Park: ISA, 2022.

[17] Emerson. Rosemount 3051S Pressure Transmitter — Product Data Sheet. Rev.15. Emerson, 2023.

[18] Emerson. Rosemount 3051CD Differential Pressure Transmitter — Product Data Sheet. Rev.12. Emerson, 2023.

АВТОМАТ УДИРДЛАГЫН КАСКАД СИСТЕМИЙН ТОХИРУУЛГЫН ПАРАМЕТРИЙН ОНОВЧТОЙ УТГУУДЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

Цэцэгмаагийн УУГАНЧИМЭГ[1], Халзангийн ЦОЛМОН[2]

[1,2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: uuganchimeg5960@gmail.com[1] kh.tsolmon@must.edu.mn[2]

Хураангуй: Судалгааны ажлын объектоор орчин үеийн уурын генератор НХ35/3.82-450 зуухны дулааны ачааллыг ачаалал-агаар схемээр тохируулах схемийг авч үзэв. Автомат тохируулгын системийн хамгийн өргөн хэрэглэгддэг ПИД тохируулгаар тохируулав. Тохируулгын параметрийг орчин үеийн автомат удирдлагын онолын тохируулгын аргууд болох Зиглер-Никольс ба Ламбда аргуудаар олж үр дүнг харьцуулсан бөгөөд зуухны агаарын зарцуулалтын тохируулгын чанарын үзүүлэлтийг үзүүлэв. Судалгааны үр дүнгээс харахад Зиглер-Никольс арга нь даалгаврын утгад хүрэх хугацаа (~4 мин) богино боловч хэт тохируулга 5–10% байсан бол Ламбда-В арга (λ=2τ) нь хэт тохируулгыг <3%-д байлгаж, объектын параметрийн K±30%, T±20% өөрчлөлтийн бүх 9/9 хувилбарт тогтвортой байгааг нотолсон. Далайцын нөөц >12 dB, давтамжийн нөөц >65° байгаа нь аюулгүй ажиллагааны давуу талыг харуулж байна. Хосолсон арга — дотоод хүрээнд Зиглер-Никольс PI (Kp=5.63, Ti=10c), гадаад хүрээнд Ламбда-В PID (Kp=0.67, Ti=720c, Td=90c), цочир үйлчлэлийн тохируулга (KFF=0.15) — нь −40°C хүртэлх нөхцөлд хамгийн оновчтой болох нь тогтоогдов.

Түлхүүр үг: дамжуулалтын функц, Зиглер-Никольс арга, Ламбда арга, хазайлт, цочир үйлчлэл

I. УДИРТГАЛ

Орчин үеийн уурын генераторын нэг хэлбэр болох барабант зуух нь харьцангуй өндөр түвшинд автоматжуулагдсан агрегат юм. Уурын генераторын автоматжуулалт нь зуухны ашигт үйлийн коэффициентыг нэмэгдүүлэх, түлшний хувийн зарцуулалтыг бууруулах, аюулгүй ажиллагааг хангах гол хүчин зүйлийн нэг юм [1]. Зуухны илүүдэл агаарын оновчтой хэмжээг тохируулах үндсэн арга нь үлээх салхилуурын үлээлгээр галын хотолд өгөгдөх агаарын зарцуулалтыг өөрчлөх бөгөөд үйлдвэрлэлийн бодит нөхцөлд зуухны галын хотолд өгөгдөж буй түлш ба агаарын зарцуулалтыг найдвартай, нарийвчлалтай хэмжих техникийн боломж бүрдсэн тохиолдолд тэдгээрийн хоорондох тохиромжтой харьцааг ерөнхий агаарын өгөлтөөр тохируулах арга нь хялбар бөгөөд оновчтой юм.

Үйлдвэрлэлд ашиглагдаж буй контроллеруудын талаас их нь ПИД контроллер бөгөөд давуу тал нь динамик системийг хамгийн оновчтой удирдах юм [2].

Энэ судалгаанд ПИД тохируулгын хамгийн өргөн хэрэглэгддэг хоёр аргыг — Зиглер-Никольс [6] болон Ламбда аргыг [5] — каскад системийн дотоод болон гадаад хүрээнд тус тус хэрэглэж, тохируулгын чанарын үзүүлэлтийг харьцуулсан. Зиглер-Никольс арга нь хурдан тохируулга, Ламбда арга нь тогтвортой байдлыг тэргүүн зорилго болгодог учраас эдгээр хоёр аргын харьцуулалт нь НХ35/3.82-450 уурын генераторын бодит ажиллагааны нөхцөлд практик ач холбогдолтой юм.

II. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ

Аливаа технологийн процесс, тоног төхөөрөмж, агрегат үйлдвэрлэлийн процессыг автомат удирдлагын төхөөрөмжийн тусламжтайгаар удирдаж болно. Түүнийг автомат удирдлагын объект гэнэ [1]. Энэхүү судалгааны объектоор БНХАУ-ын "Чэнгду Инженеринг" зуухны заводод үйлдвэрлэгдсэн НХ35/3.82-450 уурын генераторыг сонгон авав. Энэ нь тогоотой, нэг циклон, босоо усан хоолойтой, ердийн эргэлттэй нам температурт түлшний шаталтыг явуулдаг эргэх буцлах давхаргатай орчин үеийн уурын генератор бөгөөд каскад автоматжуулалтын тохируулгын судалгаанд хамгийн тохиромжтой объект болно. Зуухны техникийн үзүүлэлтүүдийг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв.

ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

1-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Хэмжих нэгж	Утга
Уур гаргах чадал	тн/цаг	35
Уурын даралт	МПа	3.82
Уурын температур	°C	450
Тэжээлийн усны температур	°C	150

Мөн зуухны дагуу огтлолыг 1-р зурагт үзүүлэв.

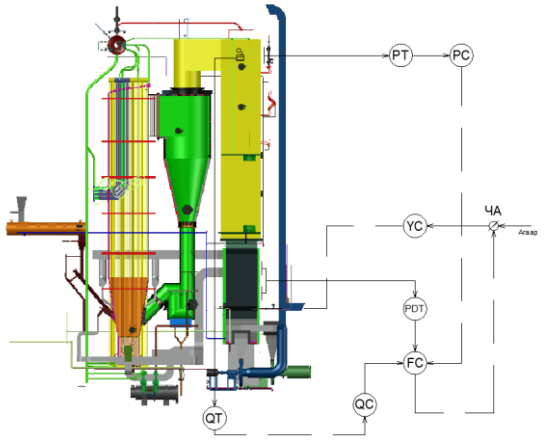


1-р зураг. НХ35/3.82 зуухны дагуу огтлол

III. ТОХИРУУЛГЫН АРГА, СХЕМ

Ачаалал-агаар схемээр агаарын зарцуулалтыг тохируулах

Түлшний шаталтын бүтээгдэхүүн болох утааны хийн найрлага дахь чөлөөт O_2-ийн агууламж нь илүүдэл агаарын хэмжээг тодорхойлж өгдөг гол үзүүлэлт бөгөөд түлшний бүтцээс бага хамаардаг. Иймд ерөнхий агаарын регуляторт O_2-ийн агууламжаар авсан сигналыг оролтын сигнал болгож ашиглах бүрэн боломжтой. Гэвч үйлдвэрлэлийн нөхцөлд найдвартай, түргэн ажиллагаатай хийн шинжлүүр дутагдалтай байдгаас шалтгаалан хүчилтөрөгчийн агууламжаар шууд авсан сигналтай биш харин O_2-ийн засвар оруулах үйлчлэлийн сигналтай схемийг агаарын өгөлтийн автомат тохируулгын системд түгээмэл хэрэглэдэг [2]. Тохируулгын ачаалал-агаар схемийг 2-р зураг үзүүлэв.

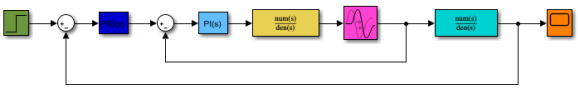


2-р зураг. Тохируулгын ачаалал-агаар схем

Тохируулгын бүтцийн схемийг загварчлах

Тохируулгын бүтцийн схемийг Matlab Simulink орчинд загварчилж, системийн ажиллагааг судлах боломжийг бүрдүүлсэн ба загварчлах явцад системийн үндсэн элементүүдийг ашиглан тохируулгын процессыг динамик байдлаар 3-р зурагт үзүүлэв.

ТОХИРУУЛГЫН БҮТЦИЙН СХЕМ



3-р зураг. Тохируулгын бүтцийн схем

Зиглер-Никольс арга

Зиглер-Никольсийн арга нь ПИД контроллерын параметрүүдийг тохируулахад түгээмэл хэрэглэгддэг аргачлал юм. Энэ аргыг анх 1942 онд Жон Г.Зиглер болон Натаниал Б.Никольс нар боловсруулсан бөгөөд үйлдвэрийн процессуудад ПИД контроллерыг хурдан, оновчтой тохируулах зорилготой [6]. Энэ арга нь системийн математик загвар тодорхойгүй үед динамик шинж чанар буюу шилжилтийн тодорхойломжоос ПИД контроллерын хөглөлтийн параметр Kp, Ti, Td коэффициентуудыг тодорхойлох боломжтой юм. Параметрүүдийг туршилтаар тохируулах шилжилтийн тодорхойломжийн болон хязгаарын өөрчлөлтөөр гэсэн үндсэн хоёр арга байна.

НЭГЖ ШАТАЛСАН ҮЙЛЧЛЭЛИЙН, ГАРАЛТЫГ ZIEGLER-NICHOLS 1-Р АРГА

2-Р ХҮСНЭГТ.

Тохируулгын төрөл	Kp	Ti	Td
П	T/L	∞	0
ПИ	0.9·T/L	L/0.3	0
ПИД	1.2·T/L	2L	0.5L

2-р арга хязгаарын өөрчлөлийн арга нь битүү системд, системийн тасралтгүй хэлбэлзэх үеийн параметрийг ашиглаж тохируулгын коэффициентуудийг тодорхойлдог бөгөөд ингэхдээ Ti, Td-г 0 болгож Kp-г аажмаар өсгөх ба систем тодорхой утгад хүрэхэд системийн гаралт тогтмол хэлбэлзэж эхэлнэ. Энэ үед Kcr болон Pcr-г тэмдэглэж 3-р хүснэгтэд үзүүлсэн томьёог ашиглан Kp, Ti, Td коэффициентуудийг тодорхойлно [4].

БИТҮҮ СИСТЕМИЙН ГАРАЛТАД ҮНДЭСЛЭН ZIEGLER-NICHOLS 2-Р АРГА

3-Р ХҮСНЭГТ.

Тохируулгын төрөл	Kp	Ti	Td
П	0.5·Kcr	∞	0
ПИ	0.45·Kcr	(1/1.2)·Pcr	0
ПИД	0.6·Kcr	0.5·Pcr	0.125·Pcr

Ламбда арга

Ламбда арга нь ПИД болон ПИ контроллерын тохируулгын процесст өргөн хэрэглэгддэг арга бөгөөд дотоод загварт суурилсан удирдлагын зарчимд үндэслэгддэг юм [5]. Энэ аргын ажиллах зарчим нь битүү системийн динамик шинж чанарыг ламбда (λ) параметрээр тодорхойлох болно. Энэ параметр нь контроллерт процессын хувьсагчийг А цэгээс Б цэг хүртэл шилжүүлэхэд хэр хугацаа зарцуулахыг тодорхойлдог. (λ)-ын утга бага байх нь системийн хариу үйлдэл хурдан илрэх ч хэт тохируулга болон хэлбэлзэл үүсэж болзошгүйг илтгэнэ. Харин (λ)-ын утга их байх нь системийн хариу үйлдэл удаан боловч тогтвортой бөгөөд хэт тохируулга багатай байхыг илтгэнэ.

IV. СУДАЛГААНЫ АРГ ЗҮЙ

1-р эрэмбийн хожимдолтой апериод хэсэг

Шилжилтийн тодорхойломжийн туршилтаас олсон 1-р эрэмбийн хожимдолтой апериод хэсэг — $W(s) = K \cdot e^{(-\tau s)}/(Ts+1)$ загварын параметрийг 4-р хүснэгтэд үзүүлэв.

FOPDT ЗАГВАРЫН ПАРАМЕТР

4-Р ХҮСНЭГТ.

Хүрээ	Гадаад: Түлш - T_supply	Дотоод: Хавхалга - F_fuel
K (Өсгөлт)	2.0 °C/%	0.8

τ [сек]	180	3
T [сек]	720	15
W(s)	2.0·e^(-180s)/(720s+1)	0.8·e^(-3s)/(15s+1)

Зиглер-Никольс аргаар тооцоолол

Дотоод хүрээнд (PI) нээлттэй системийн шилжилтийн тодорхойломжийн аргаар тооцов:

$$Kp = 0.9\cdot T/(K\cdot\tau) = 0.9\times15/(0.8\times3) = 5.63,\quad Ti = 3.33\cdot\tau = 10.0\ \text{сек}\quad (1)$$

Гадаад хүрээнд (PID) хаалттай системийн арга хэрэглэв. Гэдрэг холболтоос Ku = 3.14, Tu = 720 сек олж:

$$Kp = 0.6\cdot Ku = 1.88 \approx 2.0,\quad Ti = 0.5\cdot Tu = 360 \approx 380\ \text{сек},\quad Td = 0.125\cdot Tu = 90 \approx 85\ \text{сек}\quad (2)$$

Ламбда аргаар тооцоолол

Ламбда арга нь FOPDT загварт суурилж, хаалттай хүрээний хүссэн хугацааны тогтмолыг λ параметрээр зааж өгдөг. PI тохируулга: Kp = T/[K·(λ+τ)], Ti = T. PID тохируулга: Td = τ/2. λ-г 3 хувилбараар сонгож 5-р хүснэгтэд үзүүлэв.

ЛАМБДАГИЙН АРГЫН PID ТОХИРУУЛГЫН ПАРАМЕТР (3 ХУВИЛБАР)

5-Р ХҮСНЭГТ.

Хүрээ	Хувилбар	λ [c]	Kp	Ti [c]	Td [c]	Kp/Kp_ZN
Дотоод (PI)	A: λ=T	15	1.04	15	—	0.18
	B: λ=2τ	6	2.08	15	—	0.37
	C: λ=3τ	9	1.56	15	—	0.28
Гадаад (PID)	A: λ=T	720	0.40	720	90	0.20
	B: λ=2τ	360	0.67	720	90	0.33
	C: λ=3τ	540	0.50	720	90	0.25

Simulink загварчлал

Каскад PID системийн MATLAB/Simulink загварыг дараах бүтцээр байгуулав: (1) Дулааны ачааллын мууруйн функц — T_supply setpoint (T_sp = 0.021·T² − 1.96·T + 86.4); (2) Гадаад хүрээний PID тохируулга (TIC-301); (3) Цочир үйлчлэлийн тохируулга (KFF = 0.15); (4) Дотоод хүрээний PI тохируулагч (FIC-101); (5–6) FOPDT объектууд.

Дотоод хүрээний өөрчлөлт −10% түлш даралт; гадаад хүрээний T ramp −20→−35°C; робуст туршилт K±30%, T±20% өөрчлөлтийг авч үзэв.

V. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

Даалгаврын утгын шинжилгээ

Даалгаврын утгыг өөрчлөх үеийн тодорхойломжийг 4-р зурагт үзүүлэв. Z-N тохируулга нь даалгаврын утгад хүрэх хугацаа хурдан боловч хэт тохируулга их байв. Ламбда-B (λ = 2τ) тохируулга нь аажмаар хүрч байгаа боловч хэт тохируулга мэдэгдэхүйц бага байв. Ламбда-A (λ = T) хамгийн удаан, Ламбда-C (λ = 3τ) дунд зэрэг хариу үзүүлэв.

4-р зураг. Setpoint step response (110→130°C): (a) Z-N vs Ламбда-B, (b) Ламбда-ийн 3 хувилбар [эх файлын зургийг оруулна уу]

Хазайлт ба цочир үйлчлэлийн шинжилгээ

Түлшний зарцуулалт −10% өөрчлөлтөд Z-N тохируулга хурдан өөрчлөгдсөн бол Ламбда-B удаан боловч монотон (хэлбэлзэлгүй) тогтворжив. Каскад системийн бүтэц нь дотоод хүрээгээр түлш өөрчлөлтийг 10–30 секундэд тохируулах нь нэг хүрээт PID-ээс 3–5 дахин хурдан байна.

Гадна агаарын температурын цочир үйлчлэлийн өөрчлөлтөөр алдааг 30–50% бууруулсан. Цочир үйлчлэлийн тохируулгагүй тохиолдолд Ламбда аргын удаан тодорхойломж нь даалгаврын утга тасралтгүй өөрчлөгдөх нөхцөлд мөрдөх хяналтыг хангахад хүндрэлтэй болно.

Robustness шинжилгээ

Объектын параметрийн K±30%, T±20% өөрчлөлтөд Z-N тохируулга зарим тохиолдолд их хэлбэлзэлтэй байсан; Ламбда-B тохируулга бүх 9/9 хувилбарт тогтвортой байгааг 5-р зураг үзүүлэв. Энэ нь Ламбда аргын гол давуу тал бөгөөд зуухны ачааллын горим өөрчлөгдөх нөхцөлд тогтвортой ажиллагааг хангах хувьд онцгой ач холбогдолтой.

5-р зураг. Robustness test (K±30%, T±20%): (a) Z-N — их хэлбэлзэл, (b) Ламбда-B — бүгд тогтвортой [эх файлын зургийг оруулна уу]

Харьцуулалт

Z-N БА ЛАМБДА-B АРГУУДЫН ЧАНАРЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ

6-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Z-N PID	Ламбда-B PID
Гадаад Kp / Ti / Td	2.0 / 380 с / 85 с	0.67 / 720 с / 90 с
Дотоод Kp / Ti	5.63 / 10.0 с	2.08 / 15.0 с
Хэт тохируулга	5–10%	< 3%
Тогтворжилтын хугацаа	~12 мин	~18 мин
Хамгийн дээд утгад хүрэх хугацаа	~4 мин	~7 мин
Хазайлтаар	Хурдан (~10 мин), бага хэлбэлзэл	Удаан (~18 мин), монотон
Цочир үйлчлэлээр	Хамаарал бага	Хамаарал их
Робуст	7–8/9 тогтвортой	9/9 тогтвортой
Далайцын нөөц / Давтамжийн нөөц	8.5 dB / 52°	>12 dB / >65°
Тохируулгын хавхлагын элэгдэл (TV)	Их	Бага

6-р хүснэгтэд үзүүлснээр Z-N PID тохируулга нь тогтворжилтын хугацаа богино боловч хэт тохируулга 5–10% болж, робуст тохируулга 7–8/9 дүн үзүүлсэн. Харин Ламбда-B PID тохируулга нь хэт тохируулга <3%, бүх 9/9 робуст хувилбарт

тогтвортой, далайцын нөөц >12 dB, давтамжийн нөөц >65° байгаа нь аюулгүй ажиллагааны хувьд давуу болохыг харуулж байна. Тохируулгын хавхлагын элэгдэл Ламбда-В аргад мэдэгдэхүйц бага байгаа нь механик хэсгийн үйлчилгээний хугацааг уртасгах ач холбогдолтой.

VI. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар дараах үндсэн дүгнэлтэд хүрэв:

1) Z-N аргын үйлчлэл хурдан боловч хэт тохируулга 5–10%-тай, робуст сул байна. Тиймээс Z-N арга нь хурдан хариу шаардагдах богино хугацааны горимын өөрчлөлтөд тохиромжтой.
2) Ламбда арга нь удаан хариу боловч хэт тохируулга <3%, бүх 9/9 Робуст хувилбарт тогтвортой, хавхлагын элэгдэл бага байна. Тиймээс Ламбда-В арга нь аюулгүй ажиллагаа, механик элэгдлийг бууруулах шаардлага бүхий үйлдвэрлэлийн нөхцөлд давуу талтай.
3) Цочир үйлчлэлийн тохируулга нь Ламбда аргад чухал бөгөөд даалгаврын утга өөрчлөгдөхөд алдааг 30–50% бууруулсан. Иймд Ламбда аргыг хэрэглэхдээ KFF = 0.15 цочир үйлчлэлийн коэффициентыг заавал тохируулж өгөх шаардлагатай.
4) Хосолсон арга — дотоод хүрээнд Z-N PI (Kp=5.63, Ti=10c), гадаад хүрээнд Ламбда-В PID (Kp=0.67, Ti=720c, Td=90c), цочир үйлчлэл (KFF=0.15) — нь −40°C хүртэлх нөхцөлд хамгийн оновчтой. Энэ хосолсон аргачлал нь −40°C хүртэлх нөхцөлд ажиллах уурын генераторын автоматжуулалтад практик утгаараа хэрэглэгдэх бүрэн боломжтой бөгөөд цаашид бодит объектод турших судалгааг үргэлжлүүлэх хэрэгтэй.
5) Каскад системийн бүтэц нь нэг хүрээт PID-ийн дотоод хэлбэлзлийг 3–5 дахин хурдан тохируулна. Дотоод хүрээний хугацааны тогтмол нь гадаад хүрээнийхээс 60 дахин хурдан бөгөөд энэ нь каскад бүтцийн технологийн үндсэн давуу тал юм. Улаанбаатарын дулааны системийн зуухнуудын автоматжуулалтад энэ аргачлалыг нэвтрүүлэх нь эрчим хүчний хэмнэлт болон ажиллагааны найдвартай байдлыг дээшлүүлэх практик боломжтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Ц.Эрдэнэцэцэг, Ц.Жамбалсамбуу, Д.Түвшинбаатар, Д.Даваадорж, Технологийн процессын автоматжуулалт, Улаанбаатар хот: Таймпринтинг, 2006.

[2] K. Ogata, Modern Control Engineering, Upper Saddle River, New Jersey, USA: Pearson Education, 2010.

[3] Ц.Эрдэнэцэцэг, Д.Үлэмж, Автомат удирдлагын онол, Улаанбаатар хот: ШУТИС хэвлэлийн газар, 2023.

[4] Д.Мандал, Уурын генератор, Улаанбаатар хот: Соёмбо принтинг хэвлэлийн үйлдвэр, 2012.

[5] V. VanDoren, "Control Engineering," [Online]. Available: https://www.controleng.com/fundamentals-of-Lambda-tuning/. [Accessed 16 April 2013].

Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME, 64, pp. 759–768, 1942.

ИХ СУРГУУЛИЙН КАМПУСЫН ОРЧИНД ХҮНИЙ АЛХАЛТЫН ЭНЕРГИЙГ АШИГЛАХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК СИСТЕМИЙН СУДАЛГАА

Болортулгийн АГИЙМАА[1], Хишигбаярын АМАРБАЯСГАЛАН[2], Лхамжавын МӨНГӨЛЖИН[3], Цэнд-Оюугийн ОЮУНБОЛОР[4], Эрдэнэбаатарын ЭГШИГЛЭН[5], Хаянхярваагийн САРАНГЭРЭЛ[6]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, ЭХИС, Шинэ, сэргээгдэх эрчим хүчний салбар

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: sarangerel@must.edu.mn[6]

Хураангуй: **Энэхүү судалгаанд хүний алхалтын үед үүсэх механик энергийг пьезоэлектрик технологи ашиглан цахилгаан эрчим хүч болгон хувиргах боломжийг судлав. Судалгаанд пьезоэлектрик энерги хуримтлуулах зарчимд үндэслэн энерги гаргалтын математик загвар боловсруулж, Япон улсын Shibuya Station болон East Japan Railway Company–ийн хэрэгжүүлсэн туршлагыг харьцуулан авч үзэв. Мөн ШУТИС-ийн 1-р байрны 2-р давхрын коридорын явган хүний хөдөлгөөний өгөгдөлд тулгуурлан системийн техникийн боломжийг үнэлэв. Тооцооллын үр дүнд 79.58 м² талбай бүхий коридорт нийт 318 ширхэг пьезоэлектрик хавтан суурилуулах боломжтой бөгөөд уг систем нь өдөрт дунджаар 123.2 Вт·ц, жилд ойролцоогоор 44.6 кВт·ц цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх боломжтой болохыг тогтоов. Эдийн засгийн үнэлгээгээр системийн нийт өртөг ойролцоогоор 7.36 сая төгрөг бөгөөд ногоон хөгжлийн дэмжлэг болон масс үйлдвэрлэлийн нөхцөлд 5–8 жилийн хугацаанд хөрөнгө оруулалтыг нөхөх боломжтой гэж үнэлэгдэв. Судалгааны үр дүнгээс харахад пьезоэлектрик энерги хуримтлуулах систем нь LED гэрэлтүүлэг, IoT төхөөрөмж, мэдээллийн самбар зэрэг бага чадлын хэрэглээнд тохиромжтой бөгөөд их сургуулийн ухаалаг кампусын эрчим хүчний дэд бүтцийг хөгжүүлэх боломжтойг харуулж байна.**

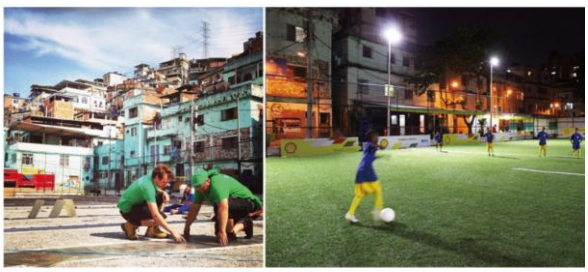
Түлхүүр үг: ***Кинетик энерги, Пьезоэлектрик хавтан, Хоёр шатлалт механизм, Ухаалаг кампус, Эрчим хүч хураалт***

I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд цахилгаан болон электрон төхөөрөмжүүдийн хэрэглээ эрчимтэй нэмэгдэж байгаатай холбоотойгоор дэлхий даяар цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээ тогтмол өсөж байна. Энэ нь уламжлалт эрчим хүчний эх үүсвэрүүдэд ирэх ачааллыг нэмэгдүүлж, сэргээгдэх болон орчны эрчим хүчийг ашиглах шинэ шийдлүүдийг эрэлхийлэх шаардлагыг бий болгож байна. Орчны энерги хуримтлуулах (energy harvesting) технологи нь дууны, чичиргээний, салхины, далайн давлагааны болон хүний хөдөлгөөнөөс үүсэх кинетик энергийг цахилгаан энерги болгон хувиргах боломжийг олгодог бөгөөд бага чадлын төхөөрөмжүүдийг бие даасан эх үүсвэрээр тэжээх ирээдүйтэй арга гэж үзэгдэж байна [1], [2]. Хүний алхалтын үед үүсэх кинетик энерги нь хот суурин газар, нийтийн тээврийн зангилаа, худалдааны төв болон их сургуулийн кампус зэрэг орчинд тасралтгүй үүсдэг боловч ихэнхдээ ашиглагдалгүй алдагддаг. Энэ энергийг цахилгаан энерги болгон хувиргах хамгийн өргөн судлагдсан аргуудын нэг нь пьезоэлектрик хувиргалт юм. Пьезоэлектрик материал нь механик даралт болон деформацийн нөлөөгөөр цахилгаан цэнэг үүсгэдэг физик шинж чанартай бөгөөд механик энергийг шууд цахилгаан энерги болгон хувиргах боломжийг олгодог [3], [4]. Ийм шинж чанараараа пьезоэлектрик технологи нь орчны энерги хуримтлуулах системийн чухал бүрэлдэхүүн хэсэг болж, утасгүй мэдрэгчийн сүлжээ, микро-электромеханик систем (MEMS), Интернэт зүйлс (IoT), зүүдэг төхөөрөмж болон ухаалаг дэд бүтцийн хэрэглээнд өргөн ашиглагдаж байна [5]. Монгол улсын хувьд эрчим хүчний хэрэглээ өсөж байгаа бөгөөд импортын эрчим хүчнээс тодорхой хэмжээгээр хамааралтай хэвээр байна. Ийм нөхцөлд сэргээгдэх болон бичил эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг ашиглах нь эрчим хүчний тогтвортой хөгжлийн чухал чиглэл болж байна. Ялангуяа олон нийтийн хөдөлгөөн ихтэй орчинд тогтмол үүсдэг боловч ашиглагдалгүй алдагддаг хүний алхалтын кинетик энергийг ашиглах боломжийг судлах нь эрчим хүчний шинэ эх үүсвэрийг бий болгох боломжтой шийдэл юм. Иймд энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь ШУТИС-ийн хичээлийн байрны коридорын орчинд хүний алхалтын кинетик энергийг пьезоэлектрик технологи ашиглан цахилгаан эрчим хүч болгон хувиргах боломжийг судалж, системийн энерги гаргалт болон техник-эдийн засгийн үр ашгийг үнэлэхэд оршино.

II. ОЛОН УЛСЫН ТУРШЛАГА

Олон улсын түвшинд явган хүний хөдөлгөөнөөс үүсэх энергийг ашиглах технологийн туршилтууд амжилттай хэрэгжиж байна. Бразилийн Рио-де-Жанейро хотын Морро да Минейра дүүрэгт байрлах хөлбөмбөгийн талбайд тоглогчдын хөдөлгөөнөөс үүсэх кинетик энергийг ашиглах системийг нэвтрүүлсэн. Талбайн доор суурилуулсан 200 ширхэг энерги хувиргах хавтан нь механик энергийг цахилгаан болгон хувиргаж, нарны хавтангуудтай хослон талбайн LED гэрэлтүүлгийг шөнийн цагаар ажиллуулах боломжийг бүрдүүлдэг [6].



1-р зураг. Пьезо цахилгаан хавтан бүхий шал

Их Британийн Лондон хотын Heathrow олон улсын нисэх буудлын Терминал 3-д Pavegen

компанийн боловсруулсан (Walk and light) 51 ширхэг кинетик энерги хувиргах шалны хавтан суурилуулсан. Эдгээр хавтан нь зорчигчдын алхалтаас үүсэх энергийг цахилгаан болгон хувиргаж, нисэх буудлын коридорын LED гэрэлтүүлэг болон интерактив мэдээллийн самбаруудыг ажиллуулахад ашиглагддаг. [7].



2-р зураг. Нисэх буудлын дотор хавтан суурилуулсан байрлал

Шведийн Стокгольм хотын метроны буудалд хүний хөдөлгөөнөөс үүсэх кинетик энергийг ашиглах энерги үүсгэгч шат (energy-generating stairs) суурилуулсан. Хүмүүс шатаар өгсөж, уруудах үед үүсэх механик энерги генераторааар дамжин цахилгаан болж хувирч батарейд хуримтлагдан, буудлын гэрэлтүүлгийн системийг тэжээхэд ашиглагддаг [8].



3-р зураг. Стокгольмын метроны буудал дахь энерги үүсгэгч шат

Арабын Нэгдсэн Эмират Улсад хэрэгжүүлсэн “Smart Walk” систем нь явган зорчигчдын алхалтаас үүсэх кинетик энергийг цахилгаан болгон хувиргаж, интернетэд холбогдсон ухаалаг платформтой уялдан ажилладаг. Тус систем нь алхамын тоо болон үйлдвэрлэсэн энергийн хэмжээг бодит цаг хугацаанд харуулах боломжтой [9]. Өмнөд Африк улсын Йоханнесбург хотын Sandton City худалдааны төвд мөн ижил төрлийн системийг суурилуулсан. Pavegen компанийн 68 ширхэг кинетик энерги үүсгэгч хавтанг байршуулснаар хүний алхалтын энергийг цахилгаан болгон хувиргаж LED мэдээллийн самбар, электрон түгжээ, хаалганы хонх зэрэг бага чадлын төхөөрөмжүүдийг ажиллуулах боломж бүрдүүлсэн [10]. Япон улсын Токиогийн Shibuya Station буудалд зорчигчдын алхалтын даралтаас цахилгаан энерги гарган авах ухаалаг шал суурилуулсан бөгөөд энэ нь мэдээллийн систем болон бага чадлын төхөөрөмжүүдийг тэжээхэд ашиглагддаг [11].

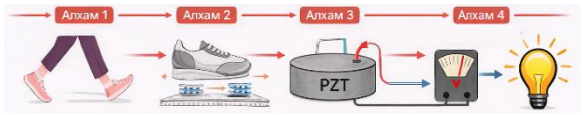


4-р зураг. Shibuya Station

Дээрх олон улсын туршлагууд нь явган хүний хөдөлгөөн ихтэй орчинд пьезоэлектрик технологи ашиглан бага чадлын цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх боломжтойг харуулж байгаа бөгөөд энэхүү технологийг их сургуулийн кампус зэрэг орчинд хэрэгжүүлэх судалгааны ач холбогдлыг илэрхийлж байна.

III. PZT ДИСК БА АЖИЛЛАХ ЕРӨНХИЙ ЗАРЧИМ

Хүний алхалтын үед үүсэх механик энерги нь хэд хэдэн шат дамжин цахилгаан энерги болон хувирдаг. Хүний алхалтын үед шаланд механик даралт үүсч механик энерги бий болдог (Алхам 1). Дараа нь уг даралт гутал болон шалны бүтцээр дамжин уян харимхайн энергид хувирч хуримтлагдана (Алхам 2). Үүний дараа механик даралт PZT материалд үйлчилж деформаци үүсгэснээр пьезоэлектрик эффектийн нөлөөгөөр цахилгаан цэнэг болон хүчдэл бий болно (Алхам 3). Эцэст нь үүссэн цахилгаан энерги нь цахилгаан хэлхээгээр дамжин хэрэглэгчийн төхөөрөмжийг тэжээх эсвэл хуримтлуулах төхөөрөмжид хадгалагдана (Алхам 4). Энэхүү энерги хувиргах процессыг Зураг 5-д үзүүлэв.



5-р зураг. Хүний алхалтын механик энергийг пьезоэлектрик материал ашиглан цахилгаан энерги болгон хувиргах ерөнхий зарчим.

1. Пьезоэлектрик эффект ба PZT материал

Пьезоэлектрик материал нь механик хүч, даралт, чичиргээ зэрэг механик үйлчлэлийн нөлөөгөөр цахилгаан потенциал үүсгэх чадвартай материал юм. Энэхүү үзэгдлийг пьезоэлектрик эффект гэж нэрлэдэг. Пьезоэлектрик материалд механик даралт үйлчлэх үед талст бүтэц дэх цахилгаан диполь моментуудын байрлал өөрчлөгдөж, материалын хоёр талд цахилгаан потенциал үүсдэг. Пьезоэлектрик энерги хуримтлуулах системд ихэвчлэн керамик, полимер болон нийлмэл материалууд ашиглагддаг. Керамик төрлийн материалуудаас PZT (Lead Zirconate Titanate, $Pb(Zr,Ti)O_3$) нь хар тугалга-цирконат-титанатын суурьтай керамик пьезоэлектрик материал бөгөөд өндөр пьезоэлектрик коэффициент, сайн механик шинж чанартай тул энерги хуримтлуулах болон мэдрэгчийн системд өргөн хэрэглэгддэг бөгөөд

PZT-4, PZT-5A, PZT-5H, PZT-8 зэрэг төрөлтэй. Энэхүү судалгаанд ашигласан PZT-5A материал нь харьцангуй өндөр пьезоэлектрик тогтмол, механик бат бөх чанар, өндөр мэдрэмж зэрэг шинж чанартай тул хүний алхалтын кинетик энергийг цахилгаан энерги болгон хувиргах системд тохиромжтой. Хүснэгт 1-д PZT-5A төрлийн пьезоэлектрик дискний цахилгаан параметрүүдийг харуулав.

PZT ДИСКНИЙ ҮНДСЭН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

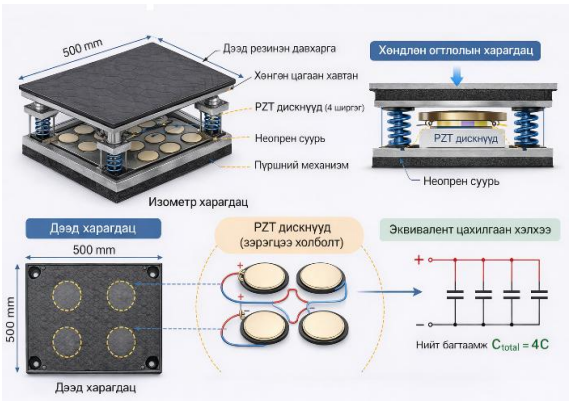
1-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Тэмдэглэгээ	Утга	Нэгж
Диаметр	D	40	мм
Зузаан	t	2	мм
Пьезо тогтмол	d_{33}	450	пКл/Н
Диэлектрик тогтмол	ε_r	1800	–
Багтаамж	C	~10	нФ
Юнгийн модуль	E	66	ГПа
Кюри температур	$T_{(C)}$	350	°C

Эдгээр параметрүүд нь механик даралтыг цахилгаан энерги болгон хувиргах үр ашигт шууд нөлөөлдөг

2. PZT дискний бүтэц ба энерги үүсгэх механизм

Пьезоэлектрик диск нь ихэвчлэн хоёр талдаа металл электрод бүхий керамик материалаас бүрддэг. Дискэнд механик даралт үйлчлэх үед талст бүтэц деформацид орж, электродын хооронд цахилгаан потенциалын ялгаа үүснэ. Үүссэн цахилгаан потенциал нь гадны хэлхээнд холбогдсоноор цахилгаан гүйдэл үүсгэнэ. Энерги үүсгэгч хавтан нь 4 ширхэг PZT дискнээс бүрдэх бөгөөд эдгээр нь зэрэгцээ холболтоор холбогдсон. Хүний алхалтын үед үүсэх механик даралт нь дээд хавтангаар дамжин PZT дискнүүдэд үйлчилж, механик энергийг цахилгаан энерги болгон хувиргана. Үүссэн цахилгаан энерги нь дараагийн хэлхээгээр дамжин хуримтлуулах системд дамжуулагдана.



6-р зураг. Пьезоэлектрик энерги үүсгэгч хавтангийн бүтэц

3. Хоёр шатлалт хүч өсгөлтийн механизм

Хүний алхалтын үед үүсэх механик хүч нь пьезоэлектрик дискэнд хангалттай деформаци үүсгэхэд зарим тохиолдолд бага байж болох тул энэхүү судалгаанд хоёр шатлалт хүч өсгөлтийн механизм ашигласан. Энэхүү механизм нь механик хөшүүргийн систем болон гидравлик даралтын систем гэсэн хоёр үндсэн хэсгээс бүрдэнэ. Эдгээр систем нь хүний алхалтын үед үүсэх хүчийг өсгөж, пьезоэлектрик дискнүүдэд илүү үр ашигтай дамжуулах үүрэгтэй. Эхний шатанд механик хөшүүргийн систем ашиглан хүний алхалтын үед үүсэх хүчийг нэмэгдүүлнэ. Хүний алхалтын дундаж хүчийг ойролцоогоор $F_0 \approx 700$ Н гэж үзвэл механик хөшүүргийн механизмаар уг хүчийг ойролцоогоор 3 дахин өсгөж дараах байдлаар илэрхийлнэ.

$$F_1 = 3F_0 \quad (1)$$

Иймээс эхний шатны дараах хүч:

$$F_1 \approx 2100 \text{ Н}$$

Хоёр дахь шатанд механик хүчийг гидравлик даралтын системээр дамжуулж пьезоэлектрик дискнүүдэд жигд хуваарилна. Гидравлик системийн нөлөөгөөр даралт дахин 2 дахин өсөх ба:

$$F_2 = 2F_1 \quad (2)$$

Ингэснээр нийт хүч:

$$F_{\text{нийт}} = 6F_0 \quad (3)$$

$$F_{\text{нийт}} \approx 4200 \text{ Н}$$



7-р зураг. Хоёр шатлалт хүч өсгөлтийн механизм

Ийнхүү хүний алхалтын анхны хүч ойролцоогоор 6 дахин нэмэгдэж, пьезоэлектрик дискэнд үйлчлэх механик деформаци нэмэгдэнэ.

IV. ТООЦОО БА СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

1.Судалгааны талбай

Судалгааг ШУТИС-ийн 1-р байрны 2-р давхрын гол коридорт хийсэн. Тус коридор нь оюутан, багш, ажилтнуудын хөдөлгөөн ихтэй бүс бөгөөд хүний алхалтын кинетик энергийг ашиглах боломжтой орчин юм. Судалгааны талбай болгон өргөн 2.4 м, урт 33.16 м хэмжээтэй коридорыг сонгосон. Судалгаанд ашиглах коридорын нийт талбайг дараах байдлаар тодорхойлов.

$$S = 2.4 \times 33.16 = 79.58 \text{ м}^2$$



8-р зураг. Судалгаанд ашиглах талбай

2. Хавтан ба PZT дискний тооцоо

Энерги үүсгэгч хавтангийн хэмжээ 0.5 м × 0.5 м байна. Иймээс нэг хавтангийн талбайг дараах байдлаар тодорхойлно.

$$S_p = 0.5 \times 0.5 = 0.25 \text{ м}^2$$

Судалгааны талбайд хэдэн хавтан байрлуулах боломжтойг тодорхойлохын тулд нийт талбайг нэг хавтангийн талбайд хуваах тооцоолов.

$$N_{\text{хавтан}} = \frac{79.58}{0.25} \approx 318 \text{ ш}$$

Ингэснээр нийт 318 ширхэг энерги үүсгэгч хавтан суурилуулах боломжтой гэж тооцоолсон.

Нэг хавтан нь 4 ширхэг PZT диск агуулдаг тул нийт ашиглагдах PZT дискний тоо:

$$N_{\text{диск}} = 318 \times 4 = 1272 \text{ ш}$$

ашиглана.

3. Нэг PZT дискний гарцын тооцоо

Судалгаанд их сургуулийн орчинд хөдөлгөөнд оролцож буй хүмүүсийн дундаж жинг 65 кг гэж үзсэн. Алхалтын үед шаланд үйлчлэх механик хүч нь хүний жин, таталцлын хурдатгал болон алхалтын динамик коэффициентоос хамаардаг. Алхалтын үед үүсэх хүчийг дараах томьёогоор тодорхойлно.

$$F = mgk \qquad (4)$$

энд
m – хүний жин (65 кг)
g – таталцлын хурдатгал (9.81 м/с²)
k – алхалтын динамик коэффициент (1.2 – 2.0)

Ингэснээр шаланд үйлчлэх механик хүч:

$$F = 65 \times 9.81 \times 1.5 \approx 956 \text{ Н}$$

Судалгаанд ашигласан хоёр шатлалт хүч өсгөлтийн механизмын нөлөөгөөр энэ хүч ойролцоогоор 6 дахин нэмэгдэнэ. Иймээс нийт механик хүч:

$$F_{\text{нийт}} = 956 \times 6 \approx 5736 \text{ Н}$$

Нэг хавтан нь 4 ширхэг PZT диск агуулдаг тул энэ хүч дискнүүдэд жигд хуваарилагдана. Иймээс нэг дискэнд ногдох хүч:

$$F_{\text{диск}} = \frac{5736}{4} \approx 1434 \text{ Н}$$

4. PZT дискний үүсгэх хүчдэл

Пьезоэлектрик материалд үйлчлэх механик хүчний нөлөөгөөр цахилгаан хүчдэл үүсдэг. Үүсэх хүчдэлийг дараах тэгшитгэлээр тодорхойлно.

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{d_{33} \cdot F}{\frac{\varepsilon S}{t}} = \frac{d_{33} F}{\varepsilon^T S}$$

энд

Q– үүсэх цахилгаан цэнэг (Кл)

S– PZT дискний талбай (м²)

ε – диэлектрик нэвтрүүлэх чадвар

ε^T – материалын диэлектрик тогтмол

ε_0 – Вакуумын диэлектрик тогтмол, (8.85×10^{-12})

Пьезо дискний радиус 0.02 м тул дискний талбай:

$$S = \pi r^2 = 3.14 \times (0.02)^2 = 0.001256 \text{ м}^2$$

ε^T – материалын диэлектрик тогтмол:

$$\varepsilon^T = \varepsilon_0 \varepsilon_r = 8.85 \times 10^{-12} \times 1800 = 1.59 \times 10^{-8}$$

Дээрх утгуудыг ашиглан тооцоход нэг PZT диск ойролцоогоор 32.3 В хүчдэл үүсгэх боломжтой.

$$V = \frac{d_{33} F}{\varepsilon^T S} = \frac{(450 \times 10 - 12) \times 1434}{(1.59 \times 10 - 8) \times 0.001256} \approx 32.3\text{В}$$

5.Пьезо дискэнд үйлчлэх механик ачаалал

Пьезоэлектрик дискэнд үйлчлэх механик стрессийг дараах байдлаар тодорхойлно.

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{1434}{0.001256} \approx 1.14 \times 10^6 \, Pa$$

энд:

σ– механик стресс (Pa)

F– дискэнд үйлчлэх хүч (Н)

Энэхүү стрессийн нөлөөгөөр пьезо материал деформацид орж, пьезоэлектрик эффектээр цахилгаан цэнэг болон хүчдэл үүснэ. Деформацийн хэмжээ ихсэх тусам үүсэх цахилгаан энергийн гарц нэмэгдэнэ.

III. ЭНЕРГИЙН ТООЦООЛОЛ

1. Нэг пьезоэлектрик дискний онолын энерги

Пьезоэлектрик диск нь механик даралтын нөлөөгөөр цахилгаан цэнэг үүсгэж, конденсаторын зарчмаар цахилгаан энерги

хуримтлуулдаг. Нэг пьезо дискэнд үүсэх энерги дараах томьёогоор тодорхойлогдоно.

$$E_{\text{диск}} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (5)$$

Судалгаанд ашигласан PZT дискний багтаамж:

$$C \approx 10 \text{ нФ} = 10 \times 10^{-9} \text{Ф}$$

харин диск дээр үүсэх хүчдэл:

$$V \approx 32.3 \text{ В}$$

Иймээс нэг пьезо дискэнд үүсэх энерги:

$$E_{\text{диск}} = \frac{1}{2} \times 10 \times 10^{-9} \times (32.3)^2 \approx 5.2 \times 10^{-6} \text{ Ж}$$

Нэг хавтан нь 4 ширхэг PZT диск агуулдаг тул нэг хавтангийн энерги:

$$E_{\text{хавтан}} = 4 \times E_{\text{диск}} = 4 \times 5.2 \times 10^{-6} = 20.8 \text{ мк Ж}$$

Энэхүү тооцооллоор нэг хавтангаас гарч болох энерги микрожоуль түвшинд байгаа нь харагдана. Системд нийт 318 хавтан ашигласан гэж үзвэл нэг алхмаас гарах нийт энерги:

$$E_{step} = 318 \times 20.8 \approx 6.6 \text{м Ж}$$

2. Бодит системийн энергийн үнэлгээ

Бодит пьезоэлектрик хавтангийн системүүд нь олон давхар бүтэц, механик өсгөлтийн механизм болон энерги удирдлагын хэлхээг ашигладаг тул нэг алхмаас гарч болох энерги онолын тооцооллоос илүү байдаг. Өндөр үр ашигтай системүүдийн хувьд нэг алхам тутамд 1-5 мВт.ц байх нь нийтлэг хязгаар боловч бодит гаралт нь хүний жин, алхах хурд, шалны хавтан дээр ашигласан пьезоэлектрик материалаас (жишээ нь PZT) ихээхэн хамаардаг. Үүнийг харьцуулж үзвэл, энэ технологийг ашиглан стандарт ухаалаг гар утсыг бүрэн цэнэглэхэд 3000-5000 алхам шаардлагатай. Иймээс энэхүү судалгаанд дундаж утга болох:

$$E_{\text{алхам}} = 2 \text{ мВт·ц}$$

гэж авч системийн энергийн үйлдвэрлэлийг тооцоолов.

3. Өдрийн нийт энерги

Коридорын урт 33.16 м, харин нэг алхмын дундаж урт 0.75 м гэж үзвэл нэг хүн коридорыг бүрэн туулахад хийх алхмын тоо:

$$N_{\text{алхам.хүн}} = \frac{L}{l} = \frac{33.16}{0.75} \approx 44 \text{ байна.}$$

Өдөрт дунджаар 2000 хүн уг коридороор зорчдог гэж үзвэл нийт алхалтын тоо:

$$N_{\text{алхам}} = 2000 \times 44 = 88000$$

Хэрэв тухайн байршлаар өдөрт 88000 алхам хийгддэг.Пьезо хавтангийн системийн үр ашгийг $\eta - 70\%$ гэж үзвэл өдрийн нийт энерги:

$$E_{\text{өдөр}} = E_{\text{өдөр}} = N_{\text{алхам}} \times E_{\text{алхам}} \times \eta \quad (6)$$

$$E_{\text{өдөр}} = 88000 \times 2 \times 0.7 \approx 123.2 \text{ Вт} \cdot \text{ц/өдөр}$$

4. Жилийн нийт энерги

$E_{\text{жил}} = E_{\text{өдөр}} \times 365 = 123.2 \times 365 \approx 44.9$ кВт · ц

Судалгааны үр дүнг Хүснэгт 2-т үзүүллээ.

PZT ДИСКНИЙ СУДАЛГААНЫ ҮНДСЭН ҮР ДҮН

2-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Тэмдэглэгээ	Утга	Нэгж
Коридорын талбай	A	79.58	м²
Хавтангийн тоо	$N_{\text{хавтан}}$	318	Ширхэг
PZT дискний тоо	$N_{\text{диск}}$	1272	ширхэг
Өдрийн хүний урсгал	P	2000	хүн
Нийт алхам	S	88000	алхам
Өдрийн энерги	$E_{\text{өдөр}}$	123.2	Вт·ц/өдөр
Жилийн энерги	$E_{\text{жил}}$	44.9	кВт·ц/жил

V. ЭДИЙН ЗАСГИЙН ҮНЭЛГЭЭ

Пьезоэлектрик энерги үүсгэгч системийг ШУТИС-ийн 1-р байрны 2-р давхрын коридорт суурилуулахад шаардагдах үндсэн тоног төхөөрөмж болон тэдгээрийн өртгийг тооцоолсон. Систем нь пьезоэлектрик хавтан, шулуутгагч хэлхээ, энерги хуримтлуулах төхөөрөмж болон хяналтын электроник зэрэг үндсэн хэсгүүдээс бүрдэнэ.

АШИГЛАГДАХ ҮНДСЭН ТОНОГ ТӨХӨӨРӨМЖ

3-Р ХҮСНЭГТ.

№	Тоног төхөөрөмж	Тоо	Нэгж үнэ (₮)	Нийт үнэ (₮)
1	PZT диск (40 мм)	1272	3,000	3,816,000
2	Хавтангийн механик рам	318	6,000	1,908,000
3	Шулуутгагч хэлхээ	318	2,000	636,000
4	Конденсатор	50	5,000	250,000
5	DC–DC хувиргагч	10	25,000	250,000
6	Микроконтроллер	5	40,000	200,000
7	Кабель, суурилуулалт	-	-	300,000
	Нийт өртөг			7.360.000

Системийг суурилуулах нийт зардал ойролцоогоор 7.36 сая төгрөг болно. Өмнөх тооцооллоор системийн жилийн энерги:

$$E_{\text{жил}} = 44.6 \text{ кВтц}$$

Монгол Улсын цахилгаан эрчим хүчний дундаж тариф:

$$1 \text{ кВтц} \approx 280 \text{ төг}$$

Иймээс жилд үйлдвэрлэх эрчим хүчний үнэ:

$$44.6 \times 280 \approx 12{,}488 \text{ төг/жил}$$

Нүүрстөрөгчийн бууралтын тооцоо

Нэг кВт·ц цахилгаан үйлдвэрлэхэд дунджаар:

$$0.7 \text{ кг } CO_2$$

ялгардаг гэж үзвэл.

$$CO_2 \approx 44.6 \times 0.7 = 31.2 \text{ кг/жил}$$

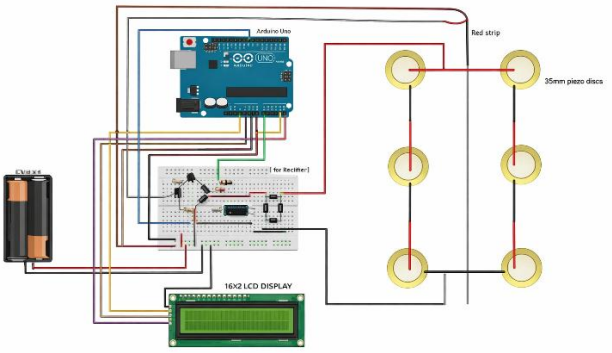
Ингэснээр систем нь жилд ойролцоогоор 31 кг CO_2 ялгарлыг бууруулах боломжтой.

VI. ТУРШИЛТЫН ХЭСЭГ

Хүний алхалтын даралтаас үүсэх механик энергийг пьезоэлектрик диск ашиглан цахилгаан энерги болгон хувиргах туршилтыг Arduino микроконтроллер болон холбогдох электроник төхөөрөмжүүдийг ашиглан гүйцэтгэлээ. Туршилтын төхөөрөмж нь пьезоэлектрик мэдрэгч, гүүрэн шулуутгагч, шүүлтүүрийн конденсатор, энерги хадгалах зайгаас бүрдэнэ.

Системийн ажиллах дараалал

Туршилтын төхөөрөмжийн холболтын схемийг Зураг 12-т үзүүлэв.



9-р зураг. Пьезоэлектрик алхалтын энерги хэмжих туршилтын төхөөрөмжийн схем

ТУРШИЛТЫН ТӨХӨӨРӨМЖИЙН МАТЕРИАЛЫН ЖАГСААЛТ

4-Р ХҮСНЭГТ.

№	Материал	Тоо	Нэгж үнэ (₮)	Нийт үнэ (₮)
1	Arduino UNO	1	45,000	45,000
2	PZT пьезо диск (35–40 мм)	6	3,000	18,000
3	Breadboard	1	8,000	8,000
4	Bridge rectifier (диод 1N4007 ×4)	1	1,000	1,000
5	Конденсатор (10 µF)	1	1,000	1,000
6	16×2 LCD дэлгэц	1	18,000	18,000
7	Резистор 100к, 10к, 10 к Ом	3	200	600
8	LED гэрэл	3	300	900
9	Холболтын утас	20	200	4,000
10	18650 зай + holder	1	10,000	10,000
11	Хуванцар хавтан	1	8,000	8,000
	Нийт өртөг			**114,500**

Arduino программын код

Пьезоэлектрик мэдрэгчээс ирэх аналог сигналын утгыг Arduino микроконтроллер уншиж, хүчдэл болгон хувирган LCD дэлгэц дээр харуулахын зэрэгцээ алхалтын тоог бүртгэнэ.

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(7,8,9,10,11,12);
int piezoPin = A0;
int stepCount = 0;
int threshold = 50;
void setup()
{
lcd.begin(16,2);
pinMode(piezoPin, INPUT);
}
void loop()
{
int sensorValue = analogRead(piezoPin);
float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);
if(sensorValue > threshold)
{
stepCount++;
delay(300);
}
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("STEP COUNT:");
lcd.print(stepCount);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("V:");
lcd.print(voltage);
lcd.print(" V");
delay(200);
}
```

Дээрх программд analogRead() функц ашиглан пьезо мэдрэгчийн сигналын утгыг уншиж, Arduino-гийн 10-битийн ADC хувиргалтаар хүчдэлийн утгыг тооцоолон гаргасан. Хэрэв мэдрэгчийн сигнал threshold утгаас их байвал нэг алхам бүртгэгдэж stepCount хувьсагч нэмэгдэнэ. Мөн тухайн үеийн хүчдэлийн утгыг хэмжин LCD дэлгэц дээр бодит хугацаанд харуулсан.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар хүний алхалтын үед үүсэх кинетик энергийг пьезоэлектрик технологи ашиглан цахилгаан энерги болгон хувиргах боломжийг судалж, их сургуулийн кампусын орчинд хэрэгжүүлэх техникийн болон эдийн засгийн үндэслэлийг үнэлэв. Судалгааны үр дүнд ШУТИС-ийн 1-р байрны 2-р давхрын коридорын 79.58 м² талбайд 318 ширхэг пьезоэлектрик хавтан суурилуулах боломжтой болохыг тогтоов. Тооцооллын үр дүнгээс харахад уг систем нь өдөрт дунджаар 123.2 Вт·ц, жилд 44.6 Вт·ц цахилгаан энерги үйлдвэрлэх боломжтой байна. Мөн судалгаанд ашигласан хоёр шатлалт хүч өсгөлтийн механизм нь хүний алхалтын үед үүсэх механик хүчийг нэмэгдүүлж, пьезоэлектрик дискэнд үйлчлэх деформацийг өсгөснөөр энерги гаргалтыг нэмэгдүүлэх боломжтойг харуулав. Эдийн засгийн үнэлгээгээр системийн нийт суурилуулалтын өртөг ойролцоогоор 7.36 сая төгрөг байх бөгөөд үйлдвэрлэлийн өртөг буурах болон ногоон хөгжлийн санхүүжилттэй хосолсон нөхцөлд 5–8 жилийн хугацаанд хөрөнгө оруулалтыг нөхөх боломжтой гэж үзэв. Хэдийгээр системийн үйлдвэрлэх цахилгаан эрчим хүчний хэмжээ харьцангуй бага боловч энэхүү технологи нь бага чадлын төхөөрөмжүүдийг бие даан тэжээх боломжтой. Мөн жилд ойролцоогоор 31.2 кг нүүрстөрөгчийн ялгаралтыг бууруулах боломжтой тул ухаалаг кампус болон тогтвортой хөгжлийн шийдлийн хүрээнд хэрэгжүүлэх ач холбогдолтой юм. Судалгааны үр дүнгээс харахад пьезоэлектрик энерги хураах систем нь LED гэрэлтүүлэг, IoT мэдрэгч, мэдээллийн самбар зэрэг бага чадлын төхөөрөмжүүдийг тэжээхэд тохиромжтой юм. Үүнээс гадна, мэдрэгчийн тоог нэмэгдүүлж, тэдгээрийн цуваа-параллель тохиргоог оновчтой болгосноор гаралтын чадлыг мэдэгдэхүйц нэмэгдүүлж, өргөтгөсөн хэрэглээ, үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжтой. Энэхүү судалгаагаар пьезоэлектрик дамжуулагчийг ашигласнаар хүний ул мөр нь сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэр болж чадна гэдгийг тогтоох зорилготой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1]. S. Priya and D. J. Inman, Energy Harvesting Technologies, Hew York, HY, USA: Springer, 2009.

[2]. S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, Energy Scavenging for Wireless Sensor Hetworks, Boston, MA, USA: Springer, 2004.

[3]. H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, “A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials,” *Shock and Vibration Digest*, vol. 36, no. 3, pp. 197–205, 2004.

[4]. S. Priya, “Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers,” *Journal of Electroceramics*, vol. 19, pp. 167–184, 2007.

[5]. Y. Kuang and X. Zhu, “A review of piezoelectric vibration energy harvesting systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 123–135, 2016.

[6]. Pavegen Systems Ltd., “Smart city energy harvesting installations in La Défense,” Technical Report, London, UK, 2020.

[7]. Pavegen Systems Ltd., “Sustainable football pitch powered by footsteps in Rio de Janeiro,” London, UK, Technical Report, 2014.

[8]. Pavegen Systems Ltd., “Energy harvesting floor installation at Heathrow Airport Terminal 3,” London, UK, Project Report, 2012.

[9]. M. Hasegawa and T. Hakamura, “Energy harvesting from pedestrian motion in public transport facilities,” International Journal of Sustainable Energy, vol. 35, no. 6, pp. 527–536, 2016.

[10]. Smart City Sweden, “Energy generating stairs project in Stockholm metro stations,” Stockholm, Sweden, Technical Report, 2017.

[11]. A. Al-Shehhi and M. Al-Kaabi, “Smart walkways for energy harvesting in urban environments,” *Renewable Energy and Smart Cities Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 120–128, 2019.

[12]. Pavegen Systems Ltd., “Kinetic energy harvesting floor installation at Sandton City Mall,” Johannesburg, South Africa, Project Report, 2018.

НАРНЫ ЦАХИЛГААН СИСТЕМИЙН ХАМГИЙН ИХ ЧАДЛЫН ЦЭГИЙГ ДАГАХ ХЯНАЛТЫН АРГУУДЫН ЗАГВАРЧЛАЛ БА ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

Батсүрэнгийн БАТСУВД[1], Кирихбайн НУРБОТА[2] Хаянхярваагийн САРАНГЭРЭЛ[3]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Шинэ Сэргээгдэх Эрчим Хүчний тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: sarangerel@must.edu.mn[3]

Хураангуй - Нарны цахилгаан системийн гаралтын чадал нь нарны цацраг, орчны температур болон ачааллын нөхцөлөөс хамааран тасралтгүй өөрчлөгддөг тул хамгийн их чадлын цэгийг бодит хугацаанд тогтоон барих шаардлагатай байдаг. Энэхүү судалгаанд 10 МВт суурилагдсан хүчин чадалтай нарны цахилгаан системийн MPPT хяналтын хоёр арга болох өөрчлөлт-ажиглалтын болон бүдэг логикт суурилсан аргыг MATLAB/Simulink орчинд ижил нөхцөлд загварчилж, динамик гүйцэтгэлийг харьцуулан үнэлэв. Симуляцын үр дүнгээс бүдэг логикт суурилсан алгоритм нь гаралтын хүчдэлийг ойролцоогоор 0.12 секундэд, харин P&O алгоритм 0.25 секундэд тогтворжуулсан нь тогтоогдов. Мөн бүдэг логикт суурилсан арга нь хамгийн их чадлын цэг орчим дахь хэлбэлзлийг ойролцоогоор 30–35%-иар бууруулсан байна. Иймээс хувьсамтгай орчны нөхцөлд бүдэг логикт суурилсан арга нь динамик гүйцэтгэлийн хувьд илүү давуу болох нь батлагдсан. Харин P&O арга нь бүтэц энгийн, хэрэгжүүлэхэд хялбар давуу талтай хэвээр байна.

Түлхүүр үг: фотоцахилгаан систем; хамгийн их чадлын цэг хянах (MPPT); Fuzzy Logic хяналтын алгоритм; Perturb and Observe (P&O); DC–DC Boost converter; нарны эрчим хүч;

I. УДИРТГАЛ

Сүүлийн жилүүдэд дэлхийн эрчим хүчний хэрэглээ хурдацтай өсөж, уламжлалт эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийн байгаль орчинд үзүүлэх сөрөг нөлөө нэмэгдэж байгаа нь цэвэр, тогтвортой, сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийг хөгжүүлэх шаардлагыг улам бүр нэмэгдүүлж байна. Сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүд дундаас нарны эрчим хүч нь нөхөн сэргээгдэх, байгаль орчинд ээлтэй, ашиглалтын зардал харьцангуй бага зэрэг давуу талтай тул дэлхий даяар эрчимтэй хөгжиж, өргөн хэрэглэгдэж байна [1].

Нарны фотоцахилгаан (Photovoltaic, PV) систем нь нарны цацрагийн энергийг шууд цахилгаан энергид хувиргах технологи бөгөөд орчин үеийн сэргээгдэх эрчим хүчний системүүдэд чухал байр суурь эзэлдэг. Гэвч PV системийн цахилгаан шинж чанар нь шугаман бус бөгөөд нарны цацрагийн эрчим, орчны температур, ачааллын нөхцөл зэрэг хүчин зүйлсээс ихээхэн хамааралтай байдаг. Эдгээр параметрийн өөрчлөлт нь PV системийн гаралтын хүчдэл, гүйдэл, чадлын хэмжээг шууд өөрчилдөг [2].

PV модулийн гаралтын чадал нь тодорхой нөхцөлд хамгийн их утгад хүрдэг бөгөөд үүнийг **хамгийн их чадлын цэг (Maximum Power Point – MPP)** гэж нэрлэдэг. PV системээс хамгийн их чадлыг гарган авахын тулд тухайн ажиллах нөхцөлд MPP-ийг тасралтгүй тодорхойлон хянах шаардлагатай байдаг. Үүнийг хэрэгжүүлэхийн тулд **хамгийн их чадлын цэгийг дагах (Maximum Power Point Tracking – MPPT)** алгоритмуудыг ашигладаг [3].

Орчин үеийн нарны инвертер болон MPPT контроллерууд нь MPPT алгоритмыг өөртөө агуулсан байдаг боловч орчны нөхцөлийн өөрчлөлт, тухайлбал нарны цацрагийн огцом хэлбэлзэл, температурын өөрчлөлт, хэсэгчилсэн сүүдэрлэлт зэрэг нь MPPT алгоритмуудын гүйцэтгэлд нөлөөлдөг. Иймээс MPPT алгоритмуудын ажиллагааг судлах, гүйцэтгэлийг харьцуулан үнэлэх нь PV системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэхэд чухал ач холбогдолтой хэвээр байна [4].

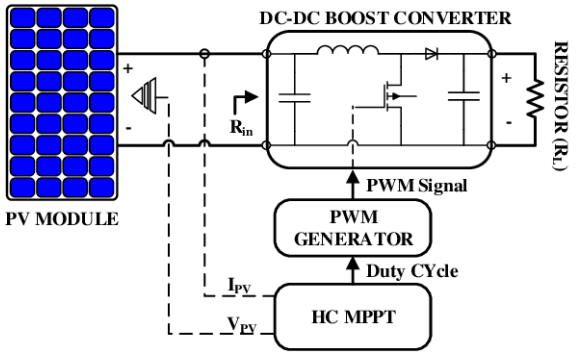
MPPT алгоритмуудын дотроос **Perturb and Observe (P&O)** арга нь бүтэц энгийн, хэрэгжүүлэхэд хялбар тул хамгийн өргөн хэрэглэгддэг аргуудын нэг юм. Энэ арга нь PV модулийн хүчдэлийг бага хэмжээгээр өөрчилж, гаралтын чадлын өөрчлөлтийг ажиглах замаар системийн ажиллах цэгийг MPP рүү ойртуулдаг [5]. Гэвч энэ алгоритм нь тогтворжилтын үед MPP орчимд хэлбэлзэл үүсгэх, орчны нөхцөл огцом өөрчлөгдөх үед алдаа гаргах сул талтай байдаг [6].

Сүүлийн жилүүдэд MPPT системийн гүйцэтгэлийг сайжруулах зорилгоор **ухаалаг хяналтын аргууд** өргөн судлагдаж байна. Тэдгээрийн нэг нь **Fuzzy Logic (FL)** хяналтын арга бөгөөд хүний логик сэтгэхүйд суурилсан, шугаман бус болон тодорхой бус системд үр ашигтай ажиллах чадвартай. Fuzzy Logic MPPT алгоритм нь орчны хурдан өөрчлөлтөд илүү тогтвортой, хурдан хариу үйлдэл үзүүлэх боломжтой гэж судалгаанууд харуулж байна [7–8].

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд нарны фотоцахилгаан системийн MPPT алгоритмуудын ажиллагааг судалж, **Perturb and Observe (P&O)** болон **Fuzzy Logic** аргуудын гүйцэтгэлийг **MATLAB/Simulink орчинд загварчлан харьцуулсан** болно. Судалгаанд системийн **гаралтын чадал, MPP хүрэх хугацаа, тогтворжилт** зэрэг үндсэн үзүүлэлтүүдийг шинжилж, хоёр алгоритмын гүйцэтгэлийн ялгааг тодорхойлсон. Энэхүү судалгааны үр дүн нь PV системийн MPPT алгоритмыг оновчтой сонгох, системийн эрчим хүчний ашиглалтыг нэмэгдүүлэхэд чиглэсэн техникийн үндэслэл боловсруулахад хувь нэмэр оруулах зорилготой юм [9–10].

II. ОНОЛЫН ХЭСЭГ

Нарны фотоцахилгаан (PV) системийн гаралтын чадал нь нарны цацрагийн эрчим болон орчны температурын өөрчлөлтөөс ихээхэн хамааралтай байдаг. Иймээс PV системийн гаралтын хүчдэл, гүйдэл, чадлын хэмжээ байнга хэлбэлзэж, системийн ажиллах цэг өөрчлөгдөж байдаг. Энэ нөхцөлд PV системээс хамгийн их чадлыг гарган авахын тулд хамгийн их чадлын цэгийг тасралтгүй тодорхойлон хянах шаардлагатай. PV системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх зорилгоор хамгийн их чадлын цэгийг дагах удирдлагын аргуудыг өргөн ашигладаг. MPPT алгоритм нь PV модулийн хүчдэл, гүйдлийг хэмжиж, DC–DC хувиргагчийн ажлын циклийг тохируулах замаар системийн ажиллах цэгийг MPP орчимд байлгах үүрэгтэй. MPPT ашигласан PV системийн ерөнхий бүтэц нь PV модуль, DC–DC хувиргагч, MPPT контроллер болон ачаалал гэсэн үндсэн хэсгүүдээс бүрддэг. Хамгийн их чадал дагагчтай PV системийн ерөнхий бүдүүвч схемийг Зураг 1-д үзүүлэв.

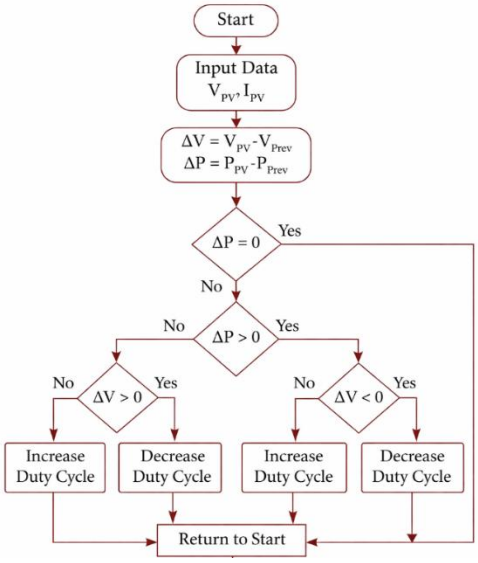


1-р зураг. Хамгийн их чадал дагагчийг ашигласан нарны цахилгаан системийн ерөнхий бүдүүвч схем

Олон төрлийн MPPT (Maximum Power Point Tracking) удирдлагын аргуудыг хэрэглэдэг бөгөөд эдгээр нь зарим давуу болон сул талуудтай. MPPT алгоритм нь PV модулийн гаралтын хүчдэл болон гүйдлийг хэмжиж, системийн ажиллах цэгийг хамгийн их чадал үүсэх цэгт ойр байлгах зорилготой.

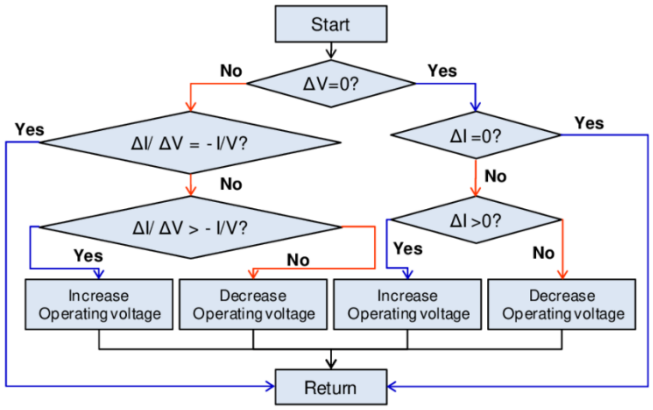
Perturb and Observe (P&O) буюу өөрчлөлт-ажиглалтын арга нь алгоритм нь хамгийн энгийн бөгөөд практикт өргөн хэрэглэгддэг MPPT аргуудын нэг юм. Энэ алгоритм нь PV системийн хүчдэл болон чадлын өөрчлөлтийг ажиглан системийн ажиллах цэгийг хамгийн их чадлын цэг (MPP) рүү ойртуулдаг.

P&O алгоритмын гол давуу тал нь хэрэгжүүлэхэд хялбар, тооцооллын шаардлага бага тул бодит төхөөрөмжүүдэд өргөн ашиглагддаг. Харин хамгийн их чадлын цэг орчимд байнгын өдөөлтөөс шалтгаалсан хэлбэлзэл үүсгэх, огцом өөрчлөгдөх орчны нөхцөлд алдаа гаргах сул талтай. Тиймээс өөрчлөлт ажиглалтын алгоритм нь нарны эрчим хүчний системийн хяналтын системд өргөн хэрэглэгддэг хэдий ч илүү нарийвчилсан хяналт шаардлагатай тохиолдолд өөр дэвшилтэт аргуудтай хослуулах буюу сайжруулсан хувилбаруудыг хэрэглэх шаардлага гардаг.



2-р зураг. Perturb and Observe (P&O) алгоритм

Incremental Conductance (INC) буюу дамжууламжийг нэмэгдүүлэх арга нь нарны PV системийн хамгийн их чадлын цэгийг тодорхойлоход чадал–хүчдэлийн хамаарлын уламжлал дээр үндэслэн ажилладаг алгоритм юм. Энэхүү арга нь онолын хувьд өндөр нарийвчлалтай бөгөөд цаг агаарын болон ачааллын нөхцөл хурдан өөрчлөгдөх үед ч MPP-г илүү зөв тодорхойлох боломжтой байдаг.



3-р зураг. Incremental Conductance (INC) алгоритм

INC MPPT алгоритм нь PV системийн чадлын илэрхийлэл болох $P = V \times I$ томьёонд үндэслэн чадлын хүчдэлд хамаарах уламжлалыг дараах байдлаар илэрхийлдэг.

$$\frac{dP}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \qquad (1)$$

Хамгийн их чадлын цэг (MPP) дээр чадлын хүчдэлийн уламжлал тэгтэй тэнцүү байдаг тул дараах нөхцөл үүснэ.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \qquad (2)$$

INC алгоритм нь энэхүү харьцааг ашиглан PV системийн ажиллах цэг MPP-д хүрсэн эсэхийг тодорхойлдог.

Хэрэв $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ бол систем MPP цэгийн зүүн талд байрлаж байна гэж үзэж ажиллах хүчдэлийг нэмэгдүүлдэг.

Харин $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$тохиолдолд систем MPP цэгийн баруун талд байрлаж байгаа тул ажиллах хүчдэлийг бууруулна.

Харин $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$нөхцөлд систем MPP дээр хүрсэн гэж үзэж хүчдэлийг тогтвортой байлгана.

Incremental Conductance (INC) арга нь өөрчлөлт–ажиглалтын (P&O) аргатай харьцуулахад хэлбэлзэл багатай, динамик нөхцөлд илүү тогтвортой, мөн нарны цацрагийн огцом өөрчлөлтөд хурдан хариу үзүүлэх давуу талтай. Иймээс өндөр нарийвчлал шаардсан MPPT удирдлагын системүүдэд илүү тохиромжтой бөгөөд онолын хувьд илүү үр ашигтай ажиллагаа үзүүлдэг. Гэсэн хэдий ч, энэхүү алгоритм нь гүйдэл ба хүчдэлийн өөрчлөлтийг тасралтгүй тооцоолох шаардлагатай тул тооцооллын ачаалал ихтэй, хэрэгжүүлэлт харьцангуй төвөгтэй, мөн хэмжилтийн нарийвчлал болон ADC-ийн чанарт өндөр шаардлага тавьдаг. Үүний улмаас бодит системд хэрэгжүүлэхэд илүү өндөр өртөг, илүү их тооцооллын нөөц шаарддаг сул талтай. Иймээс энэхүү судалгаанд INC аргыг онолын хувьд давуу талтай боловч хэрэгжүүлэлтийн төвөгшил өндөртэй гэж үзэн, харьцуулалтын үндсэн объект болгон сонгоогүй болно.

Fuzzy Logic (FL) буюу бүдэг логикт суурилсан арга нь нарны фотоцахилгаан (PV) системийн хамгийн их чадлын цэгийг дагах (MPPT) удирдлагад өргөн хэрэглэгддэг ухаалаг хяналтын аргуудын нэг юм. Энэхүү арга нь шугаман бус болон тодорхой бус нөхцөлд хүний логик шийдвэр гаргалтыг дуурайлган ажилладгаараа онцлогтой. Тухайлбал, оролтын хувьсагчдын өөрчлөлтийг хэл шинжлэлийн дүрэм болон гишүүнчлэлийн функцүүдийн тусламжтайгаар үнэлж, улмаар duty cycle-ийн өөрчлөлтийг тодорхойлдог.

Иймээс бүдэг логик алгоритм нь нарны цацраг, температур болон бусад орчны нөхцөл огцом өөрчлөгдөх үед ч системд хурдан, тогтвортой, уян хатан хариу үзүүлэх боломжийг бүрдүүлдэг. Мөн хүчдэл болон гүйдлийн өөрчлөлтийг бодит хугацаанд үнэлэн тохируулга хийдэг тул PV системийг хамгийн их чадлын цэг орчимд үр ашигтай ажиллуулах боломжтой.

Бүдэг логик алгоритмын гол давуу тал нь тодорхой бус буюу “бүдэг” мэдээллийг боловсруулах чадвар бөгөөд энэ нь орчны хэлбэлзэл, тодорхойгүй байдал, параметрийн өөрчлөлттэй нөхцөлд ч системийн гүйцэтгэлийг хадгалах давуу талыг олгодог. Ийм шинж чанарын ачаар энэхүү арга нь Өөрчлөлтийг ажиглах (Perturb and Observe, P&O) болон Дамжууламжийг нэмэгдүүлэх (Incremental Conductance, IncCond) зэрэг уламжлалт MPPT аргуудтай харьцуулахад зарим нөхцөлд илүү өндөр үр ашиг, бага хэлбэлзэл, түргэн тогтворжилт үзүүлэх боломжтой.

Fuzzy Logic MPPT системийн математик болон логик загварчлал нь дараах үндсэн дөрвөн үе шатаас бүрдэнэ.

Fuzzifier (Фаззижуулалт) Оролтын тоон утгуудыг хэл шинжлэлийн хувьсагч болгон хувиргах процесс юм. Энэ шатанд PV системийн чадлын өөрчлөлт (ΔP_{pv}) болон хүчдэлийн өөрчлөлт (ΔV_{pv}) зэрэг параметрүүдийг fuzzy хувьсагчид болгон хувиргана.

Rules (Дүрмийн сан) Фаззи логик системийн үндсэн шийдвэр гаргах механизм бөгөөд оролт болон гаралтын хувьсагчдын хоорондын хамаарлыг тодорхойлдог.

Inference (Дүгнэлт гаргах) Оролтын өгөгдөлд үндэслэн дүрмийн санг ашиглан системийн хариу үйлдлийг тодорхойлно.

Defuzzifier (Дефаззижуулалт) Фаззи гаралтын утгыг бодит тоон утга болгон хувиргаж, системийн хяналтын дохиог үүсгэнэ.

Fuzzy Logic контроллерт ашиглагддаг хэл шинжлэлийн хувьсагчид нь дараах ангилалтай байдаг.

NB (Negative Big) – их сөрөг

NS (Negative Small) – бага сөрөг

ZE (Zero) – тэг

PS (Positive Small) – бага эерэг

PB (Positive Big) – их эерэг

Эдгээр дүрмүүд нь PV системийн чадлын өөрчлөлт болон хүчдэлийн өөрчлөлтөд үндэслэн системийн ажиллах цэгийг хамгийн их чадлын цэг рүү чиглүүлэхэд ашиглагддаг. Үүний үр дүнд Fuzzy Logic MPPT алгоритм нь орчны өөрчлөлтөд хурдан хариу үйлдэл үзүүлж, PV системийн эрчим хүчний гарцыг нэмэгдүүлэх боломжийг олгодог.

БҮДЭГ ЛОГИКИЙН ДҮРМИЙН ХҮСНЭГТ

49 ДҮРЭМ БҮХИЙ ДҮРМИЙН САН

1-Р ХҮСНЭГТ.

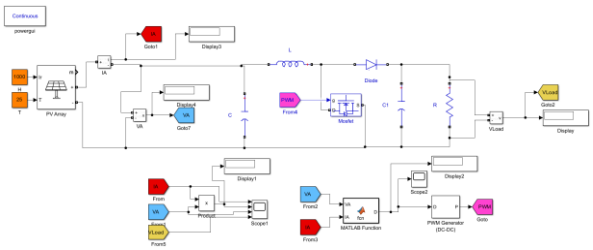
	ΔP_{pv}						
Vpv	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PL	PL	NM	Z	Z
NM	PL	PL	PL	PM	PS	Z	Z
NS	PL	PM	PS	PS	PS	Z	Z
Z	PL	PM	PS	Z	NS	NM	NL
PS	Z	Z	NM	NS	NS	NM	NL
PM	Z	Z	NS	NM	NL	NL	NL
PL	Z	Z	NM	NL	NL	NL	NL

Хүснэгт 1-д үзүүлсэн дүрмийн сан нь ΔP ба ΔV оролтын хослол бүрд duty cycle-ийн өөрчлөлтийг хэрхэн сонгохыг илэрхийлнэ.

III. ЗАГВАРЧЛАЛ БА СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

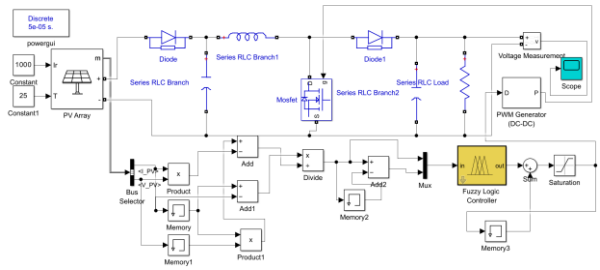
Энэхүү судалгаанд MATLAB/Simulink орчинд хийгдсэн загварчлал нь PV системийн дэд массив (array-level) эквивалент загварт тулгуурласан бөгөөд нийт 10 МВт станцын шууд динамик загвар биш болно. Харин PVSyst орчинд 10 МВт станцын системийн түвшний үйлдвэрлэлийн тооцоог тусад нь гүйцэтгэсэн. Стандарт туршилтын нөхцөлийг 1000

Вт/м² нарны цацраг, 25°C орчны температур гэж авч, симуляцын алхмыг 5×10^{-5} секунд болгон сонгосон. Харьцуулалтын шалгуур үзүүлэлтэд хариу үйлдлийн хурд, тогтворжилтын хугацаа, гаралтын хэлбэлзэл, удирдлагын шинжийг багтаав. Зураг 4-д үзүүлсэн Simulink загвар нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн хүчдэл ба гүйдлийг хэмжин, чадлыг тооцоолсны үндсэн дээр өөрчлөлтийг ажиглах алгоритмаар хамгийн их чадлын цэгийг (MPPT) тодорхойлж, DC-DC өсгөх хувиргуурыг PWM дохиогоор удирдан, ачаалалд хамгийн өндөр үр ашигтайгаар цахилгаан дамжуулж буй систем юм.



4-р зураг. Perturb and Observe алгоритм ашигласан нарны цахилгаан системийн загварчлал

Зураг 5-д бүдэг логикт суурилсан хяналтын схемийг үзүүлэв. Энэхүү загварт фотоцахилгаан массивын хүчдэл, гүйдлийг хэмжин чадлыг тооцоолж, ΔP ба ΔV оролтоор бүдэг логик хянагч duty cycle-ийн засварыг гарган өсгөх хувиргуурыг импульс өргөний модуляцын дохиогоор удирдаж байна. Ийм бүтэц нь хамгийн их чадлын цэг орчимд ажиллагааны цэгийг тогтвортой хадгалах зорилготой.



5-р зураг. Fuzzy Logic (FL) алгоритм ашигласан нарны цахилгаан системийн загварчлал

Загвар дахь үндсэн блокуудын үүргийг дараах байдлаар тодорхойлов. Фотоцахилгаан массив нь орчны нөхцөлөөс хамааран хувьсах хүчдэл, гүйдэл үүсгэнэ. Хэмжилтийн хэсэг эдгээрийг авч чадлыг бодно. Хяналтын блок нь өмнөх агшны хэмжилттэй харьцуулан өөрчлөлтийг тооцож, duty cycle-ийг шинэчилнэ. Импульс өргөний модуляц үүсгэгч болон өсгөх хувиргуур нь уг хяналтын дохиог ашиглан ачааллын талын хүчдэлийг зохицуулна. Scope блок нь хүчдэл, гүйдэл, чадлын өөрчлөлтийг хугацааны функцээр харах боломж олгож, алгоритмын гүйцэтгэлийг үнэлэх үндсэн хэрэгсэл болсон.

Нэмэлтээр PVSyst орчинд 10 МВт-ын нарны цахилгаан станцын жилийн үйлдвэрлэлийн тооцоог хийж, судалгаанд авч үзсэн хяналтын аргуудыг станцын хэрэглээний түвшинд тайлбарлах суурь өгөгдөл болгон ашиглав. Гэвч энэхүү өгүүллийн үндсэн дүн шинжилгээ нь MPPT алгоритмын динамик хариу үйлдлийн харьцуулалтад тулгуурласан. Хамгийн их чадлыг дагах алгоритмын динамик гүйцэтгэлийг үнэлэх зорилгоор 0–0.5 секундийн хугацаанд transient симуляц хийсэн бөгөөд энэ хугацаа нь алгоритмын хариу үйлдлийн хурд, тогтворжилт, хэлбэлзлийг үнэлэхэд хангалттай гэж үзсэн.

PV Array Characteristics

PV module		**Inverter**	
Manufacturer	Generic	Manufacturer	Generic
Model	SR-M660310	Model	Aotai_ASP-630KTL
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	310 Wp	Unit Nom. Power	630 kWac
Number of PV modules	33792 units	Number of inverters	16 units
Nominal (STC)	10.48 MWp	Total power	10080 kWac
Modules	1536 string x 22 In series	Operating voltage	500-850 V
At operating cond. (50°C)		Pnom ratio (DC:AC)	1.04
Pmpp	9297 kWp		
U mpp	623 V		
I mpp	14930 A		
Total PV power		**Total inverter power**	
Nominal (STC)	10476 kWp	Total power	10080 kWac
Total	33792 modules	Number of inverters	16 units
Module area	54976 m²	Pnom ratio	1.04
Cell area	48125 m²		

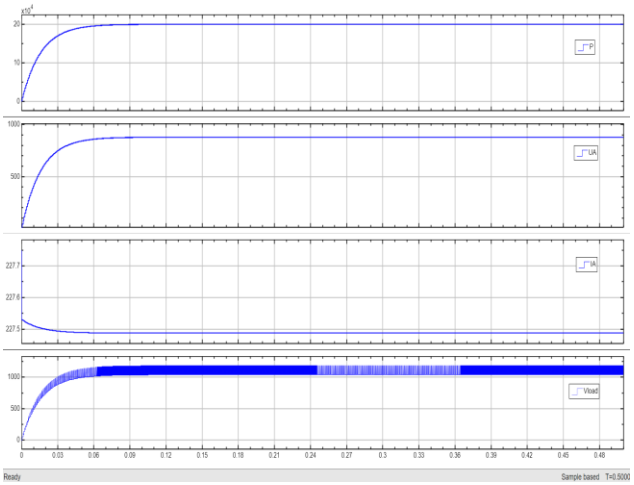
6-р зураг. Судалгаанд ашигласан НЦС-ын өгөгдөл

PVSyst симуляцын үр дүнгээр тус станцын жилийн эрчим хүчний үйлдвэрлэл ойролцоогоор 17000 MWh/жил гэж тооцоологдсон. Энэхүү үр дүн нь системийн бодит хэрэглээний түвшний гүйцэтгэлийг илэрхийлнэ.

IV. ҮР ДҮН БА ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Нарны цахилгаан системийн тогтмол гаралтын хүчдэл нь DC-DC өсгөх хувиргууруар зохицуулагдсан бөгөөд үүнд duty cycle-ийг бүдэг логикт хамгийн чадлыг дагах хяналтын системийн тусламжтайгаар бодит цагийн хүчдэл, гүйдлийн хэмжилт дээр үндэслэн динамик байдлаар тохируулдаг.

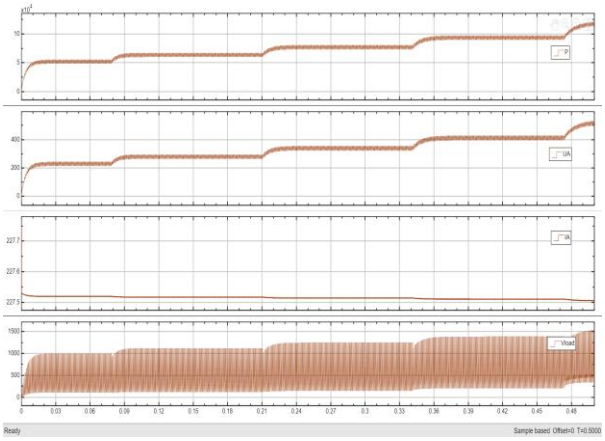
Зураг 7-д бүдэг логикт суурилсан хяналтын үед оролт, гаралтын хүчдэл ба гүйдлийн хугацааны хамаарлыг үзүүлсэн. Симуляцын үр дүнгээс гаралтын хүчдэл богино хугацаанд өсөж, тогтворжих хандлагатай байна. Бүдэг логикт суурилсан MPPT алгоритм нь гаралтын хүчдэлийг ойролцоогоор 0.12 секундийн дотор тогтворжуулсан бол өөрчлөлтийг ажиглах алгоритм нь 0.25 секундийн дараа тогтворжиж байна. Үүнээс үзэхэд бүдэг логикт суурилсан арга нь шилжилтийн үеийн хариу үйлдэл хурдан, хамгийн их чадлын цэг орчимд тогтвортой ажиллах боломжтой байна.



7-р зураг. Бүдэг логик алгоритмын үед гаралтын хүчдэл болон гүйдлийн утга болон хугацааны хамаарал (0-0.5 s)

Бүдэг логикт суурилсан аргын үед үндсэн параметрүүд богино хугацаанд тогтворжиж, гаралтын хүчдэлийн хэлбэлзэл харьцангуй бага ажиглагдсан.
Мөн энэхүү арга нь чадлын хэлбэлзлийг ойролцоогоор 30–35%-иар бууруулсан нь ажиглагдсан. Энэ нь импульс өргөний модуляцын дохиог орчны өөрчлөлтөд уян хатан тохируулж чадсантай холбоотой гэж үзэж болно. Гэсэн хэдий ч дүрмийн сангийн тохируулга хангалтгүй тохиолдолд шилжилтийн үеийн түр хэлбэлзэл үүсэх боломжтой.

Зураг 8-д өөрчлөлт ажиглалтын аргын динамик хариу үйлдлийг харуулав. Тус аргын үед гаралтын хүчдэл болон чадал шаталсан байдлаар өсөж, хамгийн их чадлын цэг орчимд үлдэц хэлбэлзэл хадгалагдаж байгаа нь ажиглагдсан.



8-р зураг. Өөрчлөлт ажиглалтын аргын гаралтын хүчдэл болон гүйдэл чадлын утгын хугацааны динамик хамаарал

Өөрчлөлт-ажиглалтын арга нь хэрэгжилтийн хувьд энгийн боловч байнгын өдөөлтөөс шалтгаалан duty cycle тасралтгүй шинэчлэгдэж, ачааллын хүчдэлд жижиг савлалт үүсгэж байна. Энэ шинж нь тогтмол бус орчны нөхцөлд энергийн алдагдлыг өсгөх эрсдэлтэй. Харин гүйдлийн хэлбэлзэл нь зарим мужид харьцангуй жигд байж болохыг графикаас харж болно.

Зураг 9 болон Хүснэгт 2-т хоёр аргын үндсэн үзүүлэлтүүдийг нэгтгэн харьцуулаа. Харьцуулалтаас үзэхэд бүдэг логикт суурилсан арга нь хариу үйлдлийн хурд болон тогтворжилтын чанарын хувьд давуу байсан бол өөрчлөлт-ажиглалтын арга нь бүтэц энгийн, хэрэгжүүлэхэд хялбар хэвээр байна. Иймээс алгоритм сонгохдоо зөвхөн үр ашгийг бус хэрэгжүүлэлтийн төвөгшил, тооцооллын нөөц, хэрэглээний орчныг хамтад нь авч үзэх шаардлагатай.

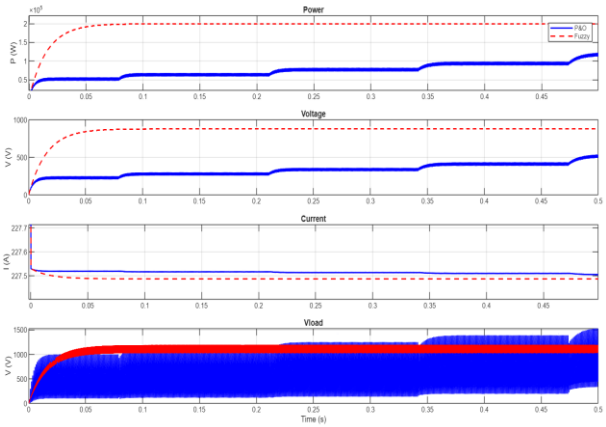
БҮДЭГ ЛОГИК БА ӨӨРЧЛӨЛТ-АЖИГЛАЛТЫН АРГУУДЫН ХАРЬЦУУЛСАН ҮЗҮҮЛЭЛТ

ҮНДСЭН ҮЗҮҮЛЭЛТИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

2-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Бүдэг логикт суурилсан арга	Өөрчлөлт-ажиглалтын арга
Тогтворжилтын хугацаа	0.12 s	0.25 s
Тогтворжсоны дараах хэлбэлзэл	Харьцангуй бага	MPP орчимд үлдэц хэлбэлзэл ажиглагдсан
Хариу үйлдлийн шинж	Орчны өөрчлөлтөд уян хатан	Алхамт өөрчлөлтөөр хийдэг
Хэрэгжүүлэлтийн арга барил	Дүрмийн сан, тохируулга шаарддаг	Бүтэц энгийн, хэрэгжүүлэхэд хялбар

Хүснэгт 2-оос харахад бүдэг логикт суурилсан арга нь хурдан хариу үйлдэл, бага үлдэц хэлбэлзэл шаардсан нөхцөлд илүү тохиромжтой. Харин өөрчлөлт-ажиглалтын арга нь бүтэц, хэрэгжилтийн хувьд хялбар, тооцооллын нөөц багатай системд ашиглах боломжтой гэж үзэж болно.



9-р зураг. P&O болон Fuzzy MPPT аргуудын чадал, хүчдэл, гүйдлийн динамик харьцуулалт

Иймээс энэхүү судалгаанд авч үзсэн симуляцын нөхцөлд бүдэг логикт суурилсан арга нь өндөр хүчин чадалтай нарны цахилгаан системийн динамик горимд илүү тогтвортой ажиллах боломжтой гэсэн дүгнэлтэд хүрэв. Гэхдээ уг дүгнэлтийг бодит төхөөрөмжийн туршилтаар баталгаажуулах шаардлагатай.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар 10 МВт суурилагдсан хүчин чадалтай нарны цахилгаан системд хамгийн их чадлын цэгийг дагах (MPPT) хоёр төрлийн хяналтын аргыг MATLAB/Simulink орчинд загварчилж, гүйцэтгэлийг нь харьцуулан үнэлэв. Энэхүү судалгааны үр дүнгээс харахад бүдэг логикт суурилсан MPPT алгоритм нь хувьсамтгай орчны нөхцөлд илүү хурдан хариу үзүүлж, тогтворжилтын хугацааг багасгах боломжтойг харуулж байна. Харин P&O алгоритм нь бүтэц энгийн, бодит хэрэгжилтэд хялбар боловч MPP орчимд үлдэц хэлбэлзэл үүсгэх сул талтай байна. Симуляцын үр дүнгээс харахад бүдэг логик MPPT алгоритм нь гаралтын хүчдэлийг ойролцоогоор 0.12 секундийн дотор тогтворжуулж, харин өөрчлөлтийг ажиглах алгоритм 0.25 секундийн дараа тогтворжиж байна. Мөн бүдэг

логикт суурилсан арга нь хамгийн их чадлын цэг орчимд үүсэх чадлын хэлбэлзлийг ойролцоогоор 35%-иар бууруулж, илүү тогтвортой ажиллагааг хангаж байна. Судалгаанд MPPT алгоритмын динамик гүйцэтгэлийг PV системийн дэд массив (array-level) загварт үнэлсэн бөгөөд PVSyst орчинд 10 МВт станцын жилийн үйлдвэрлэлийн тооцоог тусад нь хийж, судалгааны үр дүнг системийн түвшинд тайлбарлах боломж бүрдүүлсэн. Иймээс ухаалаг удирдлагад суурилсан MPPT алгоритмууд нь өндөр хүчин чадалтай фотоцахилгаан системийн динамик ажиллагааг сайжруулах, эрчим хүчний гарцыг нэмэгдүүлэх чухал боломжтой гэж дүгнэв. Гэсэн хэдий ч энэхүү судалгаа нь зөвхөн симуляцын орчинд хийгдсэн тул бодит системийн алдагдал, мэдрэгчийн алдаа, хувиргуурын үр ашиг, хэсэгчилсэн сүүдэрлэлт зэрэг хүчин зүйлсийг бүрэн тусгаагүй байна. Иймд цаашид бодит туршилтын нөхцөлд алгоритмын гүйцэтгэлийг баталгаажуулах, олон нөхцөлд турших судалгааг өргөжүүлэх шаардлагатай.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1]. B. Parida, S. Iniyan, and R. Goic, “A review of solar photovoltaic technologies,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 3, pp. 1625-1636, 2011.

[2]. G. K. Singh, “Solar power generation by PV technology: A review,” Energy, vol. 53, pp. 1-13, 2013.

[3]. H. Bounechba, A. Bouzid, M. Snani, and A. Lashab, “Comparison of Perturb and Observe and Fuzzy Logic in maximum power point tracker for PV systems,” Energy Procedia, vol. 50, pp. 677-684, 2014.

[4]. T. Esram and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.

[5]. D. P. Hohm and M. E. Ropp, “Comparative study of maximum power point tracking algorithms,” Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 11, no. 1, pp. 47-62, 2003.

[6]. Z. Ali et al., “A generalized photovoltaic system with MPPT and grid synchronization under MATLAB/Simulink environment,” Energies, vol. 16, no. 9, art. 3638, 2023.

[7]. N. Zhani, “Comparison of the performance of MPPT control techniques based on conventional and intelligent methods,” IFAC-PapersOnLine, 2024.

[8]. R. Alik and A. Jusoh, “A review on Perturb and Observe maximum power point tracking in photovoltaic system,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015.

[9]. A. Safari and S. Mekhilef, “Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1154-1161, 2011.

[10]. E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, “Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, no. 2, pp. 486-494, 2006.

[11]. C. Hua, J. Lin, and C. Shen, “Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 1, pp. 99-107, 1998.

[12]. S. Babu and K. Balasubramanian, “Fuzzy logic based maximum power point tracking for photovoltaic system,” Renewable Energy, 2012.С. Батмөнх, Ба. Бат-Эрдэнэ ба Н.И. Воропай, “Монголын эрчим хүчний салбарын хөгжил: I. Тойм, бодлого, шинжилгээ, загварчлалын асуудал,” Эрчим хүч&Engineering. Улаанбаатар, № 197, 2020 оны 7-р сар.

SARIMA АРГА АШИГЛАН ЦАХИЛГААН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ АЧААЛАЛД ТААМАГЛАЛ ХИЙХ

Даваажаргалын ОТГОНДАРЬ[1], Үржинхандын САНЧИРМАА[2], Мягмаржавын ЦОЛМОН[3]
Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим Хүчний Инженерчлэлийн Сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим
Монгол улс, Улаанбаатар
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: dawaajargalotgondari@gmail.com[1], urjinhandsancirmaa@gmail.com[2], tsolmon@must.edu.mn[3]

Хураангуй: **Монгол улсын эрчим хүчний системийн тогтвортой байдал нь үндэсний аюулгүй байдал болон эдийн засгийн бие даасан байдлын гол тулгуур юм. Гэвч манай орны эрс тэс уур амьсгал нь эрчим хүчний хэрэглээнд улирлын чанартай (Seasonal) асар их хэлбэлзэл үүсгэдэг бөгөөд өвлийн оргил ачааллын үеэр хэрэглээ зуны саруудтай харьцуулахад 2-3 дахин нэмэгддэг. 2023 оны байдлаар нийт хэрэглээний 22.3% хувийг ОХУ-аас импортолж байгаа нь ачааллыг оновчтой таамаглах онол практикийн чухал шаардлагыг бий болгож байна. Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) аргыг ашиглан улирлын шинж чанартай цахилгаан эрчим хүчний ачааллыг таамаглах математик загварыг боловсруулахад оршино. Судалгааны арга зүйн хүрээнд Matlab программ дээр EconometricModeler симуляцынсимуляцын алгоритмыг ашиглаж, хэрэглээний өсөлтийн тренд болон санамсаргүй хүчин зүйлсийг тооцсон. Загварчлалд 2023 оны бодит өгөгдлийг ашиглан 7 хоногийн давтамжтайгаар таамаглал дэвшүүлж, хөдөлгөөнт дундаж (Moving Average) аргаар өгөгдлийн алдааг засан таамаглалын нарийвчлалыг дээшлүүлсэн. Туршилтын үр дүнд SARIMA загвараар гаргаж авсан таамаглалыг 2024 оны эхний 7 сарын бодит ачаалалтай харьцуулан шинжлэхэд нарийвчлалтай болох нь батлагдсан. Уг судалгааны ажил нь эрчим хүчний системийн ачааллын хэлбэлзлийг урьдчилан тодорхойлж, импортын хамаарлыг бууруулах, системийн найдвартай ажиллагааг хангах төлөвлөлтөд ашиглах боломжтойг SARIMA аргаар судална.**

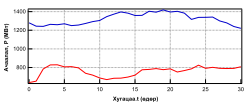
Түлхүүр үг: Цахилгаан ачаалал, SARIMA загвар, Улирлын хэлбэлзэл, Matlab симуляц, Эрчим хүчний таамаглал

I. УДИРТГАЛ

Монгол улсын эрчим хүчний системийн тогтвортой байдал нь үндэсний аюулгүй байдал болон эдийн засгийн бие даасан байдлын гол тулгуур юм. Эрчим хүчний системийн хувьд тогтворгүй байдал үүсгэдэг хэд хэдэн шалтгаан байдагт[6]:

Монгол орны эрс тэс уур амьсгал нь эрчим хүчний хэрэглээнд улирлын чанартай (Seasonal) асар их хэлбэлзэл үүсгэдэг. Ялангуяа өвлийн хүйтний улиралд дулаан болон цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээ огцом нэмэгддэг нь системийн ачаалалд шууд нөлөөлдөг байна[7].

Өвлийн оргил ачааллын үеэр (12, 1-р сар) хэрэглээ зуны саруудтай харьцуулахад 1-2 дахин нэмэгддэг нь системийг бүхэлд нь эрсдэлд оруулдаг. 2023 оны статистик үзүүлэлтээс харахад уг жилийн 365 өдөр бүрийн мэдээллээс хамгийн өдөр ачаалалтай 7-н өдөр буюу 12-р сарын 18с 25-ны дундаж ачаалал 1200-1600 МВт хүрч байгааг сонгож авсан. Мөн жилийн хамгийн бага ачаалалтай 7-н өдөр болох 7-н сарын 10-с 17-ны дундаж ачаалал 600-800 МВт орчимд хэлбэлзэж байгааг онцолж аван харьцуулалт хийсэн үр дүнг 1-р Зураг-д харуулав.



1-р зураг. 12 болон 7 сарын ачааллын харьцуулсан байдал

Дотоодын дулааны цахилгаан станцууд (ДЦС) үндсэн ачааллыг дааж байгаа боловч өсөн нэмэгдэж буй хэрэглээг бүрэн нөхөж чадахгүй байна. 2023 оны байдлаар Монгол улс эрчим хүчний дутагдлаа ОХУ-аас импортоор авч нөхөж байна. 2023 онд ОХУ-аас 938 сая кВт.ц, 2023 оны байдлаар 11 тэрбум кВт.ц байсан. Үүний 77.7 хувийг дотоодын үйлдвэрлэлээр, 22.3 хувийг импортоор худалдаж авсан байна [1].

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Эрчим хүчний тогтвортой байдлыг тодорхойлохдоо SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) аргын улирлын шинж чанартай цаг хугацааны давтамжтай өгөгдлийг таамаглах математик загварыг ашиглав. Таамаглалыг хийхдээ MATLAB программ дээр EconometricModeler симуляцын алгоритм боловсруулав [2].

1. SARIMA аргын загварчилгаа

SARIMA нь Non-Seasonal (Улирлын бус) ба Seasonal (Улирлын) хоёр үндсэн хэсгээс бүрдэнэ. AR хэсэг нь цахилгаан ачааллын өмнөх үеийн зүй тогтлыг, I хэсэг нь хэрэглээний ерөнхий өсөлт буюу трендийг тогтворжуулахыг, харин MA хэсэг нь санамсаргүй хүчин зүйлээс үүдэлтэй богино хугацааны өөрчлөлтүүдийг тооцоолоход чиглэгдэнэ[5]. Уг загварыг ашиглахдаа улирлын бус болон улирлын хэсгүүдийн үржвэрээр тодорхойлогддог. Үүнийг математик оператор ашиглан дараах байдлаар илэрхийлнэ:

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^s)\nabla^d\nabla_s^D y_t = \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)\epsilon_t \qquad (1)$$

Үүнд: $y_t = t$ хугацаан дахь цахилгаан ачааллын утга (MB), B: Хоцролтын оператор (Backshift operator), $\nabla \hat{} d$: Улирлын бус ялгаварлал, $\nabla_s \hat{} D$: Улирлын ялгаварлал, ϵ_t: Цагаан шуугиан (White noise) буюу санамсаргүй алдаа.

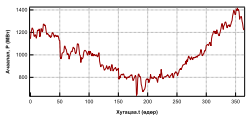
2. MATLAB дээрх загварчлал

MATLAB дээр EconometricModeler программыг суулгаж Mathlab workspace – ээс өгөгдөл утгуудыг оруулан өгч зарим утга нь мэдэгдэхгүй байгаа үеийг шүүн гаргаж Moving average (хөдөлгөөнт дундаж) аргаар засан харуулна. Өөр дээрээ байгаа SARIMA санг ашиглан таамагласан утгуудыг график байдлаар үүсгэнэ [3].

III. ТУРШИЛТ, ҮР ДҮНГИЙН ШИНЖИЛГЭЭ

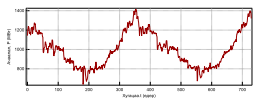
Эрчим хүчний хэрэглээний ачааллын таамаглал хийхдээ MATLAB -ын EconometricModeler программ дээр бодит утган дээр үндэслэн гүйцэтгэлээ. Туршилтын үндсэн зорилго нь уламжлалт таамаглал хийдэг SARIMA аргаар ирээдүйн эрчим хүчний таамаглал хийхэд оршино.

Харьцуулалт хийхийн өмнө 2023 оны цахилгаан ачааллыг боловсруулан гаргасныг 2-р Зураг-д харуулав. Энэхүү бодит датанд тулгуурлан 2024 оны эхний 7-н сарын таамаглалыг хийж гүйцэтгэн 4-р Зураг-д харуулав.



2-р зураг. 2023 оны цахилгаан ачаалал /хоногоор/

Таамаглалыг хийхдээ улирлын чанартай (seasonal) таамаглаж байгаа учраас таамаглах хугацааг 7 хоногоор тааруулж өгөн таамаглалын нарийвчлалыг илүү өндөр гаргаж авсан үр дүнг 3-р Зураг-д харуулав [4]. 2023 оны 365-н өдрийн ачааллын бодит утгыг 2024 оны таамагласан ачаалалтай нийтэд нь 730-н өдрийн график гаргав.



3-р зураг. SARIMA таамаглалын харагдац /улаанаар/

Мөн түүнчлэн таамаглалын үр дүнгээр гаргаж авсан утгаа 2024 оны эхний 7 сарын утгатай харьцуулан 4-р Зураг-д үзүүлэв.

2024 оны бодит утга болон таамагласан утга дээр

Регрессийн шинжилгээ (Regression Analysis) аргаар үнэлэв.

Огтлолцол:

$$y = mx + b \tag{2}$$

Детерминацийн коэффициент:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(yi - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \tag{3}$$

Корреляцийн коэффициент:

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})^2}} \tag{4}$$

Налуу коэффициент:

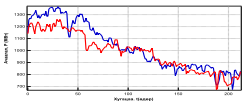
$$m = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \tag{5}$$

Үүнд: y –хамаарах хувьсагч(бодит утга); x –үл хамаарах хувьсагч(таамагласан утга); $\bar{y}, \bar{x} - y, x$-ын дундуж утгууд; m – налуу коэффициент(slope); b –огтлолцол(intercept)

Регрессийн шинжилгээний үр дүнд:

$R^2 = 0{,}9015; R = 0{,}949496635; m = 0{,}9998; b = 0{,}117$

Шугаман регрессийн үр дүнд $b = 0{,}117$ бага утгатай байгаа нь систематик алдаа бага байгааг харуулсан. Мөн $m = 0{,}9998; R = 0{,}9495$ болон $R^2 = 0{,}9015$ нь 1-тэй ойролцоо утгатай гарсан нь загварын таамаглал бодит өгөгдөлтэй тохирч байна.



4-р зураг. 2024 оны бодит ачаалал болон SARIMA таамаглалын харьцуулалт

IV. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар 2023 оны эрчим хүчний цахилгаан ачааллын бодит утган дээр суурилан улирлын чанартай таамаглалыг SARIMA аргыг ашиглан амжилттай боловсруулла. Судалгааны үр дүнд дараах дүгнэлтүүдийг гаргав. Үүнд:

Монгол орны эрс тэс уур амьсгал нь цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээнд хүчтэй улирлын хэлбэлзэл үүсгэдэг бөгөөд ялангуяа өвлийн улиралд ачаалал огцом өсдөг нь батлагдлаа.

SARIMA загвар нь улирлын шинж чанартай цаг хугацааны өгөгдлийг загварчлах, ирээдүйн хэрэглээг таамаглахад тохиромжтой арга болох нь туршилтаар нотлогдов.

SARIMA загвар нь ерөнхий тренд болон улирлын хэлбэлзлийг сайн барьж чадсан байна. Ялангуяа оны эхнээс дунд үе хүртэлх буурах хандлага бодит өгөгдөлтэй ойролцоо таарч байна.Гэсэн хэдий ч нийт

хугацааны хувьд SARIMA загвар нь улирлын шинж чанартай өгөгдөлд тохиромжтой, боломжийн нарийвчлалтай таамаглал гаргаж чадсан байна.

Таамагласан болон бодит өгөгдлийг харьцуулж, шугаман регрессийн шинжилгээ хийсэн. Үр дүнд нь $R^2 = 0.9015$, $R = 0.9495$ гарсан нь өндөр хамааралтайг харуулж байна. Иймд загварын таамаглал бодит өгөгдөлтэй сайн нийцэж байна.

V. АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] “Мэдээ.” ERC. https://erc.gov.mn/mn/news/398 (accessed Mar. 29, 2026).

[2] “SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average).” GeeksforGeeks. https://www.geeksforgeeks.org/machine-learning/sarima-seasonal-autoregressive-integrated-moving-average/ (accessed Mar. 29, 2026).

[3] “MATLAB.” MathWorks. https://www.mathworks.com/products/matlab.html (accessed Mar. 29, 2026).

[4] “Econometrics Toolbox.” MathWorks. https://www.mathworks.com/products/econometrics.html (accessed Mar. 29, 2026).

[5] “SARIMA (Seasonal ARIMA) implementation on time series to forecast the number of Malaria incidence” https://www.researchgate.net/publication/261307350_SARIMA_Seasonal_ARIMA_implementation_on_time_series_to_forecast_the_number_of_Malaria_incidence

[6] ”MONGOLIA’S ENERGY RESILIENCE:Opportunities and Risks” https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/Mongolia%27s%20Energy%20Resilience%20Opportunities%20and%20Risks.pdf

[7] “RENEWABLE ENERGY SOLUTIONS FOR HEATING SYSTEMS IN MONGOLIA”https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA_Renewable_energy_solutions_heating_Mongolia_2023.pdf

ГУЛУУЗ БОЛОН АНГИЛАН САВЛАСАН МАХ БОЛОВСРУУЛАХ ҮЙЛДВЭРИЙН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

Дүйсенбекийн ТИЛЕУХАБЫЛ[1], Энхтайваны ОЮУ-ЭРДЭНЭ[2]

[1,2] Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Дулаан хангамж, автомажуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: tilyeukhabyl2004@gmail.com[1]

Хураангуй: Монгол Улсад мах боловсруулах үйлдвэрлэлийн хөгжил нь махны экспорт, хүнсний аюулгүй байдлыг хангахад чухал ач холбогдолтой. Мах боловсруулах үйлдвэрлэлийн эрчим хүчний хэрэглээний дийлэнх хувийг хөргөлтийн системийн эрчим хүчний хэрэглээ эзэлдэг. Иймд мах боловсруулах үйлдвэрийн хөргөлтийн системийн эрчим хүчний хэрэглээг бууруулах нь эдийн засаг, байгаль орчны хувьд чухал асуудал юм. Энэхүү судалгаанд махыг гулууз хэлбэрээр болон ангилан савласан хэлбэрээр хөлдөөн хадгалах технологи бүхий мах боловсруулах үйлдвэрүүдийн эрчим хүчний хэрэглээг харьцуулан судлав. Судалгааг Дорнод аймагт байрлах 20000 толгой бяруу нядлах хүчин чадалтай мах боловсруулах үйлдвэрийг жишээ болгон авсан ба судалгааг тооцооллын арга дээр үндэслэн хийсэн. Тооцоогоор хөргөлтийн ачаалал, хөргөх байгууламжийн хэмжээ, цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ болон хүлэмжийн хийн ялгарлыг тодорхойлсон. Тооцооны үр дүнгээс харахад гулууз хэлбэрээр мах хөлдөөн хадгалах үйлдвэрийн хөргөх байгууламжийн талбай, хөргөлтийн ачаалал нь ангилан савлах хэлбэрээр махыг хөлдөөн хөргөх технологитой харьцуулахад харьцангуй их байна. Түүнчлэн 2 үйлдвэрийг харьцуулж үзэхэд махыг ангилан савлаж хөлдөөх үйлдвэр нь гулууз хэлбэрээр мах хөлдөөх үйлдвэртэй харьцуулахад жилд 1324.7 МВт эрчим хүч хэмнэж, 1138.02 тн CO_2 бууруулах боломжтой нь харагдаж байна.

Түлхүүр үг: мах хөлдөөх технологи, хөргөлтийн систем, эрчим хүчний хэмнэлт, хүлэмжийн хийн ялгарал, хөргөлтийн системийн эрчим хүч

I. УДИРТГАЛ

Монгол Улс нь мал аж ахуйд тулгуурласан эдийн засагтай орон бөгөөд мах үйлдвэрлэл нь хүнсний салбарын чухал хэсгийг бүрдүүлдэг. Мал аж ахуйн салбар нь хөдөө аж ахуйн нийт үйлдвэрлэлийн гол хэсгийг эзэлдэг бөгөөд мах нь дотоодын хэрэглээ болон экспортын чухал бүтээгдэхүүнд тооцогддог [1]. 2023 оны судалгаагаар Монгол Улсад махны үйлдвэрлэл 621.5 мянган тонн байсан ба үүнээс зөвхөн 91.7 тонн мах экспортод нийлүүлэгдсэн байна[2]. Энэ нь манай улсад чанарын шаардлага хангасан мах боловсруулах үйлдвэр төдийлөн их байдаггүйтэй холбоотой ба монгол малын махны хэрэглээний дөнгөж 8-13% нь үйлдвэрийн аргаар бэлтгэгдэж байна[3]. Иймээс Монгол орны эдийн засгийн гол үзүүлэлт болсон махны экспортын хэмжээг нэмэгдүүлэхийн тулд монгол малын махыг олон улсын стандартын шаардлага хангасан үйлдвэрт хөргөж, хөлдөөж бэлтгэх зайлшгүй шаардлага гарч байна.

Мах боловсруулах үйлдвэрийн нийт цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний дийлэнх хувийг буюу 45-60%-ийг үйлдвэрийн хөргөлтийн систем дангаараа эзэлдэг[4,5]. Мах боловсруулах үйлдвэрийн мах хөргөж, хөлдөөх технологи нь үйлдвэрийн эрчим хүчний хэрэглээтэй шууд хамааралтай байдаг тул энэхүү технологийг оновчтой сонгосноор мах боловсруулах үйлдвэрийн эрчим хүчний хэрэглээг бууруулах боломжтой юм. Энэхүү судалгааны ажлаар махыг гулууз болон ангилан савласан хэлбэрээр хөлдөөж хадгалах технологи бүхий мах боловсруулах үйлдвэрүүдийг харьцуулан судалж, тэдгээрийн хөргөх үйлдвэрийн хэмжээ, хөргөлтийн хүчин чадал, эрчим хүчний хэрэглээ болон хүлэмжийн хийн ялгарлыг тооцоолох замаар эдийн засгийн болон байгаль орчны хэмнэлтийг тодорхойлохыг зорьсон болно.

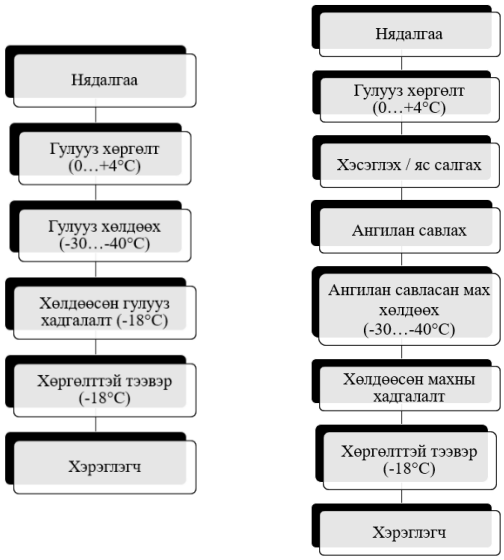
II. МАЛЫН МАХЫГ ХӨРГӨЖ ХӨЛДӨӨХ ТЕХНОЛОГИ

Мах боловсруулах үйлдвэрлэлд нядалгааны дараах хөргөх, хөлдөөх процесс нь бүтээгдэхүүний чанар, хадгалалтын хугацаа болон хүнсний аюулгүй байдалд чухал нөлөө үзүүлдэг.

Нядалгааны дараа махны булчингийн эдийн температур буурч, биохимийн өөрчлөлт явагддаг бөгөөд маханд хүйтний боловсруулалт хийх үеийн температурын бууралт нь махны чанарын үзүүлэлтүүдэд шууд нөлөөлдөг [6]. Ялангуяа гулууз махны жин, хэмжээ их байх тусам хөрөх хугацаа уртсаж, махны зөөлөн чанар болон өнгөний өөрчлөлтөд нөлөөлөх магадлал нэмэгддэг [7-8].

Мах боловсруулах үйлдвэрүүдэд махыг гулууз байдлаар болон шулж, ангилан савласан байдлаар хөргөх технологи өргөнөөр хэрэглэгддэг. Энэ технологийн бүдүүвчийг 1-р зураг үзүүлэв.

Манай улсын хувьд махыг гулууз байдлаар хүйтний боловсруулалтад оруулах аргыг ихэнх үйлдвэрүүдэд хэрэглэж байна. Энэ технологи нь нядалгааны дараа гулуузыг хөргөлтийн камерт тодорхой хугацаанд хадгалж махны гүний температурыг бууруулдаг. Гэсэн хэдий ч гулууз мах нь их жинтэй, дулаан дамжуулалт удаан явагддаг тул хөргөх хугацаа урт, эрчим хүчний хэрэглээ өндөр байдаг. Мөн хөргөх явцад махнаас чийг алдагдаж хаталт явагдана[10]. Сүүлийн жилүүдэд мах боловсруулах үйлдвэрүүдэд гулуузыг шулж, ангилж, ясгүй махыг савласан байдлаар хөргөх, хөлдөөх технологи өргөн нэвтэрч байна. Махыг ангилан савлаж хөлдөөснөөр махны хадгалалтын хугацааг уртасгаж, чанарыг тогтвортой хадгалдаг[10].



a) *b)*

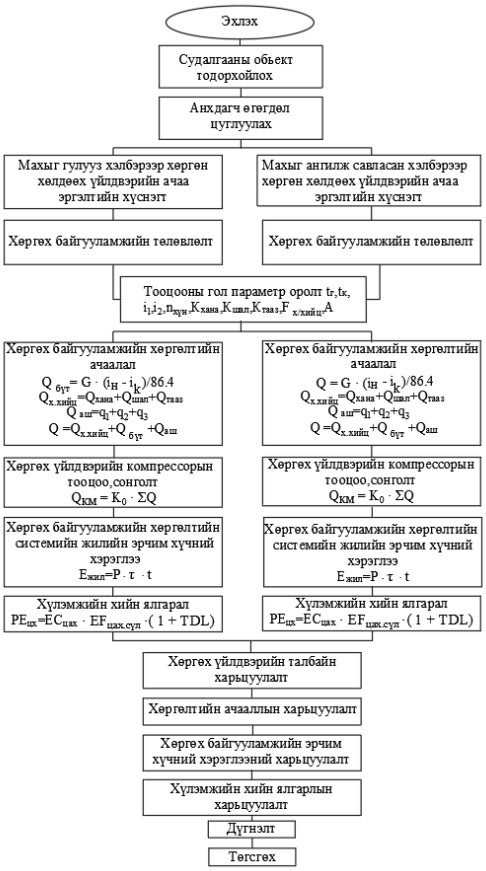
1-р зураг. Малын махыг хөргөж хөлдөөх технологийн зураг
b) Махыг гулууз байдлаар хөлдөөн хадгалах технологи
b)Махыг ангилан савласан байдлаар хадгалах технологи

Энэхүү технологи нь хөргөлтийн камерын шаардлагатай талбайг багасгах, хөргөлтийн системийн хүчин чадлыг бууруулах боломжтой ба дулаан дамжуулалт илүү хурдан явагддаг тул хөргөх хугацаа богино байдаг. Иймд энэхүү махыг хөргөж, хөлдөөх энэхүү хоёр аргыг харьцуулж, эрчим хүчний хэрэглээ, хүлэмжийн хийн ялгаралд дүн шинжилгээ хийхийг зорилоо.

III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Энэхүү судалгаагаар Дорнод аймагт байрлалтай 20000 толгой бяруу нядлах хүчин чадалтай мах боловсруулах үйлдвэрийг жишээ болгон авч тооцоог хийж гүйцэтгэсэн болно.

Тооцоог хийхдээ гадна болон дотор агаарын температурыг анхдагч өгөгдөл болгон авсан. Хөргөх байгууламжийн ачаа эргэлтийн хүснэгт, хөргөх байгууламжийн төлөвлөлтөөс хамааруулан мах боловсруулах үйлдвэрийн хөргөлтийн ачааллыг тодорхойлов. Хөргөлтийн системийн компрессор сонголтыг Bitzer программ ашиглан сонгохоор төлөвлөсөн ба тооцооны харьцуулалтыг ижил нөхцөлд явуулах үүднээс хөргөлтийн системийн үндсэн параметрүүдийг 2 үйлдвэрт ижил байхаар тооцсон болно. Хөргөлтийн системийн компрессор нь хөргөлтийн системийн хамгийн их цахилгаан эрчим хүчийг хэрэглэдэг тул энэхүү судалгаанд хөргөлтийн компрессорын цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээнд тулгуурлан хөргөлтийн системийн цахилгаан эрчим хүчний жилийн хэрэглээ, хүлэмжийн хийн ялгарлын тооцоог хийж үр дүнг гаргасан болно. Судалгааны ажлын тооцооны аргачлал алгоритмыг 2-р зурагт үзүүлэв.



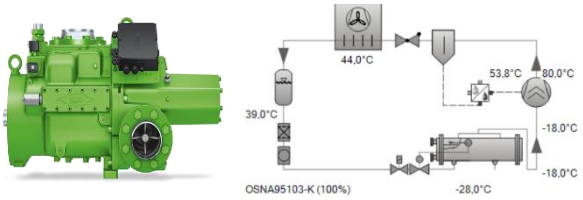
2-р зураг. Судалгааны ажлын алгоритм

Дээрх аргачлалын дагуу тооцооллыг хийж гүйцэтгэж үр дүнг гаргасан болно.

IV. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ҮР ДҮН

Судалгааны ажлыг гулууз ба ангилан савлах хэлбэрээр махыг хөлдөөн хадгалах технологи бүхий 2 төрлийн мах боловсруулах үйлдвэрийн хувьд хийж гүйцэтгэв. Үйлдвэрийн хөргөлтийн ачааллын тооцооноос хамааран 2 үйлдвэрийн хөргөлтийн систем болон компрессорын сонголтыг BITZER программ ашиглан сонголоо[11]. Гулууз хэлбэрээр махыг хөлдөөн хадгалах технологи бүхий үйлдвэрийн хөргөлтийн системд OSNA95103-К маркийн 319 кВт хүчин чадалтай 3 ширхэг компрессор, ангилан савлах хэлбэрээр махыг хөлдөөн хадгалах технологи бүхий үйлдвэрийн хөргөлтийн системд OSNA95103-К маркийн 272 кВт хүчин чадалтай 2 ширхэг компрессор сонгосон ба компрессорын зураг болон хөргөлтийн системийн схемийг 3-р зурагт үзүүлэв.

Тооцооны харьцуулалтыг ижил нөхцөлд явуулах үүднээс хөргөлтийн системийн үндсэн параметрүүдийг 2 үйлдвэрт ижил байхаар тооцож, ижил маркийн хүчин чадал нь ялгаатай задардаг шурган компрессорыг сонгосон.



3-р зураг. Мах боловсруулах үйлдвэрийн хөргөлтийн системийн схем ба компрессор

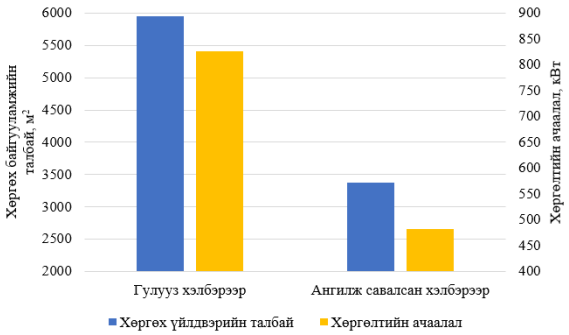
Гулууз ба ангилан савлах хэлбэрээр махыг хөлдөөн хадгалах технологи бүхий 2 төрлийн мах боловсруулах үйлдвэрийн хөргөлтийн системийн ачаалал, эрчим хүчний хэрэглээ болон хүлэмжийн хийн ялгарлын тооцооны үр дүнг нэгтгэн 1-р хүснэгтэд харуулав. 1-р хүснэгтээс харахад махыг гулууз байдлаар хөлдөөн хадгалах үйлдвэрийн эрчим хүчний хэрэглээ болон хүлэмжийн хийн ялгарлын хэмжээ ангилан савлах хэлбэрээр хөлдөөн хадгалах үйлдвэртэй харьцуулахад үлэмж их гарсан болно.

МАХНЫ БОЛОВСРУУЛАХ ҮЙЛДВЭРИЙН ХӨРГӨЛТИЙН СИСТЕМИЙН ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

1-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Махны үйлдвэр (Гулууз)	Махны үйлдвэр (Ангилж савлах)	Хэмнэлт
Хөргөх үйлдвэрийн нийт талбай, м^2	5952.3	3378.2	2574.1
Хөргөлтийн ачаалал, кВт	826.8	482.4	344.4
Цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ, МВт/жил	3643.67	2318.97	1324.7
Хүлэмжийн хийн ялгарлын хэмжээ, Тн CO^2/жил	3129.92	1991.9	1138.02

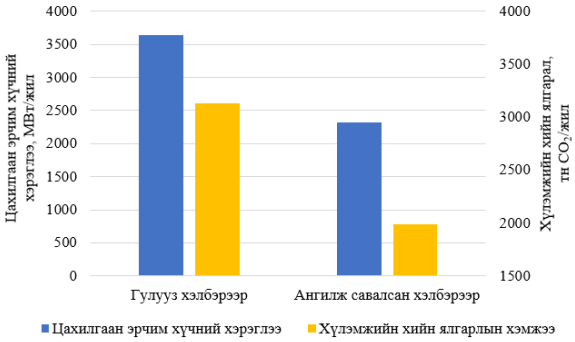
Мах боловсруулах үйлдвэрийн хөргөх байгууламжийн хэмжээ болон хөргөлтийн ачааллын харьцуулсан графикийг 5-р зурагт үзүүлэв.



5-р зураг. Мах боловсруулах үйлдвэрийн хөргөх байгууламжийн хэмжээ болон хөргөлтийн ачааллын харьцуулсан график

5-р зургаас харахад гулууз хэлбэрээр махыг хөлдөөн хадгалах тохиолдолд хөргөх байгууламжийн талбай 5952.3 м^2 хөргөлтийн ачаалал 826.8 кВт байсан бол ангилан савлах хэлбэрээр махыг хөлдөөн хадгалах үйлдвэрийн хөргөх байгууламжийн талбай 3378.2 м^2 хөргөлтийн ачаалал 482.4 кВт байна. Энэ нь махыг ангилан савлах байдлаар хөлдөөн хадгалснаар хөргөх байгууламжийн талбай болон хөргөлтийн ачааллыг бууруулах боломжтойг харуулж байна.

Мах боловсруулах үйлдвэрийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ болон хүлэмжийн хийн ялгарлын тооцоог хийж гүйцэтгэн үр дүнг 6-р зурагт үзүүлсэн.



6-р зураг. Мах боловсруулах үйлдвэрийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ болон хүлэмжийн хийн ялгарлын харьцуулсан график

Судалгааны үр дүнгээс харахад гулууз хэлбэрээр махыг хөлдөөн хадгалах үйлдвэрийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ жилд 3643.67 МВт, хүлэмжийн хийн ялгарлын хэмжээ 3129.92 тн CO_2 байна. Харин ангилан савлах байдлаар махыг хөлдөөн хадгалах үйлдвэрийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ жилд 2318.97 МВт, хүлэмжийн хийн ялгарлын хэмжээ 1991.9 тн CO_2 байгаа гулууз хэлбэрээр мах хөлдөөн хадгалах технологитой харьцуулахад үлэмж хэмжээгээр багассан байна.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар гулууз ба ангилан савлах хэлбэрээр махыг хөлдөөн хадгалах технологи бүхий 2 төрлийн мах боловсруулах үйлдвэрийн хөргөх байгууламжийн тооцоог хийж гүйцэтгэлээ. Тооцооны үр дүнгээс харахад махыг ангилан савлан хөлдөөх технологи бүхий үйлдвэрийн хөргөх байгууламжийн талбайн хэмжээ болон хөргөлтийн ачаалал харьцангуй бага гарч байна. Энэ нь махыг ангилан савлан хөлдөөх технологи нь махнаас ясыг шулж ангилан савладагтай холбоотой. Ингэснээр хадгалах махны хэмжээ багасаж үйлдвэрийн хөргөлтийн ачаалал буурснаар эрчим хүчийг хэмнэх боломж бүрдүүлж байгаа юм.

Мах боловсруулах үйлдвэрийн хөргөлтийн ачааллаас хамаарч үйлдвэрийн хөргөлтийн системийн эрчим хүчний хэрэглээг тооцоолсон ба ангилан савлах хэлбэрээр махыг хөлдөөж хадгалахад 171.69МВт эрчим хүч, 147.4 тн CO_2 хүлэмжийн хийн хэмнэх боломжтой байна.

Энэхүү судалгааны ажлыг зөвхөн хөргөлтийн системийн эрчим хүчний хэрэглээн дээр үндэслэн тооцсон бөгөөд цаашид гулууз байдлаар болон ангилан савлах хэлбэрээр махыг хөргөж хөлдөөх технологийн махны хүйтний боловсруулалтын судалгаа, махыг гулууз байдлаар болон ангилан савласан байдлаар хөлдөөх үеийн махыг хөлдөөх

хугацаанаас хамаарсан эрчим хүчний хэмнэлтийн судалгааг нээлттэй үлдээж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), “Final Report on the Study of Value Chains for Live Animals and Meat in Mongolia”, 2015.

[2] Хүнс, хөдөө аж ахуй, хөнгөн үйлдвэрлэлийн яамны албан ёсны сайт. https://mofa.gov.mn/branch/huns/616fa7c073bc4a5fc70f2228

[3] М.Оюун-Эрдэнэ, “Монгол малын махны хүйтний боловсруулалтын судалгаа”, Докторын судалгааны ажил. Улаанбаатар 2022

[4] International Finance Corporation (IFC), “Benchmarking Study: Resource Efficiency in Red Meat Abattoirs in South Africa”. Washingtonь 2020.

[5] Australian Industry Group, “Saving Energy in Abattoirs & Meat Processing Facilities” Australian Industry Group, 2012.

[6] Lancaster, J.M., Buseman, B.J., Weber, T.M etc, “Impact of beef carcass size on chilling rate, pH decline, display color, and tenderness of top round subprimals”. Translational Animal Science. Volume 4. 2020.

[7] Husband, P. M, “Carcass chilling – principles” Meat & Livestock Australia (MLA), 1994

[8] С. Дэлэг, “Хүнсний бүтээгдэхүүн хөргөх технологи, Улаанбаатар, 2013

[9] Savell, J. W., Mueller, S. L., & Baird, B. E, “The chilling of carcasses”, Meat Science, 70(3), 449–459.

[10] 鲍琳 周丹, “食品冷藏与冷链技”, 机械工业出版社, 2021, p50-52

[11] Bitzer software. https://www.bitzer.de/websoftware/

ТҮГЭЭХ СҮЛЖЭЭНИЙ ГОРИМЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ, ЭРЧМИЙН АЛДАГДАЛД НАРНЫ ТАРХМАЛ ЭХ ҮҮСВЭРИЙН НӨЛӨӨЛЛИЙН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

Энхболдын ЭНХЧИМЭГ[1], Бат-Очирын АНХБАЯР[2], Пүрэвжавын ЭРХЭМТӨР[3]

Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны инженерийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: batochirankhbayar7@gmail.com[2] enkhuush.e04@gmail.com[1] erkhemtur@must.edu.mn[3]

Хураангуй: **Түгээх цахилгаан сүлжээнд эрчим хүчний алдагдал нь шугамын бүтэц болон ачааллын тархалтаас шалтгаалан харьцангуй өндөр байдаг. Сүүлийн жилүүдэд түгээх цахилгаан сүлжээний үр ашгийг дээшлүүлэх зорилгоор төрөл бүрийн тархмал эх үүсвэрийг ашиглах судалгаа эрчимтэй хөгжиж байна. Энэхүү судалгаанд Хэнтий аймгийн Чингис хотын 6 кВ-ын түгээх цахилгаан шугам сүлжээний ТӨВ фидерийг судалгааны объект болгон авч, нарны хосмог (hybrid solar power system) цахилгаан станцыг холбосон нөхцөлд горимын параметрүүд хэрхэн өөрчлөгдөхийг хэд хэдэн хувилбар боловсруулан судалсан. Судалгааны үр дүнгээс тархмал эх үүсвэр ашиглах нь фидерийн горимын үзүүлэлт, эрчмийн алдагдлыг бууруулах эерэг нөлөөтэй болохыг судалгааны үр дүнгээр харуулсан.**

Түлхүүр үг: тархмал эх үүсвэр, нарны хосмог цахилгаан станц, эрчмийн алдагдал, эрчим хүчний хуримтлуур, хүчдэлийн хазайлт, hybrid solar power system

I. УДИРТГАЛ

Цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээ тасралтгүй өсөж байгаа өнөөгийн нөхцөлд түгээх цахилгаан сүлжээний найдвартай ажиллагааг хангах, ашиглалтын үр ашгийг нэмэгдүүлэх асуудал улам бүр чухал болж байна. Ялангуяа дунд болон нам хүчдэлийн түгээх сүлжээнд шугамын урт их, ачааллын тархалт жигд бус, мөн сүлжээний бүтэц оновчгүй байх зэрэг хүчин зүйлсээс шалтгаалан эрчмийн алдагдал харьцангуй өндөр, хүчдэлийн хазайлт ихтэй байдаг. Иймээс түгээх цахилгаан сүлжээний алдагдлыг бууруулах, хүчдэлийн горимыг сайжруулах нь эрчим хүчний системийн үр ашиг, найдвартай ажиллагааг нэмэгдүүлэхэд чухал ач холбогдолтой судалгааны асуудал юм [1].

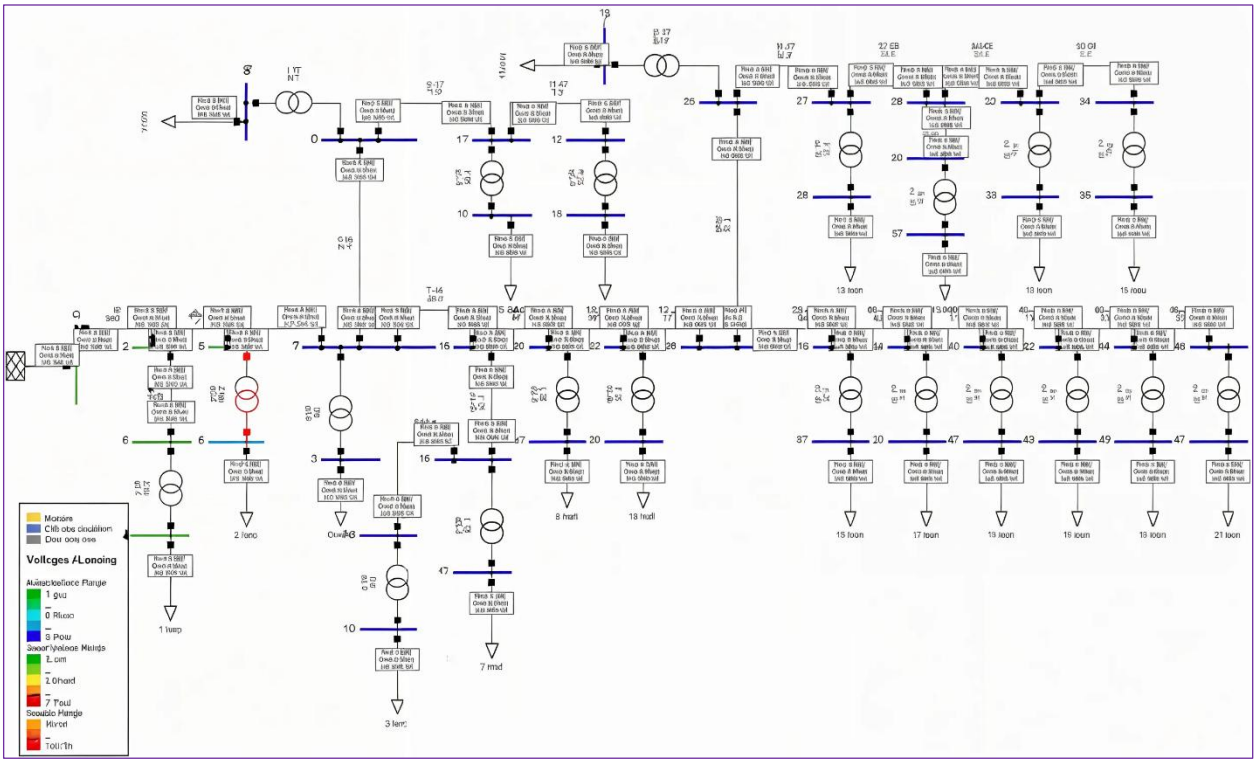
Сүүлийн жилүүдэд түгээх цахилгаан сүлжээнд тархмал эх үүсвэрийг ашиглах чиглэлээр судалгаа эрчимтэй хийгдэж байна. Тархмал эх үүсвэр нь хэрэглэгчидтэй ойр байрлах бага болон дунд хүчин чадлын цахилгаан эрчим хүчний эх үүсвэрүүдийг хэлдэг бөгөөд үүнд нарны болон салхины цахилгаан станц зэрэг сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрүүд хамаарна. Эдгээр эх үүсвэрийг түгээх цахилгаан сүлжээнд холбосноор шугамын нийлбэр чадлын урсгалыг бууруулах, хүчдэлийн түвшнийг тогтворжуулах, мөн сүлжээний эрчмийн алдагдлыг багасгах боломж бүрддэг.

Энэхүү судалгаанд Хэнтий аймгийн Чингис хотын 6 кВ-ын түгээх цахилгаан шугам сүлжээний хүчдэлийн хазайлт ба эрчмийн алдагдал хамгийн өндөр “ТӨВ” фидерийг сонгон авсан болно. Тархмал эх үүсвэрээр нарны хосмог цахилгаан станц /hybrid solar power system/ буюу нарны панел ба хуримтлуурын хосолсон системийг (JMHPOWER-200) үндсэн эх үүсвэрээс харилцан адилгүй зайтай холбосон нөхцөлд сүлжээний горимд үзүүлэх нөлөөг судлав [5]. Судалгааны хүрээнд сүлжээний суурь тогтсон горимын тооцоог DIgSILENT PowerFactory программ хангамжийг ашиглан гүйцэтгэж, улмаар хувилбар тус бүрд тархмал эх үүсвэрийг загварчлан оруулж горимын тооцоог хийж шаардлагатай үзүүлэлтүүдийн ба эрчмийн алдагдлын өөрчлөлтийг харьцуулан үнэлсэн болно.

Судалгааны объект, өгөгдөл. Энэхүү судалгааны ажлын объектоор сонгон авсан 6 кВ-ын Төв фидер (1-р зураг) нь нийт 21 дэд өртөөтэй бөгөөд 100–400 кВА номиналь чадал бүхий 21 трансформатортай, нийлбэр суурилагдсан чадал 4500 кВА, салаалсан шугамуудыг оролцуулсан нийт шугамын урт 15.9 км байна. Шугамын үндсэн хэсэг нь АС-35 маркийн дамжуулагч бүхий агаарын шугам бөгөөд харьцангуй бага урттай ААБл-3×150 маркийн кабель шугамтай байна.

Сүлжээний горимын тооцооллыг DIgSILENT PowerFactory программ хангамжийг ашиглан 2025 оны 12 дугаар сарын өвлийн их ачааллын хэмжилтийн өгөгдөлд үндэслэн гүйцэтгэсэн. Мөн тухайн фидерийн 2025 оны сар бүрийн цахилгаан эрчим хүчний хэрэглээний мэдээллийг ашиглан их ачааллыг ашиглах хугацаа болон их алдагдлын хугацааг тодорхойлж, эрчмийн алдагдлын бүтэц болон хэмжээг тооцоолсон болно [1,4].

Түүнчлэн фидерийн эрчмийн харьцангуй нийлбэр алдагдлыг тухайн гаргалгын жилийн нийт хэрэглэсэн цахилгаан эрчим хүчтэй харьцуулан хувиар илэрхийлж тодорхойлов.



1-р зураг. 6 кВ-ын ТӨВ фидерийн тооцооны схем

II. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Судалгааны эхний шатанд нарны хосмог цахилгаан станц холбогдоогүй байх үеийн өвлийн их ачааллын горимын тооцоог гүйцэтгэж, фидерийн горимын үзүүлэлтүүд ба эрчмийн алдагдлыг тодорхойлон суурь хувилбарын үр дүнг гарган авсан. Эдгээр үр дүнг дараагийн шатанд нарны хосмог цахилгаан станц холбосон хувилбаруудын тооцооны үр дүнтэй харьцуулан судалгаанд ашигласан.

Бидний судалгаанд ашигласан тархмал эх үүсвэрийн ажиллах үеийн хамгийн их гаргах чадлыг өдрийн болон оройн цагт 200 кВт байхаар сонгон авсан. Сүлжээний эрчмийн алдагдал болон хүчдэлийн хазайлтад үзүүлэх нөлөөг тодорхойлох зорилгоор гаргалгын өөр өөр цэгүүдэд нарны хосмог станцыг холбосон хэд хэдэн хувилбарыг авч үзэж, хувилбар бүрийн горим болон эрчмийн алдагдлын тооцоог гүйцэтгэсэн.

Тооцоонд тухайн гаргалгын ачаалал болон хэрэглэсэн цахилгаан эрчим хүчийг өөрчлөлтгүй гэж тооцсон. Мөн эрчмийн алдагдлын тооцоонд жилийн их алдагдлын хугацааг өвлийн их ачааллын горимтой дүйцүүлэн авч үзсэн. Хувилбаруудын симуляцын хийсэн үед нэг ширхэг нарны хосмог станцыг өөр өөр байрлалтай трансформаторын дэд өртөөний нам хүчдэлийн талд холбосон хувилбаруудыг боловсруулан авч, горимын болон эрчмийн алдагдлын тооцоог хийсэн.

Ачаалалгүй үед хуримтлуурын үүсгэх чадлыг бүрэн дамжуулах боломжтой байх үүднээс 250 кВА болон түүнээс дээш номиналь чадалтай трансформатор бүхий дэд өртөөг сонгон авч, тэжээлийн үндсэн эх үүсвэрээс хамгийн ойр байрлалтайгаас эхлэн алслагдсан дараах 7 хувилбарыг боловсруулан тооцоонд ашиглав. Үүнд:

1-р хувилбар: КТПН-248 дэд өртөөний (S11-250) трансформаторын нам хүчдэлд холбосон – гаргалгын эхнээс 3.53 км зайд байрлах.

2-р хувилбар: КТПН-25 дэд өртөөний (ТМ-400) трансформаторын нам хүчдэлд холбосон – гаргалгын эхнээс 3.85 км зайд байрлах.

3-р хувилбар: КТПН-259 дэд өртөөний (S11-400) – гаргалгын эхнээс 4.1 км зайд байрлах.

4-р хувилбар: АТП-111 дэд өртөөний (S11-400) – гаргалгын эхнээс 5.68 км зайд байрлах.

5-р хувилбар: АПН-28 дэд өртөөний (ТМ-250) – гаргалгын эхнээс 5.7 км зайд байрлах.

6-р хувилбар: КТПН-260 дэд өртөөний (S11-400) – гаргалгын эхнээс 6.37 км зайд байрлах.

7-р хувилбар: АТП-196 дэд өртөөний (S11-250) – гаргалгын эхнээс 6.8 км зайд байрлах.

Тархмал эх үүсвэрийн түгээх сүлжээний горим ажиллагаанд үзүүлэх нөлөөллийн чанарын үнэлгээг хийх үүднээс чадал, эрчмийн алдагдал ба

хүчдэлийн хазайлтын үзүүлэлтүүдийг авч үзсэн болно.

Түгээх сүлжээ нь хэд хэдэн зангилаанаас бүрдэх бөгөөд эдгээр зангилаанд ачааллууд (LD1–LD6) холбогдсон байна. Мөн DG1, DG2 гэсэн тархмал эх үүсвэрийг зангилаануудад ээлж дараалан холбогдсон хэмээн авч үзэж сүлжээний горимын боломжит тохиолдлуудыг симуляцын аргаар судалсан.

Нэг тархмал эх үүсвэрийн чадал болон ачааллын харьцаанаас хамааран дараах хоёр үндсэн горим үүсэх боломжтой.

Тохиолдол 1

Зангилааны ачаалал нь тухайн зангилаанд холбогдсон генераторын чадлаас их буюу тэнцүү байна:

$$LD_i \geq DG_i \forall i. \quad (1)$$

Энэ горим нь нарны бичил үүсгүүр болон бага чадлын салхин генератортай түгээх сүлжээнд түгээмэл тохиолддог.

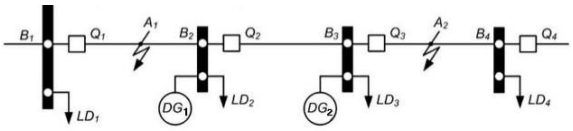
Тохиолдол 2

Зангилааны ачаалал нь холбогдсон генераторын чадлаас бага боловч сүлжээний нийлбэр ачаалал нь тархмал эх үүсвэрийн нийлбэр чадлаас бага байна:

$$\left(LD_i < DG_i\right) \wedge \left(\sum_{k=1}^{n} LD_k \geq \sum_{k=1}^{n} DG_k\right). \quad (2)$$

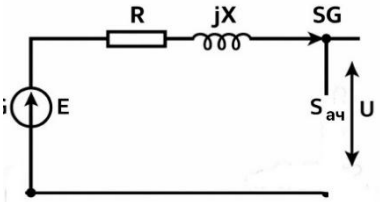
Энэ горим зангилааны ачаалал нь тархмал эх үүсвэрийн чадлаас харьцангуй бага байх үед үүсдэг[2, 4].

Дээр дурдагдсан 1 ба 2 нөхцөлүүд нь тархмал эх үүсвэрийн холбогдсон зангилааны чадлыг загварчлахад ашиглагдана.



2-р зураг. Тархмал эх үүсвэртэй түгээх сүлжээ

Чадал-эрчмийн алдагдалд нөлөөлөх физик утга. Тархмал эх үүсвэрээс янз бүрийн параметр бүхий олон элементтэй сүлжээний үйл ажиллагаанд үзүүлэх нөлөөг тайлбарлах зорилгоор үндсэн эх үүсвэр ***G*** болон нарны хосмог станц ***SG*** гэсэн хоёр эх үүсвэртэй $\boldsymbol{S}_{\text{ач}}$ ачаалалтай нэг шугамтай сүлжээний загварыг авч үзье, 3-р зураг.



3-р зураг. Тархмал эх үүсвэртэй түгээх сүлжээний хялбаршуулсан загвар

Загварт ***E*** гаргалгын эхэн дэх үндсэн үүсгэгчийн хүчдэл, ***U*** хэрэглэгчийн зангилааны хүчдэл, $\boldsymbol{S}_{SG}$ нарны хосмог станцын үүсгэх чадал, $\boldsymbol{S}_{\text{ач}}$ хэрэглэгчийн ачааллыг дүрслэн үзүүлсэн байна.

Хэрэв үүсгэгчийн болон хэрэглэгчийн зангилааны хүчдэл мэдэгдэж байгаа бол ачааллын гүйдлийг тодорхойлж, сүлжээн дэх чадлын алдагдлын илэрхийллийг бичих боломжтой бөгөөд улмаар чадлын алдагдал ба холбогдсон нарны хосмог станцын чадалтай ямар уялдаа холбоотойг илэрхийлэх боломжтой юм [4, 6].

Эхлээд тархмал эх үүсвэр (нарны хосмог станц) холбогдоогүй байх үеийн чадлын алдагдлыг тодорхойлбол:

$$S_{алд} = \left(E - U\right) \cdot \dot{I} = \left(E - U\right) \cdot \left(I_{ач.a} + jI_{ач.r}\right) \quad (3)$$

Үүнд: $\boldsymbol{S}_{\text{алд}}$ - сүлжээний чадлын алдагдал,

$\boldsymbol{I}_{\text{ач.a}}$,$\boldsymbol{I}_{\text{ач.r}}$ - ачааллын гүйдлийн бодит ба хуурмаг байгуулагчийн утга.

Одоо нарны хосмог станц холбогдсон үеийн чадлын алдагдлын илэрхийллийг гаргая, ингэхдээ зөвхөн бодит чадал үүсгэнэ (Cosφ=1), мөн холбогдсон цэгийн хүчдэл өөрчлөлтгүй гэж үзье. Тэгвэл чадлын алдагдлыг дараах илэрхийллээр тодорхойлно:

$$S_{алд.SG} = \left(E - U\right) \cdot \dot{I} = \left(E - U\right) \cdot \left(I_{ач.a} - I_{SG} + jI_{ач.r}\right) \quad (4)$$

Үүнд: $\boldsymbol{S}_{алд.SG}$ - нарны хосмог станц холбогдсон үеийн сүлжээний чадлын алдагдал, $\boldsymbol{I}_{\text{SG}}$ нарны хосмог станцын сүлжээнд өгөх гүйдлийн утга.

Дээр гарган авсан 3 ба 4 илэрхийллүүдийг ашиглан тархмал эх үүсвэрийг сүлжээнд холбож ашигласнаар чадлын алдагдал хэрхэн буурч байгааг хялбархан гарган харж болно:

$$S_{алд} - S_{алд.SG} = \left(E - U\right)\left(I_{ач.a} + jI_{ач.r}\right) - \left(E - U\right) \cdot \cdot \left(I_{ач.a} - I_{SG} + jI_{ач.r}\right) = \left(E - U\right) \cdot I_{SG}.$$

Дээрх 3 илэрхийллээс дүгнэлт хийвэл тархмал эх үүсвэрийг түгээх сүлжээнд холбож ашигласнаар гаргалгын эхнээс гүйх гүйдэл буюу чадлын урсгалыг багасгаж чадлын алдагдлыг бууруулан улмаар эрчмийн алдагдлыг бууруулах боломжтой гэж харагдаж байна[2, 3, 4].

Тархмал эх үүсвэр холбогдсон зангилааны хүчдэлийн өөрчлөлтийг энэ судалгаанд тооцсонгүй учир нь нарны хосмог станцыг хэрэглэгчийн трансформаторын нам талд (0.4 кВ) холбосон хэлбэрээр загварчлав. Судалгааны хүрээнд гүйцэтгэсэн суурь горимын тооцоо болон эрчмийн алдагдлын тооцоонд бүх элементүүдийн алдагдлыг бүх хувилбарт бүрэн тооцон оруулж үр дүнг гаргасан.

III. ГОРИМЫН ТООЦОО, ҮР ДҮН

Өвлийн их ачааллын үеийн сүлжээний горимын тооцоог DIgSILENT PowerFactory программ

хангамжийг ашиглан гүйцэтгэж, тооцооны үр дүнд үндэслэн эрчмийн алдагдлыг тодорхойлсон. Хувилбар тус бүрийн горимын тооцоонд тархмал эх үүсвэрийг тухайн хувилбарт сонгосон дэд өртөөний нам хүчдэлийн талд холбосон нарны станц хэлбэрээр загварчилсан болно.

Анхдагч суурь горим болон судалгаанд авч үзсэн долоон хувилбар тус бүрээр хийсэн горимын тооцооны үр дүнг нэгтгэн 1-р Хүснэгтэд үзүүлэв.

ГОРИМ, ЭРЧМИЙН АЛДАГДЛЫН ТООЦООНЫ ҮР ДҮН

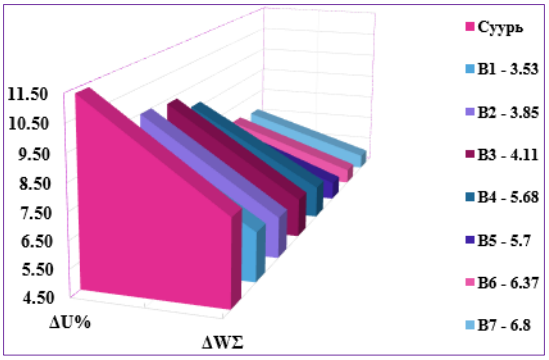
1-Р ХҮСНЭГТ.

№	Хувил-бар	Бодит чадлын алдагдал	Эрчмийн алдагдалын үр дүн, %			
		ΔP_{Σ}	$\Delta W_{ш}$	$\Delta W_{хя}$	$\Delta W_{ор}$	ΔW_{Σ}
1	Суурь	153.5	77.1	17.2	5.7	7.66
2	В1	122.9	71.0	20.9	8.1	6.32
3	В2	116.6	71.5	21.8	6.6	6.04
4	В3	114.8	71.1	22.1	6.8	5.96
5	В4	109.2	68.9	23.1	8.0	5.72
6	В5	97.0	66.5	25.5	8.0	5.18
7	В6	94.2	66.2	26.2	7.6	5.059
8	В7	94.3	66.2	26.1	7.7	5.061

Хүснэгт 1 болон Зураг 4-т үзүүлсэн тооцооны үр дүнгээс харахад түгээх цахилгаан сүлжээнд тархмал эх үүсвэрийг ашиглах нь чадлын болон эрчмийн алдагдлыг бууруулахад мэдэгдэхүйц нөлөө үзүүлж байгаа нь ажиглагдаж байна. Суурь хувилбарт бодит чадлын алдагдал 153.5 кВт байсан бол судалгаанд авч үзсэн хувилбаруудад энэхүү үзүүлэлт буурч, хамгийн бага утга нь 94.2 кВт хүрсэн байна.

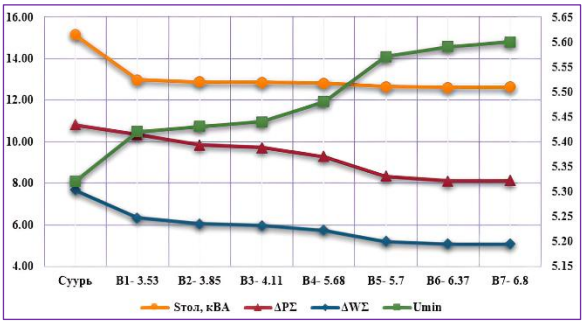
Зураг 3-т үзүүлснээр тархмал эх үүсвэрийн холбогдсон байршлыг үндсэн үүсгэгчээс улам хол зайтай өөрчилсөн хувилбаруудын үед алдагдлын хэмжээ аажмаар буурч байгаа нь тодорхой харагдаж байна.

Мөн эрчмийн нийлбэр алдагдал ($\Delta W_{\Sigma\%}$) суурь горимд 7.66 % байсан бол нарны станц холбогдсон бусад хувилбаруудад 6.32-5.06 хувь хүртэл буурсан байна. Иймээс нарны хосмог станцыг түгээх цахилгаан сүлжээнд оновчтой байршилд холбох нь эрчмийн алдагдлыг бууруулж, сүлжээний ашиглалтын үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжтой гэж үзэж болно.



4-р зураг. Хувилбаруудад харгалзах хүчдэлийн хазайлт ба эрчмийн алдагдлын хамаарал

Сүлжээний зангилаан дах хамгийн бага хүчдэл ($U_{\min}$) болон эрчмийн нийлбэр алдагдлын (ΔW_{Σ}) өөрчлөлтийг суурь горим болон судалгаанд авч үзсэн хувилбаруудын хувьд харьцуулан үзүүлэв. Тооцооны үр дүнгээс харахад суурь горимтой харьцуулахад хувилбаруудад зангилааны хамгийн бага утгатай байсан зангилааны хүчдэл нэмэгдэх хандлага ажиглагдсан бөгөөд үүнтэй зэрэгцэн сүлжээний эрчмийн алдагдлын хэмжээ тодорхой хэмжээгээр буурах хандлагатай байна. Хүчдэлийн түвшин дээшлэх үед дамжуулах шугамаар урсах гүйдлийн хэмжээ багасах нөхцөл бүрддэг тул шугамын идэвхт эсэргүүцлээс шалтгаалах алдагдал буурах боломжтой юм.



5-р зураг. Хувилбаруудын нийлбэр чадлын урсгал, чадал-эрчмийн алдагдал ба хамгийн бага хүчдэлийн утгын өөрчлөлт

Мөн тооцооны үр дүнгээр 5-р Зурагт суурь горим болон судлагдаж буй хувилбаруудын чадлын урсгал, бодит чадал-эрчмийн алдагдал болон зангилааны хамгийн бага хүчдэлийн өөрчлөлтийг харуулсан. Тооцооны үр дүнгээс харахад суурь горимд гаргалгын эхэнд урсах чадлын хэмжээ 1515.0 кВА байсан бол авч үзсэн хувилбаруудад 1280–1260 кВА хүртэл буурсан байна. Үүнтэй зэрэгцэн бодит чадлын нийлбэр алдагдал (ΔP_{Σ}) 153.5 кВт-оос 94.3 кВт хүртэл буурсан нь сүлжээний алдагдал мэдэгдэхүйц багассаныг харуулж байна. Мөн зангилааны хамгийн бага хүчдэл ($U_{\min}$) дээрх хувилбаруудын хувьд аажмаар нэмэгдэх хандлагатай байгаа нь

сүлжээний хүчдэлийн горим сайжирч байгааг илтгэнэ.

.СУУРЬ БОЛОН БУСАД ХУВИЛБАРУУДЫН ЗАНГИЛААНЫ ХАМГИЙН БАГА ХҮЧДЭЛ, ХҮЧДЭЛИЙН АЛДАГДАЛ БОЛОН ХАЗАЙЛТЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ

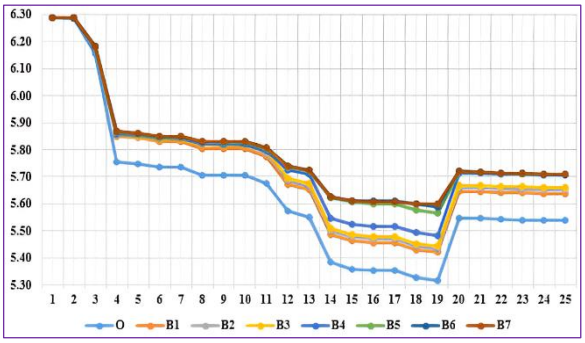
2-Р ХҮСНЭГТ.

№	Хувил-бар	Хамгийн бага хүчдэл	Хүчдэлийн алдагдал	Хүчдэлийн хазайлт
		U_{min}, кВ	ΔU, кВ	$\Delta U\%$
1	Суурь	5.32	0.68	11.33
2	В1	5.42	0.58	9.67
3	В2	5.43	0.57	9.50
4	В3	5.44	0.56	9.33
5	В4	5.48	0.52	8.67
6	В5	5.57	0.43	7.17
7	В6	5.59	0.41	6.83
8	В7	5.60	0.40	6.67

Дээрх 2-р хүснэгтэд суурь горим болон судалгааны хувилбаруудын зангилааны хамгийн бага хүчдэл, хүчдэлийн алдагдал ба хүчдэлийн хазайлтын үзүүлэлтүүдийг харьцуулан үзүүлэв. Суурь горимд хамгийн бага хүчдэлийн 5.32 кВ байсан бол авч үзсэн хувилбаруудын хувьд энэ үзүүлэлт хувилбар бүрээр өсөж 5.60 кВ утгатай болсон байна.

Мөн хүчдэлийн алдагдлын хэмжээ суурь горимтой харьцуулахад буурсан үзүүлэлттэй гарсан. Тухайлбал, суурь горимд хүчдэлийн алдагдал 0.68 кВ буюу 11.33% байсан бол судалгаанд авч үзсэн хувилбаруудад 0.58-0.40 кВ буюу 9.67-6.67% болж буурсан байна.

Эдгээр үр дүнгээс харахад авч үзсэн хувилбарууд нь сүлжээний хүчдэлийн горимд эерэг нөлөө үзүүлж, хүчдэлийн алдагдлыг мэдэгдэхүйц бууруулах боломжтой байгааг харуулж байна [6].



6-р зураг. Суурь болон хувилбарууд дах бүх зангилааны хүчдэлийн тархалтын харьцуулалт

Тооцооны үр дүнгээр байгуулсан 3-р Зурагт суурь горим болон хувилбаруудын зангилаанууд дахь хүчдэлийн өөрчлөлтийг харуулав. Суурь горимтой харьцуулахад хувилбарууд өөрөөр хэлбэл үндсэн тэжээлийн эх үүсвэрээс алслагдсан байршилд тархмал эх үүсвэрийг ашигласан бол энэ байршлын зай ихсэх тусам зангилаанууудын хүчдэлийн түвшин илүү хүчтэй өссөн хамааралтай байна. Ялангуяа сүлжээний дунд хэсгийн ачаалал ихтэй зангилаанууд дээр хүчдэлийн уналт харьцангуй багассан байна.

Мөн сүлжээний төгсгөлийн зангилаануудын хүчдэлийн түвшин суурь горимтой харьцуулахад илүү тогтвортой хазайлт савлалтын хэмжээ бага утгатай болсон байна.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаанд Хэнтий аймгийн Чингис хотын 6 кВ түгээх цахилгаан шугам сүлжээний хүчдэлийн алдагдал, хазайлт болон чадал-эрчмийн алдагдал ихтэй ТӨВ фидерт тархмал эх үүсвэр буюу нарны хосмог цахилгаан станцыг өөр өөр байрлалд холбосон хэд хэдэн хувилбарыг авч үзэж, тэдгээрийн горим болон эрчмийн алдагдалд үзүүлэх нөлөөг харьцуулан судаллаа. Хувилбарыг зохиохдоо тархмал эх үүсвэрийг үндсэн эх үүсвэрээс алслагдах байршлаар буюу шугам сүлжээний эхлэл ба нарны хосмог станц хоорондын зайг ихсэх байдлаар өөрөөр хэлбэл 1-р хувилбарт хамгийн ойрхон зайд байрлуулж, 7-р хувилбарт хамгийн хол зайд нарны хосмог станцыг байрлуулах гэх мэтээр бүрдүүлсэн болно. Хувилбаруудыг ийм маягаар зохиож тооцоо хийсний үр дүнд тархмал эх үүсвэрийг үндсэн тэжээлийн эх үүсвэрээс хол зайтай байрлуулах тусам горимын параметрүүд илүү дээшилсэн үзүүлэлттэй болж, эрчмийн алдагдлыг илүү ихээр бууруулж байна гэсэн дүгнэлт хийж болно. Тооцооны үр дүнгээс харахад тархмал эх үүсвэрийг түгээх сүлжээнд холбох үед дамжуулах шугамаар урсах нийлбэр чадлын хэмжээ багасаж, улмаар бодит чадлын болон эрчмийн алдагдал буурах хандлагатай байна.

Судалгаанд авч үзсэн хувилбаруудаас 7-р хувилбарын тооцооны үр дүн хамгийн өндөр үзүүлэлттэй гарсан бөгөөд энэ хувилбарт бодит чадлын алдагдал 94.3 кВт болж буурч, эрчмийн нийлбэр алдагдал 5.06% болсон байна. Мөн зангилааны хамгийн бага хүчдэл 5.60 кВ хүртэл нэмэгдсэн нь сүлжээний хүчдэлийг дээшлүүлж байгааг нотолж байна.

Дээрх үр дүн нь тархмал эх үүсвэрийг түгээх сүлжээнд зөв байршилд холбох нь сүлжээний чадал-эрчмийн алдагдлыг бууруулах, хүчдэлийн түвшнийг сайжруулах, улмаар сүлжээний ашиглалтын үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжтой болохыг энэхүү судалгааны үр дүн харуулж байна. Цаашилбал тухайн судалгааны үр дүнгүүдийг ашиглан тархмал эх үүсвэрийг сүлжээнд холбох оновчтой байршлыг тодорхойлох оновчлолын бодлогыг шийдэх боломжтой гэж үзэж болно.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Д.Содномдорж. Цахилгаан эрчим хүчний системийн горимын цогцолбор судлал ба математик загварчлал. Шилмэл бүтээл. Улаанбаатар, 2012 он. -827х.

Федоров В. К., Леонов Е. Н., Федоров Д. В. Влияние распределенной эх үүсвэри на потери и качество электрической энергии// Омский научный вестник №6, 2016 (150). С 72-76.

[3] Шведов Г.В. Влияние распределенной солнечной эх үүсвэри на потери электроэнергии в электрических сетях / Шведов Г.В., Чоршанбиев С.Р., Морсин И.А. // Материалы VIII Международной молодежно научно – технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2017». Самара, 02-06 октября 2017. В 3 т. Т.2. – С. 125 – 128.

[4] П.Эрхэмтөр. Ж.Баатархүү, Л.Хэрлэнтуяа. Хуваарилах сүлжээний эрчмийн алдагдлыг бууруулахад нарны бичил станц ашиглах асуудал. Эрчим хүч & engineering, 2024-7(245).

[5] https://jmhpower.com/product/200kw-150kw-250kw-300kw-hybrid-solar-power-system/

[6]https://www.researchgate.net/publication/222561651_Distributed_generation_definition_benefits_and_issues

УЛААНБААТАР ХОТ ДАХЬ ЦАХИЛГААН АВТОМАШИНЫ ЦЭНЭГЛЭХ ДЭД БҮТЭЦ: ХЭРЭГЛЭГЧИЙН ХАНДЛАГА БА СЭРГЭЭГДЭХ ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ИНТЕГРАЦИЙН БОЛОМЖ

Алтансүхийн МАРГАД-ЭРДЭНЭ[1], Анхбаярын ЭНГҮҮН[2], Жавхлангийн БИЛГҮҮН-ЭРДЭНЭ[3], Эрдэнэбатын МӨНХТУЯА[4]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, ЭХИС, Шинэ Сэргээгдэх Эрчим Хүчний тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: e.munkhtuya@must.edu.mn[4]

Хураангуй: **Энэхүү судалгааны ажлаар цахилгаан автомашины (Electric Vehicle, EV) цэнэглэх байгууламжийг сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэртэй, ялангуяа нарны фотоцахилгаан (PV) системтэй хослуулах боломжийг судалж, Монгол Улсад хэрэгжүүлэх нөхцөл боломжийг үнэлэв. Судалгаанд EV цэнэглэх системийн бүтэц, ажиллагааны зарчим, батарейн технологийн онцлог болон цэнэглэх дэд бүтцийг сэргээгдэх эрчим хүчтэй уялдуулах техникийн шийдлийг авч үзсэн. Мөн хэрэглэгчдийн цахилгаан автомашины талаарх ойлголт, хэрэглээний сонирхол болон цэнэглэх дэд бүтцийн хэрэгцээг тодорхойлох зорилгоор санал асуулгын судалгаа хийсэн. Судалгааны үр дүнгээс харахад оролцогчдын дийлэнх нь цахилгаан автомашин ашиглах сонирхолтой боловч цэнэглэх станцын хүртээмж хангалтгүй байгааг гол саад бэрхшээл гэж үзсэн байна. Түүнчлэн хэрэглэгчдийн ихэнх нь автомашиныг сэргээгдэх эрчим хүчээр, ялангуяа нарны эрчим хүч ашиглан цэнэглэх боломжийг дэмжиж байгааг судалгааны дүн харуулсан. Нарны фотоцахилгаан системд суурилсан EV цэнэглэх байгууламж нь өдрийн цагаар үйлдвэрлэсэн цахилгаан энергийг шууд автомашины батарейг цэнэглэхэд ашиглах эсвэл нэмэлт хуримтлуурт хадгалах боломжийг бүрдүүлдэг. Ийм систем нь төвлөрсөн цахилгаан сүлжээний ачааллыг бууруулах, нүүрстөрөгчийн хийн ялгарлыг багасгах, мөн эрчим хүчний хэрэглээг илүү үр ашигтай удирдах давуу талтай. Судалгааны үр дүнгээс харахад нарны эрчим хүчийг ашигласан EV цэнэглэх дэд бүтцийг хөгжүүлэх нь Монгол Улсад цэвэр эрчим хүчний хэрэглээг нэмэгдүүлэх, хотын агаарын бохирдлыг бууруулах, тогтвортой эрчим хүчний системийг хөгжүүлэхэд чухал ач холбогдолтой гэж үзэж байна.**

Түлхүүр үг: Цахилгаан автомашин, EV цэнэглэх систем, сэргээгдэх эрчим хүч, нарны фотоцахилгаан систем, Vehicle-to-Grid (V2G)

I. УДИРТГАЛ

Дотоод шаталтын хөдөлгүүртэй автомашинтай харьцуулахад цахилгаан автомашин (Electric Vehicle, EV) нь хүлэмжийн хийн ялгаруулалт багатай, эрчим хүчний үр ашиг өндөр, дуу чимээ бага зэрэг олон давуу талтай. Тиймээс дэлхий нийтэд тээврийн салбарын нүүрстөрөгчийн ялгарлыг бууруулахад EV хэрэглээг нэмэгдүүлэх нь чухал стратеги болон авч үздэг [1]. Сүүлийн жилүүдэд EV технологийн хөгжил хурдацтай өсөж, олон улс орон цахилгаан тээврийн хэрэгслийг дэмжих бодлого, дэд бүтцийн хөгжлийг идэвхтэй хэрэгжүүлж эхэлсэн [2]. Гэсэн хэдий ч цахилгаан автомашины хэрэглээг өргөжүүлэх гол сорилт нь цэнэглэх дэд бүтэц болон эрчим хүчний эх үүсвэрийн хүртээмжтэй холбоотой. Үүнээс гадна, EV цэнэглэх системийг уламжлалт эрчим хүчний эх үүсвэрт тулгуурлан хөгжүүлэх нь цахилгаан сүлжээний ачааллыг нэмэгдүүлэх, нүүрстөрөгчийн ялгарлыг бүрэн бууруулах боломжийг хязгаарлаж байна. Иймээс EV цэнэглэх системийг сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэртэй уялдуулан хөгжүүлэх нь байгаль орчинд ээлтэй, тогтвортой эрчим хүчний системийг бүрдүүлэхэд чухал ач холбогдолтой гэж судлаачид үздэг [3].

Нарны болон салхины эрчим хүч ашиглан цахилгаан автомашиныг цэнэглэх боломж нь нүүрстөрөгчийн ялгарлыг бууруулах, эрчим хүчний хараат байдлыг багасгах, ногоон технологийг хөгжүүлэхэд хувь нэмэр оруулдаг. Судалгааны үр дүнгээс харахад сэргээгдэх эрчим хүчээр үйлдвэрлэсэн цахилгаанаар цэнэглэгдсэн EV нь уламжлалт түлш хэрэглэдэг автомашинаас харьцангуй бага CO_2 ялгаруулдаг болох нь батлагдсан [4]. Цахилгаан автомашины үндсэн энерги хадгалах систем нь батарей бөгөөд хуримтлагдсан тогтмол гүйдлийн цахилгаан энерги нь инвертерээр дамжин хувьсах гүйдэл болон хувирч, цахилгаан хөдөлгүүрийг ажиллуулахад ашиглагддаг. Орчин үеийн EV системүүдэд тоормослох үед үүсэх кинетик энергийг цахилгаан энерги болгон батарейд хуримтлуулах технологи (regenerative braking) ашигладаг бөгөөд энэ нь эрчим хүчний үр ашгийг нэмэгдүүлэх, системийн бүтээмжийг дээшлүүлэхэд чухал үүрэгтэй [5]. Энэхүү судалгааны зорилго нь Улаанбаатар хотод цахилгаан автомашины цэнэглэх дэд бүтэц, сэргээгдэх эрчим хүчний интеграцийн боломжийг техникийн болон хэрэглэгчийн талаас үнэлэхэд оршино. Түүнчлэн судалгаанд хэрэглэгчийн санал асуулгын арга ашиглан V2G технологи болон сэргээгдэх эрчим хүчээр цэнэглэх системд хэрэглэгчид хэрхэн хандаж, ямар бэрхшээл, давуу талтай гэж үздэгийг тодорхойлсон. Энэхүү арга нь зөвхөн техникийн үзүүлэлтээс гадна хэрэглэгчдийн хандлага, сонирхол, дэд бүтцийн шаардлагыг хамруулан, Монгол Улсад EV дэд бүтцийг хөгжүүлэх бодит боломжийг үнэлэхэд чиглэгдсэн болно.

II. V2G ТЕХНОЛОГИЙН ТАЛААРХ МОНГОЛ ХЭРЭГЛЭГЧДИЙН ОЙЛГОЛТ, ХАНДЛАГА, БЭЛЭН БАЙДЛЫН СУДАЛГАА

Энэхүү судалгаанд Монгол Улсад Vehicle-to-Grid (V2G) технологийг нэвтрүүлэх боломжийг

хэрэглэгчийн ойлголт, хандлагын үүднээс үнэлэх зорилгоор асуулгын судалгааны арга ашигласан. Судалгааны өгөгдлийг онлайн асуулгын хэлбэрээр цуглуулсан бөгөөд нийт N ≈ 150 орчим оролцогч хамрагдсан болно.

Асуулга нь нийт 30 гаруй үзүүлэлт бүхий Лайкертийн шаталбар (1–5) дээр суурилсан бөгөөд дараах үндсэн бүлгүүдэд хуваагдсан:

- Нийгмийн нөлөөлөл (Social influence)
- Байгаль орчны хандлага (Environmental concern)
- Эдийн засгийн ойлголт (Economic perception)
- Техникийн ойлголт ба найдвартай байдал (Technical trust)
- Хэрэглэх хүсэл (Behavioral intention)
- Дэд бүтэц ба бодлогын хүчин зүйл (Infrastructure & policy)

Энэхүү асуулгын бүтэц нь олон улсын судалгаанд өргөн хэрэглэгддэг Technology Acceptance Model болон Unified Theory of Acceptance and Use of Technology загваруудтай уялдсан болно [6]. Тухайлбал:

“Хэрэглэх сонирхол” - Behavioral intention

“Ашигтай байдал” - Perceived usefulness

“Хялбар байдал” - Perceived ease of use

“Нийгмийн нөлөө” - Social influence

“Дэд бүтэц” - Facilitating conditions

Дараах судалгааны үр дүнгийн хүснэгтээс харахад судалгаанд оролцогчдын байгаль орчинд ээлтэй технологийг дэмжих хандлага хамгийн өндөр (4.63) байгаа нь цахилгаан автомашин болон V2G технологийг нэвтрүүлэхэд нийгмийн сэтгэлзүйн эерэг орчин бүрдэж байгааг илтгэж байна. Мөн V2G системийг туршиж үзэх сонирхол өндөр (4.50) байгаа нь хэрэглэгчид шинэ технологийг хүлээн авах бэлэн байдал сайн байгааг харуулж байна.

Үүнээс гадна EV болон V2G технологи нь хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулах, агаарын бохирдлыг багасгахад чухал нөлөөтэй гэж оролцогчид өндөр үнэлсэн (4.13–4.25). Мөн цэнэглэх дэд бүтэц болон ухаалаг сүлжээний ач холбогдлыг өндрөөр үнэлсэн нь (4.13) технологийн нэвтрэлтийн суурь нөхцөл болох дэд бүтцийн хөгжлийг онцолж байна.

V2G ТЕХНОЛОГИЙН ТАЛААРХ ХЭРЭГЛЭГЧДИЙН ХАНДЛАГЫН ҮНЭЛГЭЭ

1-Р ХҮСНЭГТ.

№	Үзүүлэлт	Дундаж үнэлгээ (1–5)	Үнэлгээний түвшин
1	Байгаль орчинд ээлтэй технологийг дэмжих	4.63	Маш өндөр
2	V2G системийг туршиж үзэх сонирхол	4.50	Маш өндөр
3	Агаарын бохирдолд санаа зовнил	4.25	Өндөр
4	EV ба V2G нь CO_2 бууруулна	4.13	Өндөр
5	Цэнэглэх дэд бүтэц чухал	4.13	Өндөр
6	Ухаалаг сүлжээ шаардлагатай	4.13	Өндөр
7	Цэнэглэлтийг удирдах хялбар байдал	4.00	Өндөр
8	Засгийн газрын бодлого чухал	4.00	Өндөр
9	Эдийн засгийн ашигт итгэл	3.38	Дунд
10	Найдвартай байдалд итгэх байдал	3.13	Дунд
11	Нийгмийн орчны дэмжлэг	2.13	Сул
12	Бодлогын дэмжлэгийн ойлголт	1.88	Маш сул
13	Дэд бүтцийн бэлэн байдал	1.75	Маш сул

Гэвч бодит хэрэгжилтийн хувьд дэд бүтцийн бэлэн байдал (1.75), төрийн бодлогын дэмжлэгийн талаарх ойлголт (1.88), нийгмийн орчны хэрэглээ (2.13) зэрэг үзүүлэлтүүд хамгийн сул үнэлгээтэй гарсан нь Монгол Улсад V2G технологийг нэвтрүүлэхэд гол бэрхшээл болж байгааг илэрхийлж байна. Мөн эдийн засгийн үр ашиг (3.38) болон найдвартай байдлын талаарх итгэл (3.13) дунд түвшинд байгаа нь хэрэглэгчид илүү тодорхой мэдээлэл, бодит туршлага шаардлагатайг харуулж байна. Судалгаанаас харахад хэрэглэгчдийн хандлага өндөр байгаа боловч дэд бүтэц болон бодлогын орчин сул байна. Энэ нь олон улсын судалгаатай нийцэж байгаа бөгөөд технологийн нэвтрэлт зөвхөн техникээс бус бодлогоос ихээхэн хамаардаг [6].

Иймд судалгааны үр дүнгээс дүгнэхэд хэрэглэгчдийн хандлага эерэг боловч дэд бүтэц, бодлого, зах зээлийн орчин хангалтгүй байгаа нь V2G технологийн нэвтрэлтийг хязгаарлах үндсэн хүчин зүйл болж байна.

III. ЦАХИЛГААН ТЭЭВРИЙН ХЭРЭГСЛИЙН СУДАЛГАА

Эрчим хүчний зохицуулах хороо болон салбарын судалгааны байгууллагуудын гаргасан мэдээлэлд, дотоодод ашиглагдаж буй цахилгаан автомашинууд 1км зайд дунджаар 0.15-0.2 кВт*ц эрчим хүч хэрэглэдэг бөгөөд нэг удаагийн бүрэн цэнэглэлт нь батарейн багтаамжаас хамааран 30-60 кВт*ц байна. Өдөрт дунджаар 30-40 км зорчих хэрэглээгээр тооцвол цахилгаан автомашин сардаа 150-250 кВт*ц цахилгаан эрчим хүч хэрэглэж байгаа нь ахуйн нэг хэрэглэгчийн хэрэглээтэй ойролцоо түвшинд хүрч байна.

Улсын хэмжээнд цахилгаан автомашины тоо харьцангуй бага боловч нэмэгдэх хандлагатай байгаа бөгөөд 2023 оны байдлаар улсын хэмжээнд 1000 гаруй цахилгаан автомашин бүртгэлтэй байгаагаас дийлэнх хувь нь Улаанбаатар хотод төвлөрч байна. Хотжилт, хүн амын төвлөрөлтэй холбоотойгоор нийслэлд ойролцоогоор 600-700 орчим цахилгаан автомашин ашиглагдаж байгаа нь газарзүйн хувьд эрчим хүчний хэрэглээний төвлөрсөн ачааллыг үүсгэж байгаа юм. Улсын хэмжээнд 70 орчим

цэнэглэх байгууламж, нийслэлд 8 орчим станц ажиллаж байгаа нь цаашдын эрэлт хэрэгцээг бүрэн хангах боломжгүй үзүүлэлт юм. Иймээс цахилгаан автомашины хэрэглээг тогтвортой хөгжүүлэхийн тулд сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэртэй уялдуулан интеграцчлах шаардлагатай болж байна [7].

Мөн эрчим хүчний хамаарал Орос болон Хятадаас хамааралтай байдаг ба машин цэнэглэх дэд бүтцийг байгуулахад хүндрэлтэй гэж хэрэглэгчид ойлгодог. Тийм ч учраас цахилгаан автомашины дэд бүтцийг сэргээгдэх эрчим хүчээр шийдэх шаардлагатай гэж үзэж байна.

Цахилгаан автомашин ашиглах нь дотоод шаталтат хөдөлгүүртэй автомашиныг ашиглахаас хамаагүй бага тул туслах дэд бүтцийн бүтээн байгуулалтыг нэмэгдүүлэх шаардлагатай байна. Хятадад цэнэглэх байгууламжийн бүтээн байгуулалт, стандартчиллын явц хоцрогдсон нөхцөлд цэнэглэх нь цахилгаан тээврийн хэрэгслүүдэд тулгардаг томоохон хүндрэл юм. Олон нийтийн цэнэглэх станц дутмаг, янз бүрийн тээврийн хэрэгсэл үйлдвэрлэгчид, цэнэглэх станц үйлдвэрлэгчид болон цэнэглэх үйлчилгээний операторуудын хоорондын нийцгүй байдал нь цахилгаан тээврийн хэрэгслийн хөдөлгөөнд ихээхэн нөлөө үзүүлдэг.

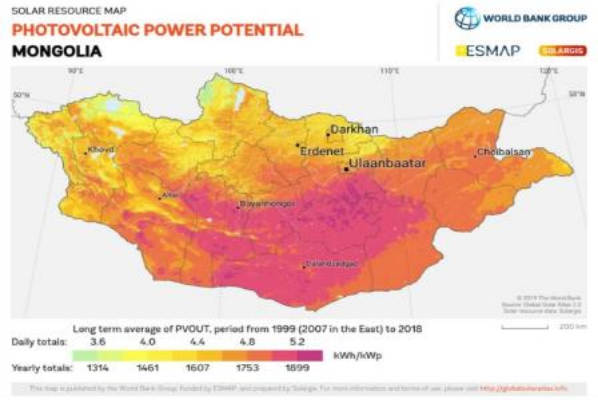
ZDWL компанийн судалгаагаар цахилгаан автомашины цэнэглэх дэд бүтэц нь зөвхөн цэнэглэх байгууламжаас бус дэд станц, ухаалаг удирдлага, ачаалал хуваарилалтын систем бүхий иж бүрэн шийдэл байх шаардлагатай гэж үзсэн ба өндөр чадлын цэнэглэлт нь уламжлалт түгээх сүлжээнд шууд тохирдоггүй байна. Энэ нь Монгол улсад EV дэд бүтэц цаашид системийн түвшний шинэчлэл хийх шаардлагатай гэдгийг техникийн хувьд баталж байгаа билээ.



1-р зураг. EV цэнэглэх станц

IV. СЭРГЭЭГДЭХ ЭРЧИМ ХҮЧ АШИГЛАСАН EV ЦЭНЭГЛЭХ БАЙГУУЛАМЖ

Иим системийн үндсэн зорилго нь цахилгаан автомашиныг цэвэр эх үүсвэрээр цэнэглэх, төвлөрсөн цахилгаан сүлжээний ачааллыг бууруулах, мөн орон нутгийн түвшинд бие даасан цэнэглэх боломжийг бий болгоход оршино. Монгол Улс нарны цацрагийн нөөц ихтэй тул EV цэнэглэх байгууламжийг нарны фотоцахилгаан (PV) системтэй хослуулах нь үр дүнтэй гэж үзэж байна.



2-р зураг. Нарны эрчим хүчинд суурилсан EV цэнэглэх систем

Цахилгаан тээврийн хэрэгслийн хамгийн чухал бүрэлдэхүүн хэсэг нь энерги хадгалах систем болох батарей юм. Батарейн гүйцэтгэл, энергийн нягтрал, ашиглалтын хугацаа болон аюулгүй ажиллагаа нь цахилгаан автомашины нийт ажиллагаа, зай туулах чадвар, найдвартай байдалд шууд нөлөөлдөг. Цахилгаан автомашины батарейн технологи нь системийн гүйцэтгэлд гол нөлөө үзүүлдэг. Орчин үед литийн ион батарей өргөн хэрэглэгдэж байгаа бөгөөд LFP батарей нь аюулгүй байдал, урт насжилтаараа давуу талтай [7]. Мөн хатуу электролит болон натрийн ион батарей нь ирээдүйд өргөн хэрэглэгдэх боломжтой технологиуд гэж үзэж байна [8].

V. СЭРГЭЭГДЭХ ЭРЧИМ ХҮЧ АШИГЛАСАН EV ЦЭНЭГЛЭХ БАЙГУУЛАМЖ

Иим системийн үндсэн зорилго нь цахилгаан автомашиныг цэвэр эх үүсвэрээр цэнэглэх, төвлөрсөн цахилгаан сүлжээний ачааллыг бууруулах, мөн орон нутгийн түвшинд бие даасан цэнэглэх боломжийг бий болгоход оршино. Монгол Улс нарны цацрагийн нөөц ихтэй тул EV цэнэглэх байгууламжийг нарны фотоцахилгаан (PV) системтэй хослуулах нь үр дүнтэй гэж үзэж байна. Нарны эрчим хүчинд суурилсан EV цэнэглэх систем нь дараах үндсэн бүрэлдэхүүн хэсгүүдээс бүрдэнэ. Үүнд PV хавтан, MPPT хянагч, аккумлятор батарей, инвертер, EV цэнэглэгч болон хяналт, хэмжилтийн төхөөрөмжүүд орно. Сэргээгдэх эрчим хүч дээр суурилсан EV цэнэглэх байгууламж нь дараах давуу талуудтай.

- Тогтвортой эрчим хүчний хангамж: Нар болон салхины сэргээгдэх эх үүсвэрийг ашигласнаар уламжлалт эрчим хүчнээс хараат байдлыг бууруулна.
- Эрчим хүчний үр ашигтай менежмент: MPPT хянагч болон хяналтын системүүд нь эрчим хүчний ашиглалтыг оновчтой болгодог.
- Энергийн хуримтлал: Илүүдэл үйлдвэрлэгдсэн энергийг батарейд хадгалж, эрчим хүчний хэрэглээний оргил үед ашиглах боломжтой.
- Байгаль орчинд ээлтэй: Нүүрстөрөгчийн ялгарлыг бууруулж, тогтвортой хөгжлийг дэмжинэ.

Иймээс Монгол Улсад EV дэд бүтцийг хөгжүүлэхдээ сэргээгдэх эрчим хүчний эх үүсвэрийг нэвтрүүлэх, V2G технологийг үе шаттайгаар хэрэгжүүлэх, бодлогын болон дэд бүтцийн дэмжлэгийг нэмэгдүүлэх нь цэвэр эрчим хүчний хэрэглээг өсгөх, хотын агаарын бохирдлыг бууруулах, тогтвортой эрчим хүчний системийг хөгжүүлэхэд бодит хувь нэмэр оруулах боломжтой.

Иймээс Монгол Улсад тогтвортой эрчим хүчний системийг хөгжүүлэхэд чухал ач холбогдолтой юм.

VI. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар Монгол Улсад сэргээгдэх эрчим хүчээр суурилсан цахилгаан автомашины (EV) цэнэглэх систем болон Vehicle-to-Grid (V2G) технологийг техникийн ба хэрэглэгчийн хандлагын үүднээс үнэлэв. Судалгааны үр дүнгээс харахад EV хэрэглээ нэмэгдэж байгаа боловч цэнэглэх дэд бүтцийн хүртээмж хязгаарлагдмал байгаа нь өргөн хэрэглээг сааруулж байна. Нөгөө талаас хэрэглэгчдийн байгаль орчинд ээлтэй технологийг дэмжих хандлага өндөр бөгөөд V2G болон PV системтэй EV цэнэглэх дэд бүтцийн нэвтрэлт нь агаарын бохирдол, хүлэмжийн хийн ялгарлыг бууруулахад чухал нөлөөтэйг харуулсан. Литийн ион, ялангуяа литийн төмрийн фосфат (LFP) батарей нь аюулгүй, урт насжилттай, өндөр үр ашигтай тул EV болон эрчим хүчний хуримтлуулалтын системд өргөн ашиглах боломжтой. Цаашид хатуу электролит, натрийн ион батарей зэрэг шинэ технологиуд хөгжих нь EV системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх боломжийг бүрдүүлнэ. Нарны фотоцахилгаан системтэй хосолсон EV цэнэглэх дэд бүтцийн хөгжүүлэлт нь техник-эдийн засгийн хувьд боломжтой бөгөөд өдрийн цагаар үйлдвэрлэсэн эрчим хүчийг шууд автомашины батарейд дамжуулах, илүүдэл энергийг хуримтлуулах, цахилгаан сүлжээний ачааллыг бууруулах давуу талтай. Мөн V2G технологи нь ухаалаг сүлжээний уян хатан байдлыг нэмэгдүүлж, цахилгаан тээврийн системийг илүү тогтвортой, үр ашигтай болгодог.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] A. J. Alrubaie, M. Salem, K. Yahya, M. Mohamed, and M. Kamarol, “A comprehensive review of electric vehicle charging stations with solar photovoltaic system considering market, technical requirements, network implications, and future challenges,” *Sustainability*, vol. 15, no. 10, art. 8122, May 2023.

[2] “Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches,” *Renew. Sust. Energy Rev.*, vol. 183, art. 113518, Sept. 2023.

[3] “Vehicle-to-grid enabled charging infrastructure planning and operations considering demand uncertainties,” *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 127, art. 103918, Feb. 2024.

[4] A. ur Rehman, H. M. Khalid, and S. M. Muyeen, “Grid-integrated solutions for sustainable EV charging: a comparative study of renewable energy and battery storage systems,” *Front. Energy Res.*, vol. 12, art. 1403883, Sept. 2024.

[5] R. Rana, T. S. Saggu, S. S. Letha, et al., “V2G based bidirectional EV charger topologies and its control techniques: a review,” *Discover Appl. Sci.*, vol. 6, art. 588, Nov. 2024.

[6] J. Ru, M. Gillott, and R. Shipman, “Vehicle-to-Grid (V2G) research: a decade of progress, achievements, and future directions,” *Energies*, vol. 18, no. 23, art. 6148, Nov. 2025.

[7] “Impact of EV interfacing on peak-shelving and frequency regulation in a microgrid,” *Sci. Rep.*, vol. 14, art. 31514, 2024.

[8] Jiashun Li and Aixing Li, “Optimizing electric vehicle integration with vehicle-to-grid technology: the influence of price difference and battery costs on adoption, profits, and green energy utilization,” *Sustainability*, vol. 16, no. 3, art. 1118, Jan. 2024.

[9] “Integrating solar-powered electric vehicles into sustainable energy systems,” *Nature Rev. Elect. Eng.*, vol. 2, pp. 467–479, June 2025.

[10] S. Vendoti et al., “Grid tied hybrid PV fuel cell system with energy storage and ANFIS based MPPT for smart EV charging,” *Sci. Rep.*, vol. 15, art. 27392, July 2025.

[11] “Smart charging and vehicle-to-grid integration of electric vehicles: technical insights, cybersecurity risks, and mobility-oriented control strategies,” *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 4, art. 1748, Feb. 2026.

[12] A. Alrubaie, M. Khalid, H. Alazemi, “Assessment of Vehicle-to-Grid Adoption and User Acceptance in Emerging Markets,” *Sustainability*, vol. 15, no. 6, pp. 5120, Mar. 2023.

НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРЭЭР ШУУД ТЭЖЭЭГДДЭГ ТОГТМОЛ ГҮЙДЛИЙН ДИОДОН ХАЛААГУУР

Батхүүгийн ЭРХЭМБАЯР[1], Гансүхийн МӨНГӨНШАГАЙ[2]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Шинэ, сэргээгдэх эрчим хүчний тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: berhem829@gmail.com[1], mungunshagai@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Энэхүү судалгаагаар нарны цахилгаан үүсгүүрээр шууд тэжээгддэг тогтмол гүйдлийн диодон халаагуурын ажиллагааг онолын болон туршилтын аргаар судлав. Уламжлалт нарны цахилгаан халаалтын системд нарны цахилгаан үүсгүүрээс гарсан энергийг цэнэг хянагч, батарей, инвертер зэрэг завсрын төхөөрөмжөөр дамжуулан хэрэглээнд хүргэдэг бол энэхүү ажилд уг энергийг диодон халаагуурт шууд өгч, дулаан хуримтлуурт дамжуулах боломжийг авч үзсэн. Судалгаанд диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл–хүчдэлийн шинж чанар, ажиллах цэг, дулаан ялгаруулалтын онцлогийг харьцуулан судалсан. Диодон халаагуурын температурын хугацааны өөрчлөлтийг 0.71–1.93 В хүчдэлийн мужид туршихад хүчдэл өсөхийн хэрээр температурын өсөлтийн хурд болон тогтворжсон температурын түвшин нэмэгдэж байв. Мөн 9 В, 130 мА үзүүлэлттэй нарны цахилгаан үүсгүүр дээр 11 диод бүхий диодон халаагуур болон 70 Ом эсэргүүцэлтэй эсэргүүцлэн халаагуурыг ижил нөхцөлд харьцуулж, хүчдэл, гүйдэл, чадал, 50 мл усны температурын өөрчлөлтийг хугацааны явцад хэмжсэн. Туршилтын үр дүнгээс харахад нарны эрчим өндөр үед хоёр халаагуурын чадал ойролцоо байсан бол нарны эрчим буурсан 40–60 дахь минутын мужид диодон халаагуурын чадал 0.408–0.621 Вт, эсэргүүцлэн халаагуурын чадал 0.037–0.110 Вт байв. Туршилтын төгсгөлд диодон халаагуурын ус халаах температурын өсөлт эсэргүүцлэн халаагууранс 3.1 °C-аар өндөр байсан. Эдгээр үр дүн нь диодон халаагуур хувьсах гэрэлтүүлгийн нөхцөлд нарны цахилгаан үүсгүүртэй илүү зохимжтой ажиллах боломжтойг харуулж байна.**

Түлхүүр үг: нарны цахилгаан үүсгүүр, диодон халаагуур, ажиллах цэг, гүйдэл-хүчдэлийн муруй

I. УДИРТГАЛ

Сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээ дэлхий даяар эрчимтэй өсөж, ялангуяа нарны цахилгаан үүсгүүрийг ахуйн болон бага чадлын хэрэглээнд ашиглах сонирхол нэмэгдэж байна. Нарны цахилгаан үүсгүүрийн давуу тал нь нарны цацрагийн энергийг шууд цахилгаан энергид хувиргах боломжтой, ашиглалтын явцад түлш шаардахгүй, байгаль орчинд ээлтэй эх үүсвэр болох явдал юм. Иймээс нарны цахилгаан үүсгүүрийг гэрэлтүүлэг, жижиг чадлын цахилгаан хэрэглэгч, ус халаалт, халаалтын систем зэрэг олон төрлийн хэрэглээнд ашиглах боломжийг эрчимтэй судалж байна.

Уламжлалт байдлаар нарны цахилгаан үүсгүүрээс гарсан энергийг шууд халаалтад ашиглахгүй, эхлээд цэнэг зохицуулагч, батарей, инвертер зэрэг завсрын төхөөрөмжөөр дамжуулан боловсруулж хэрэглэгчид хүргэдэг. Ийм бүтэц нь эрчим хүчийг хуримтлуулах, тогтворжуулах давуу талтай боловч өртөг өндөр, хийц төвөгтэй, мөн хувиргалтын шат бүр дээр тодорхой хэмжээний алдагдал үүсдэг сул талтай. Ялангуяа бага чадлын халаалтын хэрэглээнд батарей, инвертер зэрэг төхөөрөмж нь системийн нийт өртгийг үлэмж нэмэгдүүлж, нарны цахилгаан үүсгүүрээс гарсан энергийг шууд ашиглах боломжийг хязгаарладаг.

Харин хагас дамжуулагч диод дээр суурилсан халаагуур нь шугаман бус гүйдэл–хүчдэлийн хамааралтай тул нарны цахилгаан үүсгүүртэй өөр ажиллах горим үүсгэх боломжтой. Диодыг холбох үед түүний хүчдэлийн уналтад үндэслэн цахилгаан энергийн тодорхой хэсэг дулаан болон ялгардаг. Олон диодыг цуваа холбосноор нарны цахилгаан үүсгүүрийн ажиллах хүчдэлийн мужид тохирох ачаалал үүсгэж, улмаар энергийг шууд дулаан хуримтлуурт дамжуулах боломж бүрдэнэ. Ийм систем нь хийцийн хувьд энгийн, батарей болон инвертергүйгээр ажиллах боломжтой, мөн хувьсах гэрэлтүүлгийн нөхцөлд нарны цахилгаан үүсгүүртэй илүү зохимжтой ажиллах магадлалтайгаараа онцлог юм.

Иймээс энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь бага чадлын нарны цахилгаан үүсгүүрээр шууд тэжээгддэг тогтмол гүйдлийн диодон халаагуурын ажиллагааг онолын болон туршилтын аргаар судалж, уламжлалт эсэргүүцлэн халаагууртай харьцуулахад оршино. Үүний хүрээнд диодон халаагуурын температур–хүчдэлийн хамаарал, гүйдэл–хүчдэлийн шинж чанар, ажиллах цэгийн онцлог, мөн бодит ус халаалтын үр дүнг туршилтаар тодорхойлж, хувьсах гэрэлтүүлгийн нөхцөлд диодон халаагуурын давуу болон сул талыг үнэлэхийг зорьсон.

II. НАРНЫ ЦАХИЛГААН ҮҮСГҮҮРЭЭР ТЭЖЭЭГДДЭГ ЦАХИЛГААН ХАЛААГУУРЫН ЕРӨНХИЙ ОЙЛГОЛТ

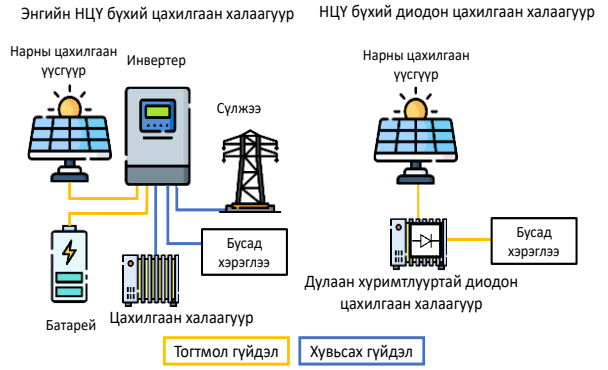
Нарны цахилгаан үүсгүүрээр тэжээгддэг цахилгаан халаагуур нь нарны цацрагийн энергийг цахилгаан энергид хувиргаж, уг энергийг дулаан үүсгэх зориулалтаар ашигладаг систем юм. Ийм төрлийн халаалтын систем нь сэргээгдэх эрчим хүчийг шууд ашиглах боломжтой бөгөөд бага чадлын ахуйн хэрэглээ, ус халаалт, дулаан хуримтлал зэрэг хэрэглээнд тохиромжтой байдаг.

Ерөнхийдөө цахилгаан халаагуур нь цахилгаан энергийг дулааны энергид хувиргах зарчимд тулгуурлан ажилладаг. Үүнд эсэргүүцлэн халаагуур хамгийн өргөн хэрэглэгддэг бол сүүлийн жилүүдэд хагас дамжуулагч элементэд суурилсан халаах аргуудыг мөн судлах болсон. Нарны цахилгаан үүсгүүртэй хослуулсан тохиолдолд халаагуурын

ажиллагаа нь зөвхөн халаах элементийн шинж чанараас бус, мөн нарны эрчим, ажиллах хүчдэл, гүйдлийн нөхцөлөөс шууд хамаардаг.

1. Уламжлалт болон шууд холболттой халаалтын системийн харьцуулалт

Нарны цахилгаан үүсгүүрт суурилсан уламжлалт халаалтын системд нарны цахилгаан үүсгүүрээс гарсан цахилгаан энергийг ихэвчлэн цэнэг зохицуулагч, батарей, инвертер зэрэг завсрын төхөөрөмжөөр дамжуулсны дараа халаагуурт өгдөг. Ийм бүтэц нь энергийг хуримтлуулах, хүчдэл тогтворжуулах давуу талтай боловч системийн өртөг өсөх, хийц төвөгтэй болох, мөн хувиргалтын шат бүр дээр алдагдал үүсэх сул талтай [1].



1-р зураг. Уламжлалт болон шууд холболттой халаалтын системийн схем

Харин шууд холболттой системд нарны цахилгаан үүсгүүрээс гарсан энергийг завсрын өндөр өртөгтэй төхөөрөмжгүйгээр шууд халаах элементэд өгч, дулаанд хувиргадаг. Энэ арга нь системийн бүтцийг хялбаршуулах, өртгийг бууруулах, хувиргалтын алдагдлыг багасгах давуу талтай. Гэвч ийм тохиолдолд ачааллын шинж чанар маш чухал болдог. Хэрэв ачаалал нарны цахилгаан үүсгүүрийн ажиллах мужид тохирохгүй бол үүсгүүрийн чадлыг бүрэн ашиглах боломжгүй.Иймээс шууд холболттой халаалтын системийн үр ашиг нь зөвхөн нарны цахилгаан үүсгүүрээс бус, мөн халаах элементийн гүйдэл–хүчдэлийн шинж чанараас ихээхэн шалтгаална [2].

2. Диодон халаагуурын онцлог судалгааны үндэслэл болон шинэлэг тал

Диодон халаагуур нь хагас дамжуулагч диодуудыг цуваа холбож, тэдгээрийн дамжуулах үеийн хүчдэлийн уналтад үндэслэн цахилгаан энергийг дулаан болгон хувиргах ачаалал юм. Уламжлалт эсэргүүцлэн халаагуур нь шугаман ачааллын шинжтэй байдаг бол диодон халаагуур нь шугаман бус гүйдэл–хүчдэлийн хамааралтай. Иймээс нарны цахилгаан үүсгүүртэй холбогдох үед эдгээр хоёр ачааллын ажиллах цэг өөр өөрөөр тогтдог.

Диодон халаагуурын гол онцлог нь нарны эрчим өөрчлөгдөх үед, ялангуяа бага гэрэлтүүлгийн нөхцөлд нарны цахилгаан үүсгүүртэй илүү зохимжтой ажиллах боломжтойд оршино. Өөрөөр хэлбэл нарны эрчим өндөр үед диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын ялгаа бага байж болох боловч нарны эрчим буурахад диодон халаагуурын шингээх чадал харьцангуй өндөр хадгалагдах боломжтой.

Энэхүү судалгааны шинэлэг тал нь диодын цуваа ачааллыг нарны цахилгаан үүсгүүртэй шууд холбох үед бага чадлын халаалтын хэрэглээнд ашиглах боломжийг онолын болон туршилтын түвшинд үнэлсэнд оршино. Олон улсын өмнөх судалгаанд диодын гинжийг нарны цахилгаан үүсгүүртэй шууд холбон дулаан гарган авах боломжийг авч үзсэн боловч эдгээр нь голчлон хоол хийх болон дулаан хуримтлуулах хэрэглээнд төвлөрсөн байна. Тухайлбал, Gius нарын судалгаанд цуваа холбогдсон диодон халаагуур нь хувьсах нарны эрчимд эсэргүүцлэн халаагуураас илүү их энерги шингээх боломжтойг харуулсан[3] боловч ахуйн орчны халаалтын зориулалтаар бага чадлын түвшинд тусгайлан авч үзээгүй байна. Харин энэхүү ажилд диодон халаагуурын гүйдэл–хүчдэлийн шинж, ажиллах цэг, халалтын нөлөө, мөн эсэргүүцлэн халаагууртай ижил нөхцөлд хийсэн харьцуулсан туршилтын үр дүнг нэгтгэн авч үзсэн. Өөрөөр хэлбэл, энэхүү судалгаа нь диодон халаагуур ахуйн бага чадлын халаалтын системд хэрэглэх онолын боломж байгааг жижиг зарчмын туршилтаар баталж, цаашид ахуйн халаалтын систем болгон өргөжүүлэн судлах үндэслэл бүрдүүлснээрээ онцлог юм.

III. ТУРШИЛТАД АШИГЛАСАН СИСТЕМИЙН ОНОЛЫН ҮНДЭС

Энэхүү судалгаанд нарны цахилгаан үүсгүүрээр тэжээгдсэн хоёр төрлийн халаагуурын ачааллыг харьцуулан судалсан. Үүнд уламжлалт эсэргүүцлэн халаагуур болон хагас дамжуулагч диод дээр суурилсан диодон халаагуур багтана. Эдгээр халаагуурын ажиллагааг тодорхойлохын тулд нарны цахилгаан үүсгүүр болон ачааллуудын гүйдэл–хүчдэлийн шинж чанарыг онолын үндэстэйгээр авч үзэх шаардлагатай. Нарны цахилгаан үүсгүүрийг тодорхой ачаалалд холбох үед системийн бодит ажиллах хүчдэл ба гүйдэл нь үүсгүүрийн гүйдэл-хүчдэлийн муруй болон ачааллын гүйдэл-хүчдэлийн муруйн огтлолцох цэгээр тодорхойлогддог.

1. Нарны цахилгаан үүсгүүрийн гүйдэл-хүчдэлийн шинж чанар

Нарны цахилгаан үүсгүүр нь нарны цацрагийн энергийг шууд цахилгаан энергид хувиргах фотоцахилгаан төхөөрөмж юм. Фотоцахилгаан элементийн цахилгаан шинж чанарыг ихэвчлэн нэг диодын эквивалент загвараар тодорхойлдог. Нарны цахилгаан үүсгүүрийн гүйдэл–хүчдэлийн хамаарлыг дараах тэгшитгэлээр илэрхийлнэ .

$$I = I_{Ph} - I_0\left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1\right) - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \qquad (1)$$

Энд:

I = үүсгүүрийн гаралтын гүйдэл,

I_{ph} = нарны цацрагаас үүсэх фото гүйдэл,

I_0 = диодын ханалтын гүйдэл,

V = үүсгүүрийн гаралтын хүчдэл,

R_s = цуваа эсэргүүцэл

R_{sh} = зэрэгцээ эсэргүүцэл

q = электроны цэнэг ($1.6 \cdot 10^{-19}$ С),

k = Больцманы тогтмол ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Ж/К),

T = абсолют температур (К),

n = диодын идеал коэффициент,

Нарны цахилгаан үүсгүүрийн гүйдэл-хүчдэлийн муруй нь богино холболтын гүйдэл (I_{sc}) болон нээлттэй хэлхээний хүчдэл (V_{oc}) гэсэн хоёр үндсэн параметрээр хязгаарлагддаг. Харин хамгийн их чадлын цэг (V_{mp}, I_{mp}) дээр үүсгүүрийн гаргах чадал хамгийн их утгад хүрдэг [4].

2. Эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл–хүчдэлийн шинж чанар

Эсэргүүцлэн халаагуур нь цахилгаан гүйдэл эсэргүүцэл бүхий орчноор дамжин өнгөрөх үед дулаан ялгаруулах зарчимд тулгуурлан ажилладаг төхөөрөмж юм. Энэ үзэгдлийг Жоулийн дулааны эффект гэж нэрлэдэг [5] бөгөөд цахилгаан гүйдэл дамжих үед цахилгаан энерги дулааны энергид хувирдаг [6].

Эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл–хүчдэлийн хамаарал нь Омын хуулиар тодорхойлогдоно .

$$I = \frac{V}{R} \ , \qquad (2)$$

Эсэргүүцлэн ачааллын үед ялгарах дулааны чадлыг Жоулийн хуулиар дараах байдлаар илэрхийлнэ .

$$P = I^2 \cdot R \ , \qquad (3)$$

Энд:

P = ялгарах дулааны чадал ,

I = гүйдэл,

V = хүчдэл,

R = эсэргүүцэл,

Эсэргүүцлэн ачааллын гүйдэл–хүчдэлийн муруй нь координатын эх цэгээс эхэлсэн шулуун шугам хэлбэртэй байдаг. Иймээс хүчдэл нэмэгдэхэд гүйдэл пропорциональ байдлаар өсдөг. Эсэргүүцлийн утга өөрчлөгдөхөд энэхүү шулуун шугамын налуу өөрчлөгдөнө [7].

Нарны цахилгаан үүсгүүрийг эсэргүүцлэн халаагууртай холбох үед системийн бодит ажиллах цэг нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн гүйдэл-хүчдэлийн муруй болон эсэргүүцлэн ачааллын шулуун муруйн огтлолцох цэгээр тодорхойлогдоно. Энэ цэг дээр нарны цахилгаан үүсгүүрийн гаралтын хүчдэл болон гүйдэл тогтож, улмаар халаагуурт ялгарах дулааны чадал тодорхойлогддог [8].

3. Диодон халаагуурын гүйдэл–хүчдэлийн шинж чанар

Диодон халаагуур нь хагас дамжуулагч диодуудыг цуваа холбож үүсгэсэн цахилгаан ачаалал бөгөөд диодын дамжуулах үеийн хүчдэлийн уналтаас шалтгаалан дулаан ялгаруулах зарчимд тулгуурлан ажилладаг. Хагас дамжуулагч диод нь p–n холбоосоос тогтдог бөгөөд урагш чиглэлд хүчдэл өгөхөд гүйдэл дамжуулж, энэ үед цахилгаан энергийн тодорхой хэсэг дулааны энергид хувирдаг. Диодын гүйдэл–хүчдэлийн хамаарлыг ерөнхийд нь дараах тэгшитгэлээр илэрхийлнэ.

$$I = I_s(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1) \ , \qquad (4)$$

Энд:

I = диодоор гүйх гүйдэл,

I_s = ханалтын гүйдэл,

V = диод дээрх хүчдэл,

n = диодын идеал коэффициент,

V_T = дулааны хүчдэл,

Диодын гүйдэл–хүчдэлийн муруй нь шугаман бус шинжтэй байдаг. Өөрөөр хэлбэл, хүчдэл бага мужид гүйдэл маш бага байх боловч тодорхой босго хүчдэлд хүрснээс хойш гүйдэл огцом өсдөг онцлогтой. Иймээс диодон ачааллын гүйдэл-хүчдэлийн муруй нь эсэргүүцлэн ачааллын шулуун муруйгаас ялгаатай, экспоненциал хэлбэртэй байна [9].

Олон диодыг цуваа холбох үед нийт хүчдэлийн уналт нь тус бүрийн диодын хүчдэлийн уналтын нийлбэртэй тэнцүү байна. Иймд диодын тоо нэмэгдэхийн хэрээр нийт ачааллын хүчдэлийн шаардлага өсөж, нарны цахилгаан үүсгүүрийн ажиллах хүчдэлийн мужид тохируулан сонгох боломж бүрддэг.

Хэрэв диодууд ижил шинж чанартай гэж үзвэл, ийм төрлийн ачааллын үед нийт ялгарах дулааны чадал нь цуваа холбогдсон бүх диод дээр хуваарилагдана. Тиймээс диодон халаагуур нь энгийн бүтэцтэй, тогтмол гүйдлийн эх үүсвэрт шууд холбох боломжтой халаах элемент болж ашиглагдаж болно.

4.Нарны цахилгаан үүсгүүр ба халаагуурын ажиллах цэг

Нарны цахилгаан үүсгүүрийг халаагууртай холбох үед системийн ажиллагаа нь зөвхөн үүсгүүрийн чадлаас бус, мөн ачааллын цахилгаан шинж чанараас шууд хамаардаг. Өөрөөр хэлбэл, нарны цахилгаан үүсгүүрийн гаргах хүчдэл, гүйдэл нь тогтмол утгатай байдаггүй бөгөөд түүнд холбогдсон халаагуурын төрлөөс шалтгаалан өөрчлөгдөнө [10]. Иймээс системийн бодит ажиллах нөхцөлийг тодорхойлоход ажиллах цэг гэсэн ойлголт чухал ач холбогдолтой.

Ажиллах цэг гэдэг нь нарны цахилгаан үүсгүүр болон ачааллын цахилгаан шинж чанар хоорондоо

тохирч байгаа хүчдэл, гүйдлийн утгыг хэлнэ. Энэ цэг дээр үүсгүүрээс гарч буй цахилгаан энерги ачаалалд дамжиж, систем тогтвортой ажиллана [11]. Хэрэв ачааллын шинж чанар өөрчлөгдвөл ажиллах цэг мөн өөрчлөгдөж, үүсгүүрийн гаргах чадал болон халаагуурт ялгарах дулаан өөр болно.

Эсэргүүцлэн халаагуурын хувьд гүйдэл–хүчдэлийн хамаарал нь шугаман байдаг тул түүний ажиллах цэгийг тодорхойлоход харьцангуй хялбар байдаг. Харин диодон халаагуурын хувьд гүйдэл–хүчдэлийн хамаарал нь шугаман бус, өөрөөр хэлбэл хүчдэл тодорхой хэмжээнд хүрсний дараа гүйдэл огцом өсдөг онцлогтой. Иймээс диодон халаагууртай системийн ажиллах цэг нь эсэргүүцлэн халаагууртай системээс өөр нөхцөлд тогтоно [12].

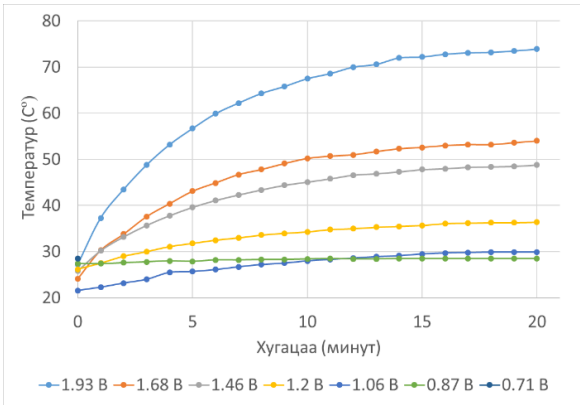
Энэхүү судалгаанд эсэргүүцлэн болон диодон халаагуурын ажиллах цэгийг нарны цахилгаан үүсгүүрийн шинж чанартай уялдуулан авч үзсэн. Ингэснээр тухайн ачаалал бүрийн үед систем ямар хүчдэл, гүйдлийн нөхцөлд ажиллаж байгааг тодорхойлох, мөн аль тохиолдолд илүү их дулаан ялгарах боломжтойг үнэлэх үндэс бүрдэнэ. Иймээс ажиллах цэгийн шинжилгээ нь нарны цахилгаан үүсгүүрээр тэжээгдсэн халаагуурын ажиллагааг онолын хувьд тайлбарлах гол үндэс болдог.

IV. ДИОДОН ХАЛААГУУР БА ЭСЭРГҮҮЦЛЭН ХАЛААГУУРЫН ТУРШИЛТ, ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

Энэхүү бүлэгт диодон халаагуурын дулааны төлөв, температурын өсөлтийн явц, мөн нарны цахилгаан үүсгүүртэй холбогдсон үед диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын ажиллах нөхцөлийн ялгааг туршилтын үр дүнд тулгуурлан авч үзэв. Судалгааны хүрээнд хоёр төрлийн туршилт хийсэн. Нэгдүгээрт, диодон халаагуурын температур хугацааны явцад хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг тодорхойлох туршилт гүйцэтгэсэн. Хоёрдугаарт, нарны цахилгаан үүсгүүрийн ижил нөхцөлд диодон халаагуур болон эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл, гүйдэл, чадлыг харьцуулсан.

1. Диодон халаагуурын температур өсөлтийн туршилт

Диодон халаагуурын дулааны ажиллагааг үнэлэх зорилгоор тогтмол хүчдэлийн хэд хэдэн горимд температурын хугацааны өөрчлөлтийг туршилтаар судлав. Туршилтыг 0.71 В-оос 1.93 В хүртэлх хүчдэлийн мужид явуулж, хүчдэл бүр дээр диодон халаагуурын температурыг 20 минутын турш хэмжсэн. Энэхүү туршилтын зорилго нь диодон халаагуурын температурын өсөлтийн хурд, тогтворжих хугацаа, мөн тогтворжсон температурын түвшний ялгааг тодорхойлоход оршино.



2-р зураг. Диодон халаагуурын температур хүчдэлийн хамаарамж (0.71 В - 1.93 В, тогтмол хүчдэлд температур хугацаанаас хамааруулан хэрхэн өөрчлөгдөхийг харуулна)

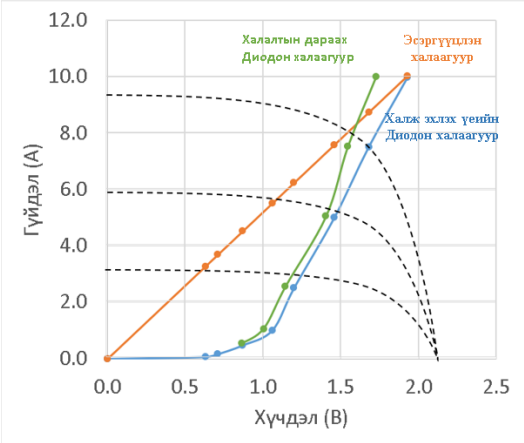
2-р зураг-аас харахад хүчдэл ихсэхийн хэрээр диодон халаагуурын температурын өсөлт мэдэгдэхүйц нэмэгдэж байна. Хамгийн өндөр хүчдэл болох 1.93 В үед температур эхний хэдэн минутад огцом өсөж, ойролцоогоор 27 °C-аас 74 °C хүртэл нэмэгдсэн байна. Өөрөөр хэлбэл нийт температурын өсөлт 47 °C орчим байв. Харин 1.68 В үед температур 26–27 °C-аас 54 °C орчимд хүрч, нийт өсөлт 27–28 °C, 1.46 В үед 26 °C-аас 49 °C орчимд хүрч, өсөлт 23 °C орчим байсан байна. Үүнээс бага хүчдэлийн горимуудад температурын өсөлт мэдэгдэхүйц буурч, 1.20 В үед температур 36 °C орчим, 1.06 В үед 30 °C, 0.87 В болон 0.71 В үед температурын өсөлт харьцангуй бага, бараг орчны температуртай ойролцоо түвшинд хадгалагдаж байна. Мөн графикаас температурын өсөлтийн хурд хүчдэлээс хүчтэй хамаарч байгааг харж болно. 1.93 В хүчдэлийн үед эхний 5 минутын дотор температур ойролцоогоор 55–57 °C хүрсэн бол 1.68 В үед 43 °C, 1.46 В үед 40 °C орчимд хүрчээ. Энэ нь хүчдэл их байх үед диодон халаагуурын эхний халаалтын үе илүү эрчимтэй явагдаж байгааг харуулж байна. Харин 1.06 В, 0.87 В, 0.71 В зэрэг бага хүчдэлийн горимуудад температурын өсөлт удаан, налуу багатай байгаа нь диод дээр ялгарах чадал бага байгаатай холбоотой.

Графикийн муруйнуудаас харахад өндөр хүчдэлийн горимуудад температур эхний үед хурдан өсөөд, дараа нь аажмаар тогтворжих хандлага ажиглагдаж байна. Тухайлбал 1.93 В үед 15–20 минутын хооронд температурын өөрчлөлт бага болж, 72–74 °C мужид тогтворжсон байна. Үүнтэй адил 1.68 В болон 1.46 В хүчдэлийн үед ч өсөлтийн хурд аажмаар буурч, тодорхой температурын түвшинд ойртон тогтворжиж байна. Энэ нь диодон халаагуур дээр үүсэж буй дулаан болон орчинд алдагдаж буй дулаан хоорондоо тэнцвэржиж байгааг илтгэнэ.

Иймээс туршилтын үр дүнгээс диодон халаагуурын температурын өсөлт нь оролтын хүчдэлээс шууд хамаарах бөгөөд хүчдэл өсөхийн хэрээр халаалтын хурд болон тогтворжсон температурын түвшин нэмэгдэж байгааг тогтоов. Энэ нь диодон халаагуурын дулааны горимыг тохируулахад хүчдэлийн түвшин чухал нөлөөтэй болохыг харуулж байна.

2. Диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл-хүчдэлийн хамаарамжийн зарчмын туршилт

Диодон халаагуур болон эсэргүүцлэн халаагуурын цахилгаан шинж чанарын ялгааг тодорхойлох зорилгоор гүйдэл–хүчдэлийн хамаарлын зарчмын туршилтыг гүйцэтгэсэн. Энэхүү туршилтаар эсэргүүцлэн халаагуур, диодон халаагуурын халахын өмнөх болон халаалтын дараах гүйдэл–хүчдэлийн муруйг харьцуулан авч үзсэн. Мөн эдгээр муруйг нарны цахилгаан үүсгүүрийн гүйдэл–хүчдэлийн муруйтай уялдуулан тайлбарласан.



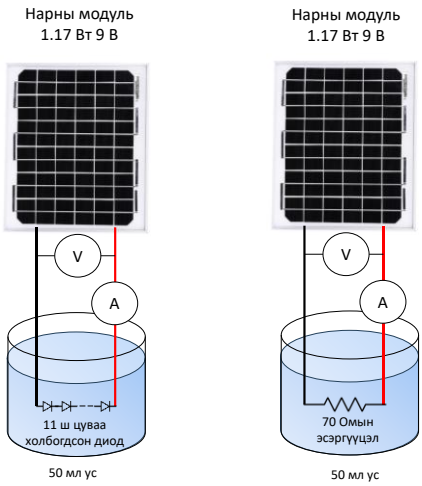
3-р зураг. Диод болон эсэргүүцлийн гүйдэл хүчдэлийн муруй (эсэргүүцлэн халаагуур, халах эхлэх үеийн диодон халаагуур, мөн халалтын дараах диодон халаагуурын гүйдэл–хүчдэлийн муруйг харуулав)

3-р зураг-аас харахад эсэргүүцлэн халаагуурын муруй шулуун шугаман хэлбэртэй байгаа бол диодон халаагуурын муруй шугаман бус шинжтэй байна. Эсэргүүцлэн халаагуурын хувьд хүчдэл 1.0 В үед гүйдэл ойролцоогоор 5.5 А, 1.5 В үед 7.6 А, 2.0 В үед 10.0 А болж өсөж байна. Харин диодон халаагуурын хувьд бага хүчдэлийн мужид гүйдэл бага байснаа 1.0–1.2 В орчимд эрчимтэй өсөж, 1.45 В үед 5.0 А, 1.7 В үед 7.5 А, 1.9 В үед 10.0 А орчимд хүрч байна. Мөн халалтын дараах диодон халаагуурын муруй халах эхлэх үеийнхээс зүүн тийш бага зэрэг шилжсэн байна. Жишээлбэл 5 А орчим гүйдэлд хүчдэл 1.45 В-оос 1.40 В орчимд буурч байгаа нь диод халснаар дамжуулах хүчдэлийн уналт багасаж байгааг харуулж байна. Энэ нь диодон халаагуурын ажиллах цэг халалтын явцад өөрчлөгдөх боломжтойг илтгэнэ.

Нарны цахилгаан үүсгүүрийн тасархай муруйнуудтай огтлолцох цэгүүдээс үзэхэд нарны эрчим өндөр үед хоёр ачааллын чадлын ялгаа бага байна. Харин нарны эрчим буурахад диодон халаагуурын ажиллах цэг харьцангуй өндөр хүчдэл дээр хадгалагдаж, илүү их чадал шингээх нөхцөл бүрдэж байна. Тухайлбал бага гэрэлтүүлгийн мужид диодон халаагуурын чадал ойролцоогоор 2.8 Вт, эсэргүүцлэн халаагуурын чадал 1.9 Вт орчим байгаа нь диодон халаагуурын шингээх чадал 45–50 %-иар өндөр байх боломжтойг харуулж байна.

Иймээс энэхүү туршилтаас диодон халаагуур нь нарны эрчим буурсан үед эсэргүүцлэн халаагууртаас илүү зохимжтой ажиллах боломжтой бөгөөд энэ нь түүний шугаман бус гүйдэл–хүчдэлийн шинж болон халалтын нөлөөгөөр ажиллах цэг нь өөрчлөгдөж байгаатай холбоотой гэж дүгнэж болно.

3. Диодон халаагуур ба эсэргүүцлэн халаагуурыг харьцуулсан туршилт

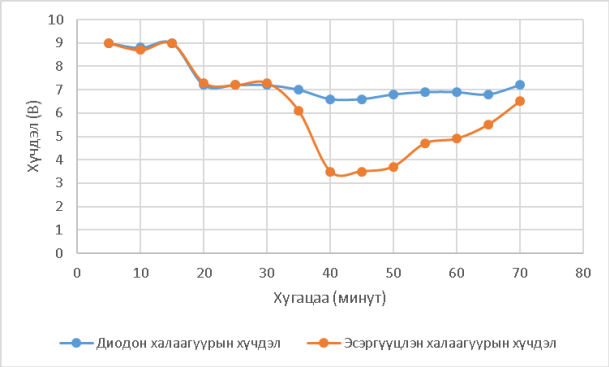


4-р зураг. Диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын туршилтын зарчмын схем

Энэхүү туршилтаар 9 В, 130 мА үзүүлэлттэй нарны цахилгаан үүсгүүрт 11 ширхэг диод бүхий диодон халаагуур болон 70 Ом эсэргүүцэлтэй эсэргүүцлэн халаагуурыг тус тус холбож, ижил нөхцөлд ажиллагааг нь харьцуулан судлав. Туршилтын гол зорилго нь хоёр төрлийн ачааллыг нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадлын хамгийн их утгын мужид ойролцоогоор тааруулж, улмаар ижил гэрэлтүүлгийн нөхцөлд хүчдэл, гүйдэл, чадал болон дулааны үзүүлэлтүүд хэрхэн өөрчлөгдөхийг хугацааны хамаарлаар тодорхойлоход оршино.

Туршилтын явцад хоёр ачаалал тус бүр дээрх хүчдэл, гүйдлийг хугацааны турш хэмжиж, тухайн агшин дахь чадлыг тооцоолсон. Үүний зэрэгцээ 50 мл усыг халааж, усны температурыг хугацааны турш бүртгэн, зөвхөн цахилгаан чадлын ялгааг бус, бодит дулаан ялгаруулах чадварыг мөн үнэлсэн. Ийнхүү цахилгаан болон дулааны хэмжилтийг нэгэн зэрэг хийсэн нь хоёр төрлийн халаагуурын ажиллагааг илүү бодитоор харьцуулах боломж олгосон.

Мөн энэхүү туршилтыг явуулахдаа диодон болон эсэргүүцлэн халаагууртай холбогдсон нарны цахилгаан үүсгүүрүүдийг ижил нөхцөлд ижил өнцгөөр байрлуулсан ба туршилтад ашиглагдсан хэмжилтийн болон бусад багаж төхөөрөмжүүд бүгд нэгэн ижил болно.Ингэснээр туршилтын алдаа бага байлгах үндэс болсон.

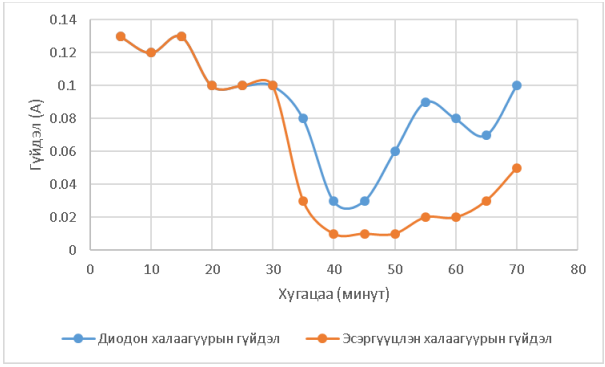


5-р зураг. Диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл болон хугацааны хамаарамж

Зураг-5-т диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл хугацааны явцад хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг харуулсан. Туршилтын эхний үед, өөрөөр хэлбэл 5–15 дахь минутын хооронд хоёр халаагуурын хүчдэл хоёулаа 8.7–9.0 В орчим байж, хоорондын ялгаа маш бага байсан. Энэ нь туршилтын эхний шатанд нарны цахилгаан үүсгүүрийн гаралтын нөхцөл харьцангуй тогтвортой, хоёр төрлийн ачаалал хоёулаа ойролцоо хүчдэлийн мужид ажиллаж байгааг илэрхийлж байна.

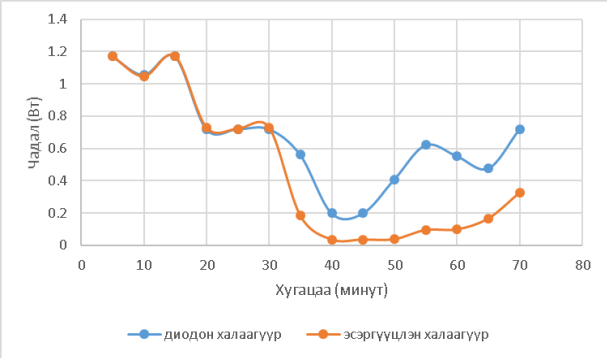
Харин 20–30 дахь минутын хооронд хоёр халаагуурын хүчдэл зэрэг буурч, ойролцоогоор 7.2–7.3 В түвшинд хүрсэн байна. Энэ мужид мөн ялгаа бага хэвээр хадгалагдсан нь нарны эрчим дунд түвшинд байх үед хоёр ачааллын ажиллах нөхцөл харьцангуй төстэй байгааг харуулж байна.

Гэвч 35 дахь минутаас эхлэн хоёр муруйн хоорондын ялгаа тод ажиглагдаж эхэлж байна. Диодон халаагуурын хүчдэл 7.0 В орчмоос аажмаар буурч, 40–45 дахь минутад 6.6 В орчимд хүрсэн боловч түүнээс хойш 6.6–7.2 В мужид харьцангуй тогтвортой хадгалагдсан байна. Харин эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл энэ үед илүү огцом буурч, 35 дахь минутад 6.1 В, 40 дахь минутад 3.5 В, 45 дахь минутад 3.6 В, 50 дахь минутад 3.7 В болсон байна. Өөрөөр хэлбэл, нарны эрчим буурсан үед эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл хамгийн багадаа 3.5 В хүртэл буурсан бол диодон халаагуурын хүчдэл хамгийн багадаа 6.6 В орчимд хадгалагдсан байна. Энэ нь хамгийн бага хүчдэлийн нөхцөлд диодон халаагуурын хүчдэл эсэргүүцлэн халаагуураас ойролцоогоор 3.1 В-оор өндөр байсныг харуулж байна.Мөн 55–70 дахь минутын хооронд эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл дахин аажмаар өсөж 4.8–6.5 В болсон боловч диодон халаагуурын хүчдэл мөн хугацаанд 6.8–7.2 В орчимд хадгалагдсан хэвээр байна. Тухайлбал 60 дахь минутад диодон халаагуурын хүчдэл 6.9 В, эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл 5.0 В байсан бөгөөд энэ нь 1.9 В-ын зөрүүтэй байна. Харин туршилтын төгсгөлд, 70 дахь минутад диодон халаагуурын хүчдэл 7.2 В, эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл 6.5 В болж, ялгаа 0.7 В хүртэл буурсан байна.

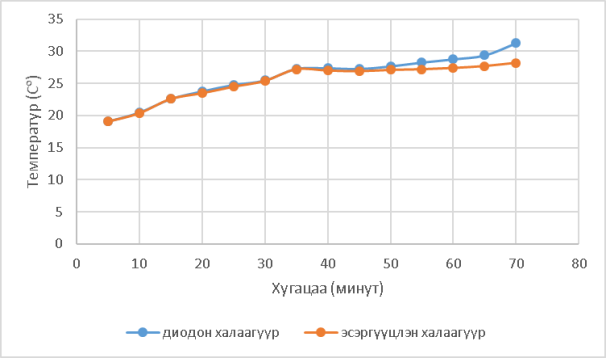


6-р зураг. Диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл болон хугацааны хамаарамж

Зураг-6-д диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл хугацааны явцад хэрхэн өөрчлөгдөж байгааг харуулсан. Туршилтын эхний үед, өөрөөр хэлбэл 5–30 дахь минутын хооронд эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл 0.10–0.13 А мужид, диодон халаагуурын гүйдэл мөн 0.10–0.08 А орчимд байсан бөгөөд энэ хугацаанд хоёр ачааллын ялгаа харьцангуй бага байв. Тухайлбал 30 дахь минутад хоёулангийнх нь гүйдэл 0.10 А байсан нь нарны эрчим өндөр үед хоёр халаагуур ойролцоо нөхцөлд ажиллаж байгааг илэрхийлж байна. Харин 35 дахь минутаас эхлэн хоёр халаагуурын гүйдлийн ялгаа тод ажиглагдаж эхэлсэн. Эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл огцом буурч, 35 дахь минутад 0.03 А, 40–50 дахь минутын хооронд 0.01 А хүртэл буурсан байна. Харин диодон халаагуурын гүйдэл энэ үед илүү өндөр түвшинд хадгалагдаж, 35 дахь минутад 0.08 А, 40–45 дахь минутад 0.03 А, 50 дахь минутад 0.06 А болсон байна. Өөрөөр хэлбэл, нарны эрчим буурсан мужид диодон халаагуурын гүйдэл эсэргүүцлэн халаагуураас тогтвортой өндөр байсан нь харагдаж байна. Ялангуяа 55 дахь минутад диодон халаагуурын гүйдэл 0.09 А, эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл 0.02 А байсан бөгөөд ялгаа 0.07 А хүрсэн байна. Мөн 60 дахь минутад диодон халаагуур 0.08 А, эсэргүүцлэн халаагуур 0.02 А, 65 дахь минутад харгалзан 0.07 А ба 0.03 А, 70 дахь минутад 0.10 А ба 0.05 А болсон байна. Иймээс туршилтын төгсгөлийн хэсэгт диодон халаагуурын гүйдэл эсэргүүцлэн халаагуураас 2–4.5 дахин өндөр байсан гэж үзэж болно.



7-р зураг. Диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын чадлын хугацааны хамаарамж



8-р зураг. Диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын температур болон хугацааны хамаарамж

Зураг 7-өөс харахад туршилтын эхний шатанд, өөрөөр хэлбэл нарны эрчим өндөр үед диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын чадлын утгууд хоорондоо ойролцоо байна. Тухайлбал 5 болон 15 дахь минутуудад хоёр халаагуурын чадал ижил буюу 1.17 Вт байсан нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадлын хамгийн их утгын орчимд хоёр төрлийн ачаалал ойролцоо түвшний чадал шингээж ажиллаж байгааг харуулж байна. Мөн 20–30 дахь минутын хооронд ч чадлын ялгаа бага хэвээр хадгалагдаж, диодон халаагуурын чадал 0.72 W, эсэргүүцлэн халаагуурын чадал 0.73 Вт орчим байв. Харин хугацаа өнгөрөхийн хэрээр, өөрөөр хэлбэл нарны эрчим буурч бага зэрэг үүлэрхэг нөхцөл үүсэхэд хоёр халаагуурын ялгаа тод ажиглагдаж эхэлсэн. 35 дахь минутаас эхлэн диодон халаагуурын чадал эсэргүүцлэн халаагуураас мэдэгдэхүйц өндөр болж, 40–45 дахь минутуудад хэд хэдэн дахин их хэмжээнд хүрсэн байна. Ялангуяа 50–60 дахь минутын хооронд диодон халаагуурын чадал 0.408–0.621 Вт мужид хадгалагдаж байсан бол эсэргүүцлэн халаагуурын чадал 0.037–0.110 Вт хүртэл буурсан байна. Өөрөөр хэлбэл нарны эрчим буурсан үед диодон халаагуурын чадал зарим агшинд эсэргүүцлэн халаагуураас 4-10 дахин өндөр хадгалагдаж байв.

Ийнхүү харьцуулсан туршилтын үр дүнгээс харахад нарны эрчим өндөр үед диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл, гүйдэл, чадлын ялгаа бага байж, хоёр ачаалал хоёулаа нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадлын хамгийн их утгын орчимд ажиллаж байна. Харин нарны эрчим буурсан үед эсэргүүцлэн халаагуурын хүчдэл 3.5 В хүртэл, гүйдэл 0.01 А хүртэл буурч, чадал 0.037–0.110 Вт мужид хүрсэн бол диодон халаагуурын хүчдэл 6.6–7.2 В, гүйдэл 0.03–0.10 А, чадал 0.408–0.621 Вт мужид харьцангуй өндөр түвшинд хадгалагдсан байна. Өөрөөр хэлбэл нарны эрчим буурсан нөхцөлд диодон халаагуур нь эсэргүүцлэн халаагуураас илүү өндөр хүчдэл, гүйдэл, чадлаар ажиллаж, системийн ажиллах нөхцөлийг илүү тогтвортой хадгалж байгаа нь харагдаж байна. Энэ нь диодон халаагуурын шугаман бус шинж чанар нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн өөрчлөмтгий нөхцөлд ачааллын тохиролтыг сайжруулж, бага гэрэлтүүлгийн үед ч илүү үр ашигтай дулаан ялгаруулах боломжтойг харуулж байна.

Мөн Зураг 8-т ус халаалтын температурын хугацааны хамаарлыг үзүүлсэн бөгөөд нарны эрчим өндөр үед диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын температурын өсөлт хоорондоо ойролцоо байгааг харуулж байна. Тухайлбал туршилтын эхний 30 минутын хугацаанд хоёр халаагуурын ус халаах үзүүлэлт бараг ижил байсан бөгөөд 30 дахь минутад диодон халаагуурын үед усны температур 25.5 °C, эсэргүүцлэн халаагуурын үед 25.4 **°C** байсан нь ялгаа маш бага байсныг илтгэнэ. Энэ нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадлын хамгийн их утгын орчимд хоёр төрлийн ачаалал хоёулаа ойролцоо түвшний чадал шингээж, бодит халаалтын үр нөлөө нь мөн төстэй байгааг харуулж байна. Харин нарны эрчим буурч, үүсгүүрийн ажиллах нөхцөл өөрчлөгдөхөд хоёр халаагуурын ялгаа температурын муруйн дээр тодорхой илэрч эхэлсэн. 55 дахь минутад диодон халаагуурын усны температур 28.3 °C, эсэргүүцлэн халаагуурынх 27.2 °C байсан нь 1.1 °C-ийн зөрүүтэй байв. Энэ ялгаа 60 дахь минутад 1.4 °C, 65 дахь минутад 1.7 °C, туршилтын төгсгөлд буюу 70 дахь минутад 3.1 °C хүрч өссөн байна. Өөрөөр хэлбэл, нарны эрчим буурсан үед диодон халаагуурын ус халаах температурын өсөлт илүү тогтвортой хадгалагдаж, хугацаа өнгөрөх тусам хоёр халаагуурын дулааны үр дүнгийн ялгаа хуримтлагдан нэмэгдэж байгааг энэхүү график харуулж байна.

Энэхүү температурын зөрүү нь зөвхөн хэмжилтийн тоон ялгаа бус, бодит халаалтын үр ашигт чухал үзүүлэлт юм. Ялангуяа бага эзлэхүүнтэй ус халаах туршилтад 1–3 °C-ийн ялгаа гарч байгаа нь ачааллын шинж чанараас хамаарсан шингээсэн чадлын зөрүү бодит дулааны үр дүнд шилжиж байгааг илтгэнэ. Өөрөөр хэлбэл, диодон халаагуурын давуу тал нь зөвхөн цахилгаан хэмжилтийн түвшинд бус, бодит дулаан дамжуулалтын түвшинд ч батлагдаж байна. Энэ нь бага чадлын, шууд холболттой нарны цахилгаан халаалтын системийн хувьд диодон халаагуурын практик ач холбогдлыг харуулж байгаа юм.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар нарны цахилгаан үүсгүүрээр шууд тэжээгддэг тогтмол гүйдлийн диодон халаагуурын ажиллагааг онолын болон туршилтын аргаар судалж, уламжлалт эсэргүүцлэн халаагууртай

харьцуулан үнэлэв. Судалгааны ажлын хүрээнд нарны цахилгаан үүсгүүрээс гарсан энергийг батарей, инвертер зэрэг завсрын төхөөрөмжгүйгээр шууд дулаанд хувиргах боломжийг авч үзсэн бөгөөд энэ нь бага чадлын халаалтын системийн өртөг, бүтцийн түвэгшлийг бууруулах практик ач холбогдолтой юм.

Диодон халаагуурын температур–хүчдэлийн туршилтаар 0.71–1.93 В хүчдэлийн мужид температурын өсөлтийг судлахад хүчдэл ихсэхийн хэрээр температурын өсөлтийн хурд болон тогтворжсон температурын түвшин нэмэгдэж байв. Тухайлбал 1.93 В үед диодон халаагуурын температурын өсөлт хамгийн өндөр байсан бол 0.71–0.87 В мужид температурын өсөлт харьцангуй бага байсан нь диодон халаагуурын дулаан ялгаралт оролтын цахилгаан нөхцөлөөс шууд хамаарч байгааг харуулсан.

Диодон болон эсэргүүцлэн халаагуурын гүйдэл–хүчдэлийн хамаарлын зарчмын туршилтаас үзэхэд эсэргүүцлэн халаагуур нь шугаман ачааллын шинжтэй, харин диодон халаагуур нь шугаман бус шинжтэй болох нь тодорхойлогдов. Иймээс нарны цахилгаан үүсгүүртэй холбогдох үед хоёр ачааллын ажиллах цэг өөр өөрөөр тогтож, ялангуяа нарны эрчим буурсан нөхцөлд диодон халаагуурын ажиллах горим илүү ашигтай байж болох нь онолын болон туршилтын хувьд батлагдав. Мөн диод халалтын явцад түүний дамжуулах хүчдэл буурч, ачааллын цахилгаан шинж өөрчлөгдөж байгааг ажигласан нь диодон халаагуурын ажиллагаа температурын төлөвөөс мөн хамаарч байгааг харууллаа.

Харьцуулсан туршилтыг 9 В, 130 мА үзүүлэлттэй нарны цахилгаан үүсгүүр дээр 11 диод бүхий диодон халаагуур болон 70 Ом эсэргүүцэлтэй эсэргүүцлэн халаагуурыг ашиглан гүйцэтгэв. Туршилтын эхний шатанд, өөрөөр хэлбэл нарны эрчим өндөр үед хоёр халаагуурын чадал ижил буюу 5 болон 15 дахь минутуудад тус бүр 1.17 Вт байсан нь нарны цахилгаан үүсгүүрийн чадлын хамгийн их утгын орчимд хоёр төрлийн ачаалал ойролцоо түвшний чадал шингээж ажиллаж байгааг харуулсан. Мөн 20–30 дахь минутын хооронд чадлын ялгаа бага хэвээр хадгалагдаж, диодон халаагуурын чадал 0.72 Вт, эсэргүүцлэн халаагуурын чадал 0.73 Вт орчим байсан.

Харин нарны эрчим буурч, бага зэрэг үүлэрхэг нөхцөл үүсэх үед хоёр халаагуурын ялгаа тод илэрсэн. Ялангуяа 40–60 дахь минутын мужид диодон халаагуурын чадал эсэргүүцлэн халаагуураас дунджаар ойролцоогоор 600 %-иар өндөр хадгалагдсан байна. Энэ нь нарны эрчим буурсан үед эсэргүүцлэн халаагуурын чадал хурдан буурч, харин диодон халаагуурын чадал харьцангуй өндөр түвшинд хадгалагдаж байгааг илэрхийлж байна.

Бодит халаалтын үр нөлөөг үнэлэх зорилгоор 50 мл ус халаах туршилт хийсэн бөгөөд усны температурын хугацааны хамаарлаас харахад эхний 30 минутын хугацаанд хоёр халаагуурын температурын өсөлт бараг ижил байсан. Харин нарны эрчим буурсан үед диодон халаагуурын ус халаах температурын өсөлт илүү тогтвортой хадгалагдаж, туршилтын төгсгөлд усны температурын өсөлт эсэргүүцлэн халаагуураас 3.1 °C-аар өндөр байв. Энэ нь диодон халаагуурын шингээсэн чадлын давуу тал зөвхөн цахилгаан хэмжилтээр бус, бодит дулааны үр дүнгээр мөн батлагдаж байгааг харуулж байна. Тиймээс нарны цахилгаан үүсгүүрээр шууд тэжээгддэг бага чадлын халаалтын системд диодон халаагуур нь ялангуяа хувьсах гэрэлтүүлгийн нөхцөлд эсэргүүцлэн халаагуураас илүү тохиромжтой ачааллын хувилбар байж болохыг энэхүү судалгаа харууллаа.

Эдийн засгийн үр ашгийн үүднээс авч үзвэл шууд холболттой диодон халаагуурын системийн гол давуу тал нь нарны цахилгаан үүсгүүрээс гарсан энергийг батарей, цэнэг хянагч, инвертер зэрэг завсрын төхөөрөмжгүйгээр шууд дулаанд хувиргах боломжтойд оршино. Бусад олон улсын судалгаанд уламжлалт батарейтай нарны цахилгаан системийн өртөг 150 ам.доллараас дээш, харин диодон халаагуурт суурилсан шууд холболттой хэсгийн өртөг 10 ам.доллараас доош байгааг үзүүлсэн нь завсрын төхөөрөмжийн хэсэг дээр анхны өртгийг ойролцоогоор 90 гаруй хувиар бууруулах боломжтойг харуулсан байна. Мөн батарейтай хувилбарт хуримтлагдах энергийн ойролцоогоор 20 хувь алдагдаж, диодон халаагуур нь PWM-батарей-эсэргүүцлэн халаалтын угсралтаас онолын хувьд ойролцоогоор 40 хувиар их дулаан гаргах боломжтойг дурдсан байдаг[13]. Манай туршилтад ч нарны эрчим буурсан 40–60 дахь минутын мужид диодон халаагуурын чадал 0.408–0.621 Вт, эсэргүүцлэн халаагуурын чадал 0.037–0.110 Вт байсан нь ижил хүчин чадалтай нарны цахилгаан үүсгүүрээс илүү их дулаан ашиглах боломж байгааг харуулсан. Иймээс диодон халаагуур нь шууд халаалтын хэрэглээнд системийн өртгийг бууруулах, завсрын хувиргалтын алдагдлыг багасгах, бага гэрэлтүүлгийн нөхцөлд дулаан гаргалтыг нэмэгдүүлэх эдийн засгийн үндэслэлтэй шийдэл болох боломжтой юм.

Цаашид диодын төрөл, тоо, дулаан дамжуулах хийц, дулаан хуримтлуурын материал, мөн бодит орчны урт хугацааны туршилтыг нарийвчлан судлах нь зүйтэй. Ингэснээр диодон халаагуурт суурилсан шууд холболттой нарны цахилгаан халаалтын системийн практик хэрэглээг өргөжүүлэх боломж бүрдэх юм..

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] W. Shockley, “The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors,” *Bell System Technical Journal*, vol. 28, no. 3, pp. 435–489, Jul. 1949.

[2] .Баасанцэрэнгийн Ганбат, Электроникийн үндэс , Улаанбаатар хот 2022он.

[3] Hot diodes!: Dirt cheap cooking and electricity for the global poor?” [Dev. Eng. 4 (2019) 100044]

[4] Х.Сарангэрэл, Э.Төнхтуяа, М.Ганхүлэг , Нарны цахилгаан станц, Улаанбаатар хот 2025 он.

[5] R. A. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.

[6] Milón Guzmán, J. J., et al. “Direct Current Photovoltaic Solar Energy for Water Heating.” *Energies*, vol. 18, no. 8, 2025.

[7] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1982.

[8] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamentals of Physics*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2014.

[9] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentals of Electric Circuits*, 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2017.

[10] Moh’d, B. A. H., et al. “An innovative low-cost and water-saving direct photovoltaic water-heating system with near-MPPT control.” *Alexandria Engineering Journal*, 2026.

[11] G. N. Tiwari and S. Dubey, *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. Cambridge, U.K.: Royal Society of Chemistry, 2010.

[12] Г.Мөнгөншагай “Диодон халаагуурын судалгаа.” Хэвлэгдээгүй, Улаанбаатар хот, 2025.

[13] Gius G., Walker M., Li A., Adams N. J., Van Buskirk R., Schwartz P., “Hot diodes!: Dirt cheap cooking and electricity for the global poor?”, Development Engineering, vol. 4, article 100044, 2019.

УХААЛАГ ЦАХИЛГААН ТООЛУУРЫН ЧАДЛЫН ХЯЗГААРЛАЛТЫН ФУНКЦИЙГ АШИГЛАЖ ЦАХИЛГААН ЭРЧИМ ХҮЧНИЙ ХӨНГӨЛӨЛТ ХИЙХ БОЛОМЖИЙН СУДАЛГАА

Баярсайханы ДЭМБЭРЭЛЗОДОВ[1], Төмөрбаатарын МӨНХЗУЛ[2], Ганболдын БАЯР-ЭРДЭНЭ[3], Бандийн ТҮВШИНБАЯР[4]

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, Улаанбаатар цахилгаан түгээх сүлжээ ТӨХК

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: tuvshinbayar.b@must.edu.mn[4]

Хураангуй: **Монгол улсын өсөн нэмэгдэж байгаа хэрэглээтэй холбоотойгоор эрчим хүчний систем нь чадлын дутагдалд орж цахилгаан эрчим хүчний хязгаарлалт хийхээс өөр аргагүй байдалтай байна. Тус чадлын дутагдлыг даван гарахын тулд дамжуулах сүлжээний мэдлийн дэд станцуудаас гарсан шугамуудыг тасалж чадлын хязгаарлалт хийж байна. Ингэснээр хэрэглэгчдийг буюу айл өрхийг хотхон, хорооллоор нь багцлан тасалж байгаа бөгөөд энэ ашиглаж буй арга нь хэрэглэгчдэд ээлгүй буюу зайлшгүй цахилгаан эрчим хүч шаардлагатай хүнд өвчтэй, онлайн шалгалт, хуралтай гэх мэт хэрэглэгчдэд хүндээр тусаж байна. Энэхүү судалгааны ажлаар бид хэрэглэгчдийг хотхон, хорооллоор нь таслах бус эрчим хүчний хэрэглээг нь бууруулж системд чадлын хөнгөлөлт хийх боломжийг эрэлхийлсэн бөгөөд ухаалаг тоолуурын системийн чадлын хязгаарлалтын функцийг ашиглах аргыг санал болгож байна. Үр дүнд нь хэрэглэгчдийг гарсан шугамаар буюу хорооллоор нь таслах бус харин өөрсдийн хэрэглээгээ хянаж байнгын тэжээлтэй байх боломжийг олгоно. Үүний тулд ухаалаг тоолуурын чадлын хязгаарлалт хийх техникийн боломж, айл өрхийн чадлын хэрэглээг судалж чадлын хязгаарлалтын оновчтой утга, хязгаарлалтын функцийг ашигласнаар гарах чадлын хөнгөлөлтийг тооцоолж олсон. Тус үр дүнд үндэслэн эрчим хүчний чадлын дутагдлын үед хэрэглэгчдэд ээлтэй байдлаар эрчим хүчний чадлын хөнгөлөлтийг хийх боломжтой болж байна.**

Түлхүүр үг: Ачаалал хөнгөлөлт, Эрчим хүчний хязгаарлалт, Хоногийн ачаалал, Цахилгаан хэрэглээ

I. УДИРТГАЛ

Монгол улсын эрчим хүчний систем нь 2025-2026 оны өвлийн улиралд ДЦС-4-ийн долоо дугаар зуух дээр гарсан гэмтэл, Бөөрөлжүүтийн цахилгаан станц (ЦС)-ын нүүрсний хөлдөлт гэх мэт асуудлаас болж чадлын дутагдалд орсон. Дээрх үйл явдалтай уялдан цахилгаан хэрэглэгчдийн дамжуулах сүлжээний гарсан шугамыг таслах буюу хэрэглэгчдийг хотхон, хорооллоор нь хэсэгчилсэн тасалж чадлын хязгаарлалт хийж эрчим хүчний чадлын тэнцвэрийн хангаж байсан (тодруулбал 2026 оны 01 сарын 19-нөөс 01 сарын 30-ны хооронд) [1].

Цахилгаан хэрэглэгчдийг хотхон, хорооллоор нь багцлан таслалт явуулах нь хэрэглэгчдийг ихээхэн хүндрэлтэй байдалд оруулдаг. Жишээ нь: цахилгаан шат гацах, эрүүл мэндийн цахилгаан төхөөрөмжүүд ажиллагаагүй болох, тасалдах, интернэт тасралтаас үүдэлтэй чухал шалгалттай онлайн шалгалт, хурал, зөвлөгөөнд оролцох боломжгүй болох гэх зэрэг. Мөн түүнчлэн цахилгаан эрчим хүчийг гарсан шугамаар таслалт хийснээр дулааны түгээх төвүүдийн татах шахуурга болон өсгөх халаагуур ажиллагаагүй болсноор орон сууцны айлуудын дулаан хангамж шаардлагатай хэмжээнээс буураад зогсохгүй цахилгаан хангамж эргэж сэргэх үед дулаан хангамжийн сүлжээнд шилжилтийн процессын хүндрэл тулгарч аваарын нөхцөл байдал үүсэх боломжтой юм.

Тиймээс энэхүү өгүүлэлд бид цахилгаан хангамжийг нэгдсэн байдлаар гарсан шугамаар таслах бус цахилгаан хэрэглэгч бүр дээр хязгаарлалт хийх зарчмаар шийдвэрлэхийг зорилгоо болгосон.

2025 оны байдлаар Монгол Улсын хэмжээнд 974,311 цахилгаан эрчим хүч хэрэглэгчдэд 1,016,817 тоолуураар борлуулалт хийж байгаагаас 2025 оны хагас жилийн гүйцэтгэлээр 386,324 буюу нийт хэрэглэгчдийн 38%-ийг ухаалаг тоолуураар шинэчлээд байна. Цаашид үлдсэн 630.5 мянган ширхэг буюу 62%-ийг 2028 оны түвшинд шинэчилж дуусгах төлөвлөгөөтэй байна [2] [3]. Ухаалаг цахилгаан тоолуурын систем (Advanced metering infrastructure; AMI) нь цахилгаан түгээх сүлжээний удирдлагын систем (Distribution management system; DMS)-д дэмжлэг үзүүлэх цахилгаан хэрэглэгчдийг алсын зайн нэгдсэн удирдлагаар чадлын хязгаарлалт хийх боломжийг олгож байна. Тус ухаалаг тоолуурын функцийг ашигласнаар хэрэглэгчдийн цахилгаан эрчим хүчийг шууд таслах бус тодорхой чадлын хязгаарлалтайгаар хангах бөгөөд хэрэглэгчид тус чадлын хязгаарлалтад багтаан нэн хэрэгцээтэй тодорхой тооны цахилгаан төхөөрөмжийг ашиглах боломжтой. Мөн түүнчлэн дулаан түгээх төвүүдийн цахилгаан хангамжийг хэвийн үлдээж дулаан хангамжийн системд үүсэх асуудлуудыг шийдвэрлэх боломжтой [4], [5], [6].

Тус судалгааны ажилд ухаалаг цахилгаан тоолуурын чадлын хязгаарлалтын утгыг оновчтой сонгох, тус сонголтоос хэр хэмжээний цахилгаан ачааллыг эрчим хүчний системээс хөнгөлөх боломжтойг тооцоолсон. Ингэхдээ нийтлэг ашиглагдаж буй цахилгаан төхөөрөмжүүдийн чадлын хэрэглээг судалж гаргасан бол тус хязгаарлалтаас үүсэж болох системийн чадлын хөнгөлөлтийг нэг хэрэглэгчийн өвлийн дундаж хэрэглээний судалгаанаас тооцоолж олсон болно.

II. ЧАДЛЫН ХЯЗГААРЛАЛТЫН ТАВИЛ СОНГОХ

Одоогоор цахилгаан түгээх сүлжээнд ашиглагдаж байгаа ухаалаг цахилгаан тоолуурын чадлын хязгаарлалтын тавил нь 9 кВт буюу энгийн хэрэглэгчдийн цахилгаан ачааллыг бүрэн хангахаар өндөр тавилтай байдаг [7]. Ухаалаг цахилгаан тоолуурын чадлын хязгаарлалтаар эрчим хүчний системийн ачааллыг хөнгөлөхийн тулд хамгийн тохиромжтой чадлын хязгаарлалтын тавилыг сонгох нь нэн чухал асуудал юм. Тиймээс бид айл өрхийн чадлын хэрэглээг тодорхойлохын тулд өрхийн хэрэглээнд нийтлэг ашиглагддаг цахилгаан төхөөрөмжүүдийн цахилгаан зарцуулалтыг харьцуулсан судалсан. Ингэхдээ цахилгаан төхөөрөмж бүрээс таван өөр брэндийн төхөөрөмжийг сонгож чадлын зарцуулалтыг харьцуулсан. Цахилгаан төхөөрөмжүүдийн хамгийн их, бага болон дундаж чадлын зарцуулалтуудыг 1-р зураг харуулсан байна. Үүнд: гэрэл, зурагт, интернэт, хөлдөөгч зэрэг байнга ажиллах цахилгаан төхөөрөмжүүд нь 0.5 кВт-аас бага зарцуулалттай байгаа бол цахилгаан зуух, угаалгын машин, цахилгаан халаагуур зэрэг нь 1 кВт-аас дээш зарцуулалттай байна. Эдгээр өндөр чадлын зарцуулалт бүхий цахилгаан төхөөрөмжүүдийг ашиглалтын зэрэглэлээр нь ангилж богино хугацаанд хязгаарлалт хийх боломжтой гэж үзэж байна.

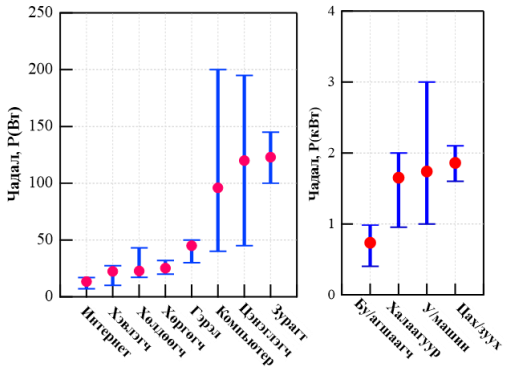
Хэрэглэгчдийг чадлын хязгаарлалтын үед ашиглаж байгаа болон цахилгаан төхөөрөмжүүдийн зарцуулалтыг тооцоолохын тулд цахилгаан төхөөрөмжүүдийн ашиглалтын байдлаас хамааруулан дөрвөн төрлийн хувилбарыг гаргаж 1-р хүснэгтэд харуулав. Тус харьцуулалтад үндэслэн 1 болон 2 дугаар хувилбарт багтсан цахилгаан төхөөрөмжүүдийг ашиглаж болохоор тооцоолон ухаалаг цахилгаан тоолуурын чадлын хязгаарлалтын тавилыг сонгох нь зүйтэй гэж үзсэн. 2-р зураг үзүүлсэнчлэн ухаалаг цахилгаан тоолуурын чадлын хязгаарыг тавилын хоёр байрлалд тавьж өгөх боломжтой гэж үзсэн. Нэгдүгээр тавил нь 0.5 кВт байхаар сонгосон бөгөөд тус тавилын үед 1 болон 2-р хувилбарт багтсан цахилгаан төхөөрөмжүүдийн дундаж цахилгаан зарцуулалтыг хангаж өгөх боломжтой. Хоёрдугаар тавил нь 1 кВт байхаар сонгосон бөгөөд тус тавилын үед 1 болон 2-р хувилбарт багтсан цахилгаан төхөөрөмжүүдийн хамгийн их цахилгаан зарцуулалтыг хангаж байхаар авсан.

III. ЧАДЛЫН ХӨНГӨЛӨЛТИЙН ТООЦООЛОЛ

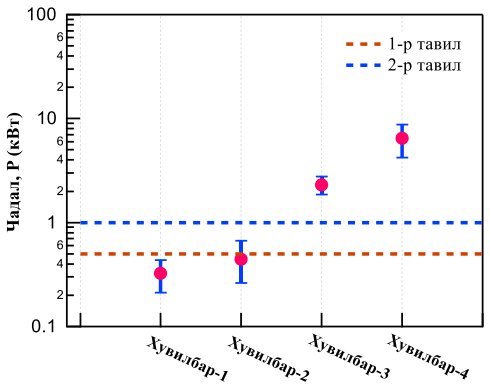
Өмнөх бүлэгт ухаалаг цахилгаан тоолуурын чадлын хязгаарлалтын тавилыг цахилгаан төхөөрөмжийн цахилгаан зарцуулалтад суурилж сонгосон бол энэ бүлэгт тухайн хязгаарлалтын тавилаар тохируулах үед хэр хэмжээний цахилгаан ачааллыг сүлжээнээс хөнгөлөх боломжтойг судлахаар зорилоо. УБЦТС ТӨХК-ийн дундаж ачаалалтай нэг цахилгаан хэрэглэгчийн өвлийн оргил ачааллын үе болох 2025 оны 12-р сар болон 2026 оны 1-р сарын нийт 60 хоногийн ачааллын хамаарамжийг 3-р зурагт давхардуулан харуулсан бөгөөд нийт 60 хоногийн дунджийг улаан өнгөөр үзүүлэв. Чадлын

1-Р ХҮСНЭГТ. ЦАХИЛГААН ТӨХӨӨРӨМЖҮҮД ЗАРЦУУЛАЛТЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

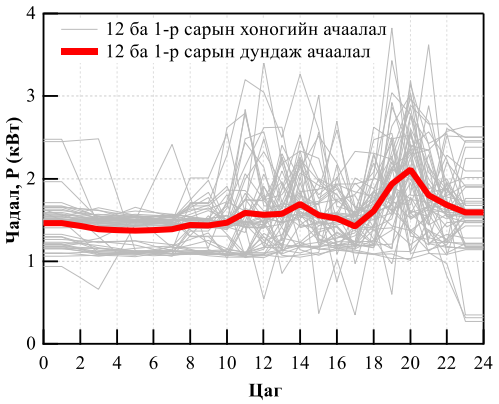
Хувилбар	Цахилгаан хэрэгсэл	Дундаж чадлын зарцуулалт (кВт)
1	Гэрэл, Интернет, Зурагт, Хөлдөөгч, Цэнэглэгч	0.3
2	Хувилбар 1 + Зөөврийн компьютер, Хөргөгч	0.45
3	Хувилбар 2 + Цахилгаан зуух	2.3
4	Хувилбар 3 + Цахилгаан халаагуур, хэвлэгч, будаа агшаагч, У/машин	6.45



1-р зураг. Өрхийн хэрэглээнд нийтлэг ашиглагддаг цахилгаан төхөөрөмжүүдийн цахилгаан зарцуулалтын харьцуулалт.



2-р зураг. Чадлын хязгаарлалтын тавилын сонголт.



3-р зураг. Цахилгаан хэрэглэгчийн хоногийн ачааллын хамаарамж. (2025 оны 12-р сар, 2026 оны 1-р сар)

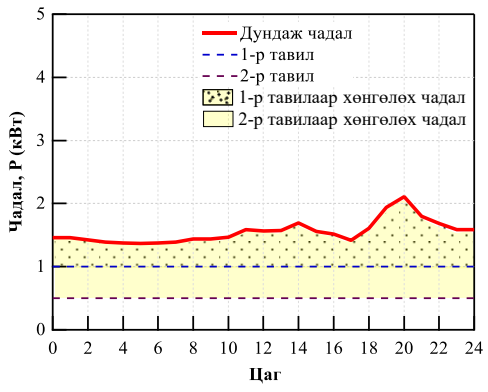
хязгаарлалтын тавилыг 0.5 кВт болон 1 кВт дээр тавьж дундаж ачааллаас хэр зэрэг хөнгөлөлт хийх боломжтойг 4-р зурагт харуулав.

Чадлын хязгаарлалт хийснээр үүсэж болох хөнгөлөлтийн тоон утгыг 5-р зурагт хоногийн ачааллын хамаарамж байдлаар харуулав. Тус хамаарамжаас харахад 5-н цагт хамгийн бага буюу 1-р тавилын үед 0.86кВт , 2-р тавилын үед 0.37кВт ачаалал хөнгөлөх боломжтой бол оргил ачааллын үед буюу 20-н цагт 1-р тавилын үед 1.6кВт, 2-р тавилын үед 1.1кВт ачааллыг тус тус хөнгөлөх боломжтой байна. Хэрэв тухайн хэрэглэгчийн ачааллын хоёр сарын хамгийн их ачааллаар үзвэл дээрх ачааллын хөнгөлөлт илүү ихсэх боломжтой.

Эрчим хүчний системийн хүндрэлийн улмаас 2026 оны өвөл 1 сар хийгдсэн цахилгаан эрчим хүчний таслалтууд нь 2 цагийн турш үргэлжилж байсан [8] тул цахилгаан эрчим хүчний оргил ачааллын үе болох 16-18 цаг, 18-20 цаг, 20-22 цагуудын завсруудад ухаалаг цахилгаан тоолуурын хязгаарлалтын нөлөөгөөр хэр хэмжээний цахилгаан энерги хэмнэх боломжтойг 6-р зурагт үзүүлэв. 6(a)-р зурагт нэг хэрэглэгчийн хувьд авч үзсэн бол 6(b)-р зурагт нэг хорооллын хэмжээнд авч үзсэн болно. Нэг хорооллын хэрэглэгчдийн тоог гаргахдаа Сонгинохайрхан дүүргийн 1-р хорооллын нийт хэрэглэгчийн тоог ойролцоо тоогоор хийж 7000 хэрэглэгчтэй гэж авсан. Үр дүнд нь ухаалаг цахилгаан тоолуурын ачааллын хязгаарлалтыг ашигласнаар 1-р тавилын үед оргил ачааллын үед 22 МВт.цаг 2-р тавилын үед 14 МВт.цаг эрчим хүчийг системийн ачааллаас хөнгөлөх боломжтойг харуулж байна.

IV. УХААЛАГ ЦАХИЛГААН ТООЛУУР ДЭЭРХ ХЭРЭГЖҮҮЛЭЛТ

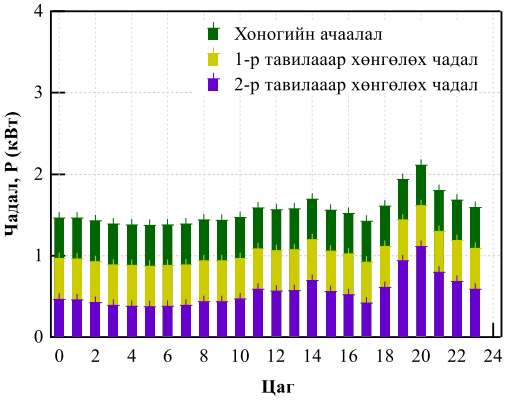
Өмнөх бүлгүүдэд ухаалаг цахилгаан тоолуурын чадлын хязгаарлалтын тавил болон үүнээс үүсэж болох ачааллын хөнгөлөлтийг тооцоолсон бол энэ бүлэгт тус ухаалаг тоолуурын тавилыг алсын зайн удирдлагаар өөрчлөх техникийн боломжийн талаар авч үзнэ. Улаанбаатар цахилган түгээх сүлжээ ТӨХК-ийн хувьд (Inhemeter, Shenzhen star, Holley, Wisdom, Longi, Hanzhou sunrise) зэрэг 6-н төрлийн ухаалаг цахилгаан тоолуур суурилагдан ажиллаж байна.



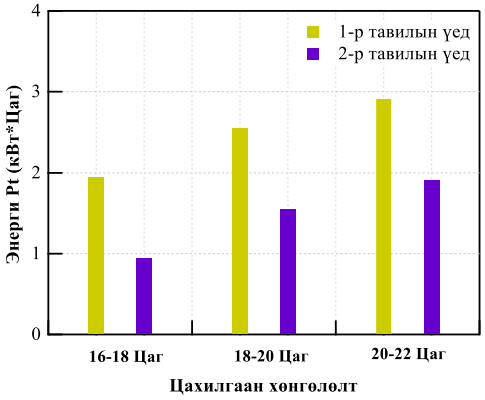
4-р зураг. Чадлын хязгаарлалтын тавил болон хоногийн ачааллын хамаарамж.

Эдгээр тоолууруудыг AMI нэгдсэн системээр удирддаг. Тоолуурууд нь концентратортой RS485 интерфейс, дунд давтамж (400 МГц, medium frequency range) ашиглан хүчний шугамаар DLMS протоколоор холбогдож мэдээллээ дамжуулдаг. Харин концентратор нь цуглуулсан мэдээллээ GPRS/3G модем ашиглаж төв сервертэй солилцож байна (8-р зураг) [7].

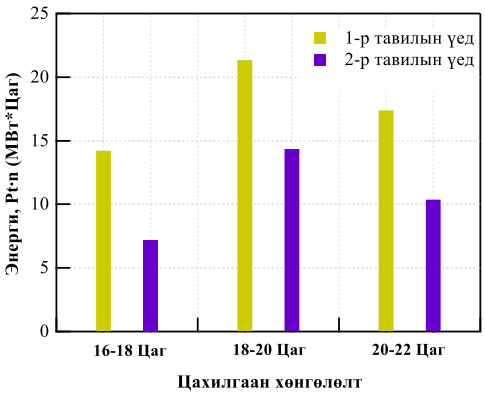
AMI систем нь ухаалаг тоолуур, холбооны сүлжээ, HES болон MDMS-ийг нэгтгэсэн хоёр талын харилцааны систем бөгөөд хэрэглэгч болон түгээх



5-р зураг. Чадлын хязгаарлалт ашигласнаар гарах чадлын хөнгөлөлтийн хоногийн хамаарамж.



(a) Нэг хэрэглэгчийн хувьд



(b) Нэг хорооллын хувьд

6-р зураг. Чадлын хязгаарлалт ашигласнаар оргил ачааллын үед гарах чадлын хөнгөлөлт.

компани хооронд бодит цагийн мэдээлэл солилцох боломжийг олгодог. Тус системд тоолууруудын мэдээлэл бүртгэх, тоолуурт хадгалагдсан мэдээлэл авах болон таслах залгах үйлдэл хийх, ачааллын хамаарамж гаргах, дэд өртөөний алдагдлын баланс зэрэг 7-р зурагт үзүүлсэн үйлдлийг гүйцэтгэх боломжтой [9][10][11][12]. Тус түгээх сүлжээнд ашиглагдаж буй тоолууруудын зарим функцүүдийн тохиргооноос дурдвал тухайн тоолуурын хүчдэл 154В-с багасгах болон 264В-с ихсэхэд тоолуурын таслах хэлхээ ажиллаж хэрэглэгчийн хүчдэлээс чөлөөлөх бөгөөд 30 секундийн дараа эргээд залгагддаг [7].

Дээр дурдсанчлан тус түгээх сүлжээнд 1 фазын тоолуурын чадлын хязгаарлалтын тавил нь хэвийн үед 9 кВт-аар тохируулагдсан байдаг. Ачаалал нь тус тавилаас хэтэрсэн бол хүчний хэлхээг тасрах бөгөөд 30 секундийн дараа эргүүлэн залгах тохиргоотой байдаг. Хэрэв буцаан залгах үед тухайн хэрэглэгч ачааллаа хөнгөлөөгүй байвал дахин таслалт гүйцэтгэнэ. Энэ зарчмаар 5 удаагийн таслалт, залгалт хийх бөгөөд хэрэглэгч ачааллаа бууруулахгүй бол удаан хугацааны таслалт хийх бөгөөд 2 цагийн дараа эргүүлэн залгаж дээрх процесс 9-р зурагт үзүүлсэнчлэн циклдэх байдлаар давтагдана.

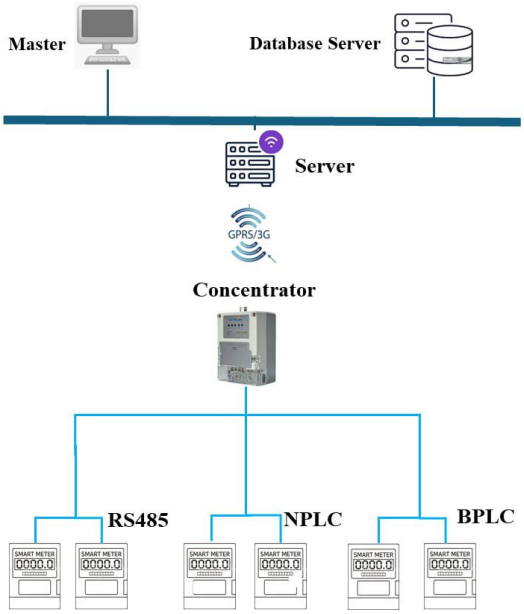
Дээрх тохиргоог ашиглан чадлын хязгаарлалтаар ачаалал хөнгөлөх туршилтыг УБЦТС ТӨХК нь 2024 онд Баянзүрх дүүргийн 2-фидерийн нийт 2176 хэрэглэгч дээр гүйцэтгэж үзсэн. Чадлын хязгаарлалтын тавилыг нэг фазын тоолуур дээр 1 кВт, гурван фазын тоолуур дээр 2 кВт байхаар удирдлагын тушаал өгөх үед нийт 2176 хэрэглэгчийн тоолууранс 2128 тохиолдол нь амжилттай болж 48 тохиолдол нь амжилтгүй болсон. Амжилтгүй болсон тохиолдлууд нь олон хэрэглэгчид зэрэг тушаал өгөх үед систем гацаж удааширдаг, хуучин орон сууцны хаалттай станц дээр мэдээлэл бүрэн очдоггүй, концентратор хэвийн боловч өөрт бүртгэлтэй тоолуурууд дохио дамжуулах үед алдаа заасан гэх зэрэг шалтгаанаас болсон байна. Мөн түүнчлэн тавилын утга өөрчлөх тушаал өгөх үед амжилттай болох хугацаа хэт урт байсан нь ажиглагдсан.

ДҮГНЭЛТ

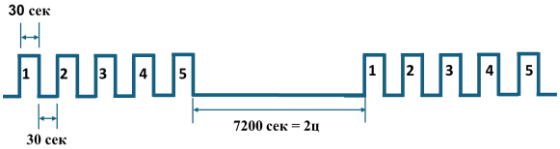
1. Судалгааны үр дүнгээс үзэхэд ухаалаг цахилгаан тоолуур ашиглан хэрэглэгчийн цахилгаан чадлын хязгаарлалтыг алсаас тохируулах боломж техникийн хувьд бүрэн хэрэгжих боломжтой байна. Айл өрхийн цахилгаан хэрэглээг судалж, цахилгаан төхөөрөмжүүдийн чадал болон хэрэглээний онцлогт үндэслэн чадлын хязгаарлалтын дөрвөн хувилбарыг боловсруулснаас хэрэглэгчийн зайлшгүй шаардлагатай хэрэглээг хангах боломжийг харгалзан 0.5 кВт болон 1 кВт чадлын хязгаарын тавилыг сонгон авч үзлээ.
2. Өвлийн улирлын оргил ачааллын үеийн (20:00–22:00 цаг) хоёр сарын дундаж ачааллын судалгаанаас харахад дээрх чадлын хязгаарлалтын тохиргоог хэрэгжүүлснээр нэг айл өрхийн хэрэглээнээс 1 дүгээр тавилын үед 2.9 кВт·цаг, 2 дугаар тавилын үед 1.9 кВт·цаг хүртэлх



7-р зураг. AMI буюу ухаалаг тоолуурын нэгсдэн систем



8-р зураг. Ухаалаг тоолуурын мэдээлэл дамжуулах архитектор



9-р зураг. Ухаалаг тоолуурын ачааллын хязгаарлалтын ажиллах зарчим.

цахилгаан энергийг хэмнэх боломжтой байна.

3. Хэрэв ийм чадлын хязгаарлалтыг 7000 хэрэглэгчид хэрэгжүүлсэн тохиолдолд оргил ачааллын үед (20:00–22:00 цаг) нийтдээ 1 дүгээр тавилын үед 22 МВт·цаг, 2 дугаар тавилын үед 14 МВт·цаг цахилгаан энергийг хэмнэх боломжтой бөгөөд энэ нь цагт ойролцоогоор 11 МВт болон 7 МВт чадлын хэмнэлтийг бий болгож байна. Энэхүү хөнгөлөлт нь ОХУ-аас импортолж буй 300 МВт чадлын 3.6% болон 2.3%-тай тэнцэх хэмжээний хэмнэлт юм.

4. Иймээс хэрэглэгчдийг хэрэглээний онцлог, төхөөрөмжийн хүчин чадлаас нь хамааран ангилан, оргил ачааллын үед тохирсон чадлын хязгаарлалт хийх нь эрчим хүчний системийн ачааллын балансыг барих, импортын цахилгаан эрчим хүчний хэмжээг бууруулах үр дүнтэй арга хэмжээ болох боломжтой байна. Мөн хэрэглэгчдийг бүрэн цахилгаанаар таслах бус, шаардлагатай хэрэглээг нь хангах хэмжээнд тохируулсан чадлын хязгаарлалт хийх замаар эрчим хүчний хэрэглээг илүү оновчтой удирдах боломжтой гэж үзэж байна.
5. Гэвч ухаалаг тоолуурын системд чадлын хязгаарлалт хийхэд тушаал өгөх, хүлээн авах хурд болон бусад алдаанаас үүдэн ажиллагааны удаашрал болон бага зэргийн алдаа гарах боломжууд байсаар байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Диспетчерийн үндэсний төв ТӨХК-ийн албан ёсны веб хуудас, https://ndc.energy.mn/

[2] Монгол улсын их хурал, “Монгол улсын засгийн газрын 2024-2028 оны үйл ажиллагааны хөтөлбөр” 2024.

[3] Эрчим хүчний зохицуулах хороо албан ёсны веб хуудас, https://erc.gov.mn/

[4] R. Mao and V. Julka, “WiMAX for advanced metering infrastructure,” 2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology, Bandung, Indonesia, 2012, pp. 15-19

[5] S. Nimbargi, S. Mhaisne, S. Nangare and M. Sinha, "Review on AMI technology for Smart Meter," 2016 IEEE International Conference on Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT), Pune, India, 2016, pp. 21-27

[6] C. Huang, C. Sun, N. Duan, C. Applegate, P. Barnes, Y. Jiang, E. Stewart “Smart Meter Pinging and Reading Through AMI Two-Way Communication Networks to Monitor Grid Edge Devices and DERs,” in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 5, pp. 4144-4153, 2022.

[7] Улаанбаатар цахилгаан түгээх сүлжээ ТӨХК, “Ухаалаг тоолуурын судалгааны тайлан” 2024.

[8] Эрчим хүчний яам албан ёсны вэб хуудас, https://energy.gov.mn/

[9] The U.S. Federal Energy Regulatory Commission Staff Team, Assess ment of Demand Response and Advanced Metering, Dec. 2020

[10] A. Ghosal and M. Conti, "Key Management Systems for Smart Grid Advanced Metering Infrastructure: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 3, pp. 2831-2848.

[11] Shyam Agarwal, Pradish M, Shailesh Kapoor, Shivakumar V, Amit Jain, B A Sawale “Ami system evaluation of service providers with prepaid features”

[12] Y. Wang, Q. Chen, T. Hong and C. Kang, "Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 3, pp. 3125-3148, May 2019

АСИНХРОН ХӨДӨЛГҮҮРИЙН ӨӨР, ӨӨР АЧААЛАЛТАЙ ҮЕИЙН ӨӨРӨӨ АСААЛТ БОЛОН ЗӨӨЛӨН АСААЛТЫН ГҮЙДЛИЙН ТУРШИЛТАД СУУРИЛСАН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

Гантулгын ЛУВСАНЖАМБА[1], Мөнхжаргалын УРТНАСАН[2], Жаргалсайханы НЯМ[3], Бандийн ТҮВШИНБАЯР[4]

Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг:luvsaa50@gmail.com[1], tuvshinbayar.b@must.edu.mn[4]

Хураангуй: **Богино холбоот ротортой асинхрон хөдөлгүүр нь энгийн, бат бөх, найдвартай хийц, хямд, ашиглалтын даац сайтай тул хамгийн өргөн хэрэглэгдэж байгаа цахилгаан хөдөлгүүрийн нэг төрөл юм. Дунд болон их чадлын хэрэглээнд ашигт үйлийн коэффициент өндөр, ажиллагаа тогтвортой байдаг нь үйлдвэрийн салбарт илүү тархах боломжийг олгосон. Гэвч асинхрон хөдөлгүүрт өөрөө асаалтын үед хэвийн гүйдлээс их хэмжээний гүйдэл үүсдэг нь энергийн үргүй зарцуулалт гаргах, хөдөлгүүрийг хуучралтад оруулах болон реле хамгаалалтыг буруу ажиллуулах зэрэг сөрөг үр дагаврыг дагуулж байдаг. Практикт хагас дамжуулагчийн технологид суурилсан давтамж хувиргагчийг ашигласнаар хөдөлгүүрийг зөөлөн асаалтын горимоор ажиллуулж их хэмжээний асаалтын гүйдлийг бууруулах болсон. Энэхүү өгүүлэлд бид асинхрон хөдөлгүүрийн өөрөө болон зөөлөн асаалтыг өөр, өөр ачаалалтай байх үед гүйцэтгэж асаалтын гүйдлүүдийн утгыг лабораторийн нөхцөлд туршилтын аргаар харьцуулан үзүүлэв. Гарсан үр дүнд үндэслэн хөдөлгүүрийн хамгаалалтын тавил тохиргоог хийх боломжтой болно.**

Түлхүүр үг: Асаалтын гүйдлийн харьцуулалт, давтамж хувиргуур, хөдөлгүүрийн хамгаалалт, мэдрэх чадвар

I. УДИРТГАЛ

Богино холбоот ротортой асинхрон хөдөлгүүрийн эргэх хэсэгтэй контакт үүсгэх сойз гэх мэт нэмэлт эд анги шаардлагагүй энгийн хийц, ашиглалтын зардал бага, найдвартай, хямд байдал нь бусад төрлийн хөдөлгүүрүүдээс илүүтэй хэрэглээнд нэвтрэх боломжийг олгосон. Дэлхий дахинаа нийт эрчим хүчний хэрэглээний 50-аас дээш хувийг асинхрон хөдөлгүүр дангаар эзэлдэг бол үйлдвэрт ашиглагдаж байгаа хөдөлгүүрийн 70 орчим хувь нь асинхрон төрлийн хөдөлгүүр байна [1].

Асинхрон хөдөлгүүрийн бас нэг давуу тал нь өөрөө асаалтын горимд ажиллах боломжтой байдал юм. Гэвч өөрөө асаалтын үед эргэлт байхгүй, гулсалт нь нэг, роторын эсэргүүцэл тэг байх тул хөдөлгүүр нь богино холболтын горимд орж улмаар хөдөлгүүрээр их хэмжээний гүйдэл гүйдэг. Өөрөө асаалтын үед асинхрон хөдөлгүүрийн асаалтын гүйдэл нь хэвийн гүйдлээс ойролцоогоор 5-аас 7 дахин ихэсдэг [2-3]. Энэ их хэмжээний гүйдэл нь хөдөлгүүрийг хуучралтад оруулж, эрчим хүчний зарцуулалтыг нэмэгдүүлэхээс гадна тухайн хөдөлгүүрийн реле хамгаалалтын буруу ажиллагаанд нөлөөлөх боломжтой. Практик жишээ дурдвал үйлдвэрийн зориулалттай асинхрон хөдөлгүүрийн асаалтын үед трансформаторын дэд өртөөний хоёрдогч талын хамгаалалт ажиллаж таслалт хийгдэх тохиолдлууд бүртгэгдсэн байна. Тус асаалтын гүйдлээс илүүтэйгээр хамгаалалтын тавилыг тавьсан тохиолдолд хэрэглэгч дээрх богино залгааны гүйдлээс илүү болох хамгаалалтын мэдрэх чадвар буурах зэрэг сөрөг нөлөө гардаг.

Асинхрон хөдөлгүүрийг ерөнхийд нь хоёр үндсэн төрөлд ангилдаг (богино холбогдсон ротортой болон фазын ротортой). Энэхүү өгүүлэлд бид богино холбогдсон ротортой асинхрон хөдөлгүүрийг авч үзсэн болно. Тус асинхрон хөдөлгүүрийн асаалтын гүйдлийг багасгах реакторын асаалт, автотрансформаторын асаалт, од-гурвалжин сэлгэх асаалт, зөөлөн асаалт гэх мэт хэд хэдэн арга байдаг [4]. Эдгээрээс хагас дамжуулагч материал дээр суурилан хийгдсэн давтамж хувиргуурын тусламжтайгаар асинхрон хөдөлгүүрийн зөөлөн асаалтыг хэрэглээнд өргөн ашиглах болсон. Зөөлөн асаалтыг ашигласнаар асинхрон хөдөлгүүрийн асаалтын гүйдлийг оролтын хүчдэлийн давтамж болон далайцын утгыг өөрчлөх замаар удирдах боломжтой. Үр дүнд нь асинхрон хөдөлгүүрийн асаалтын гүйдэл буурч хөдөлгүүрийн ашиглалт сайжирч, эрчим хүчний зарцуулалт буурч, реле хамгаалалтын ажиллагаа сайжрахаас гадна хурдны тохируулгыг илүү хялбар хийх боломжтой болно [5].

Тус өгүүлэлд өөрөө асаалт болон зөөлөн асаалтыг өөр, өөр ачаалалтай байх үед лабораторийн нөхцөлд туршилтын аргаар гүйцэтгэж асаалтын гүйдлүүдийн харьцуулалтыг хийж, асаалтын гүйдлийн коэффициентын өөрчлөлтийг тодорхойлсон бөгөөд тус үр дүнд үндэслэн хөдөлгүүрийн реле хамгаалалтын тавилын өөрчлөлт болон мэдрэх чадварыг тооцоолж, найдваржилтад хэрхэн нөлөөлөхийг харуулсан.

II. ТУРШИЛТ

1. Туршилтын төхөөрөмж болон тохиргоо

Өөр, өөр ачаалалтай үеийн асаалтын гүйдлийн туршилтыг гүйцэтгэхэд SE2673-1K марк бүхий 370 Вт чадалтай 3 фазын асинхрон хөдөлгүүрийг ашигласан (1-р зураг). Хөдөлгүүрийн ачааллыг тохируулахдаа Servo machine test system системийг ашиглан ачааллыг 0%, 50%, 100%, 120% байхаар тохируулсан [6].

Туршилтанд ашиглагдаж буй хөдөлгүүрийн параметрүүдийн утгыг TEXAS INSTRUMENT-ийн GUI Composer программ хангамж ашиглан

тодорхойлж үр дүнг 1-р хүснэгтэд харуулав. Статорын дагуу болон хөндлөн тэнхлэгийн нөлөөмжийн утгыг тодорхойлохдоо хөдөлгүүрийн голыг тормозлох шаардлагатай.

Зөөлөн асаалтыг гүйцэтгэхэд TMS320F28069M маркийн Texas Instrument компанийн микроконтроллор ашигласан TMDSHVMTRINSPIN маркийн хөдөлгүүрийн удирдлагын туршилтын төхөөрөмжийг давтамжийн хувиргуурын үүргээр ашигласан (2-р зураг) бол асаалтын үеийн гүйдлийн үйлчлэх утгыг Active Servo system-ийн тусламжтайгаар хэмжиж авсан [7].

Өөрөө асаалтын туршилтыг гүйцэтгэхэд хөдөлгүүрийг 220 В-ын 50 Гц-ын давтамжтай тэжээлийн хүчдэлд шууд холбож ажиллуулсан. Харин зөөлөн асаалтын үеийн туршилтыг давтамж хувиргуурын гаралтын хязгаар (хүчдэлийн дээд хязгаар нь 156 В, давтамжийн дээд хязгаар нь 40 Гц)-т тохируулан 3-р зурагт үзүүлсэн хамаарамжийн дагуу тэжээлийн хүчдэлийг өгсөн болно. Зөөлөн асаалттай үеийн тэжээлийн хүчдэлийг 0 утгаас дээд хязгаар хүрэх хүртэл зарцуулагдах хугацааг нь 8 секунд байхаар тохируулсан.

2. *Өөрөө асаалтын үеийн туршилтын үр дүн*

Асинхрон хөдөлгүүрийн роторын зогсонги байдалтай байх үед хүчдэл өгөхөд шууд статорт нөлөөлж түүний статорын бодит болон соронзон алдагдлын хуурмаг эсэргүүцэлтэй нийлэн хэрэглэж буй учир гүйдэл нь хэвийн гүйдлээс огцом ихэсдэг. Өөрөөр хэлбэл асаалтын үед эргэлт байхгүй, гулсалт нь $s = 1$, роторын эсэргүүцэл $R_2' = 0$ байх тул хөдөлгүүр нь богино холболтын горимд ажиллаж асаалтын гүйдэл нь их байх бөгөөд (1)-р тэгшитгэлээр олно. Харин хөдөлгүүр хэвийн ажиллаж байх үед асаалтын гүйдэл нь (2)-р тэгшитгэлээр бодогдох бөгөөд гулсалт нь $s =$



1-р зураг. Хөдөлгүүрийн асаалтын гүйдлийн туршилтын стент.

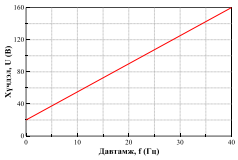
ЦАХИЛГААН ТӨХӨӨРӨМЖҮҮД ЗАРЦУУЛАЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

Хөдөлгүүрийн эсэргүүцэл	Хэмжээ
R_1 - статорын бодит эсэргүүцэл	21.208 Ω
R_2 -роторын бодит эсэргүүцэн	14.199 Ω
L_{sd} - статорын дагуу тэнхлэгийн нөлөөмж	0.12027 Н
L_{sq} - статорын хөндлөн тэнхлэгийн нөлөөмж	0.12027 Н



2-р зураг. TMDSHVMTRINSPIN маркийн хөдөлгүүрийн удирдлагын туршилтын төхөөрөмж.



3-р зураг. Зөөлөн асаалтын үеийн тэжээлийн хүчдэл болон давтамжийн хамаарал.

$0.02 \sim 0.05$ байх бөгөөд роторын эсэргүүцэл нь гулсалтаас хамааран ихсэх тул хэвийн гүйдэл нь асаалтын гүйдэлтэй харьцангуй буурна. Тус роторын эсэргүүцлийн өөрчлөлтөөс хамаарч хэвийн үеийн гүйдэл тодорхойлогдох бөгөөд асаалтын үеийн гүйдлээс харьцангуй бага байна.

Асаалтын болон хэвийн гүйдлүүдийг (1) болон (2)-р тэгшитгэлүүдээр олно [8].

$$I_{\text{асаалт}} = V/\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2)^2} \qquad (1)$$

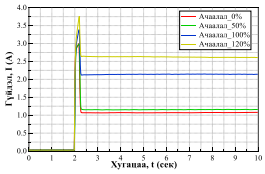
$$I_{\text{хэв}} = V/(\sqrt{(R_1 + R_2'/S)^2 + (X_1 + X_2)^2} \qquad (2)$$

Энд: R_1, X_1 нь статорын бодит болон хуурмаг эсэргүүцэл, X_2 нь статорын соронзон алдагдлын хуурмаг эсэргүүцэл, R_2' нь роторын хувиргасан бодит эсэргүүцэл, s нь гулсалт.

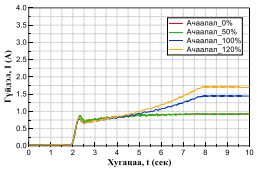
Өөрөө асаалтын үеийн туршилтын гүйдлийн үр дүнг 4-р зурагт үзүүлэв. 1-р хүснэгтэнд хөдөлгүүрийн эсэргүүцлийн параметрийг оруулав. Туршилтын гүйдлийн утга нь тооцооны утгатай 5% хувийн зөрөөтэй буюу ойролцоо гарч байгаа нь туршилт үнэн зөв явагдсаныг харуулж байна. Мөн онолын хувьд асаалтын гүйдэл нь хөдөлгүүрийн ачааллаас үл хамаарах ёстой боловч туршилтын үеийн асаалтын гүйдлийн хамгийн их утга хооронд бага зэргийн зөрөө гарч байна. Манай туршилтад ашиглагдаж буй хөдөлгүүр нь бага чадлын хөдөлгүүр бөгөөд хөдөлгүүрийн асаалтын гүйдэлд оролтын хүчдэлийн хэлбэлзэл нөлөөлөх боломжтой юм.

3. Зөөлөн асаалтын үеийн туршилтын үр дүн

Зөөлөн асаалтын үед 3-р зурагт үзүүлсэн хүчдэл болон давтамжийн хамаарлын дагуу тэжээлийн хүчдэлийг давтамж хувиргуураас өгсөн. Энэ нь хөдөлгүүрийн механик холбооны элэгдлийг бууруулж, статорын ороомгийн халалтаас сэргийлж ашиглалтын хугацааг уртасгахаас гадна эргэлтийн хурд, моментыг хүссэн хэмжээнд тохируулж тухайн нөхцөлд тохирсон гүйдлийг хэрэглэнэ. Ингэснээр энергийн хэрэглээ багасна. Мөн асах үед их хэмжээний гүйдэл үүсэхгүй учир реле хамгаалалтын мэдрэх чадварыг дээшлүүлэх давуу талтай. Хэмжилтийн үр дүнгээс харахад (6-р зураг) хэвийн үеийн гүйдлийн утга нь өөрөө асаалтын үеийн хэвийн гүйдлийн утгаас харьцангуй олон дахин бага байгаа нь туршилтад ашиглаж буй давтамж хувиргуурын гаралтын хүчдэлтэй холбоотой.



4-р зураг. Өөрөө асаалтын үеийн туршилтын гүйдлийн утга.



5-р зураг. Зөөлөн асаалтын үеийн туршилтын гүйдлийн утга. (0% болон 50% ачааллын гүйдлүүд ойролцоо гарч давхацсан учир харагдаагүй болно.)



6-р зураг. Өөрийн асаалт болон зөөлөн асаалтын үеийн туршилтын гүйдлийн утгуудын харьцуулалт (100% ачаалалтай үед).

Хүчдэлээ давтамж хувиргуурын хязгаартаа тааруулан 150В-оор хязгаарлагдан, статорын нөлөөмжийн эсэргүүцлийг 40 Гц үед бодож фазын хэвийн гүйдлийн тооцоолвол дараах утгатай гарч байна.

$$I_{\text{хэв}} = \frac{149}{\sqrt{\left(21.2 + \frac{14.199}{0.20}\right)^2 + (21.3 + 21.3)^2}} = 1.46A$$

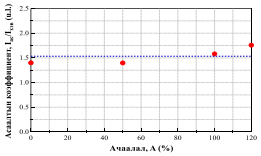
Уг тооцооны үр дүн нь хэмжилтийн утгатай таарч байна.

III. ҮР ДҮНГИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

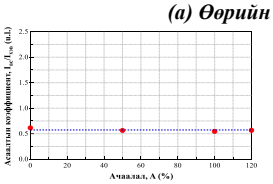
Асаалтын гүйдлүүдийг хөдөлгүүрийн 100 хувь ачаалалтай байх үеийн хэвийн гүйдлийн утгад харьцуулсан асаалтын коэффициентын харьцааг өөрөө асаалт болон зөөлөн асаалтын хувьд 7(a), 7(b)-р зурагт үзүүлсэн байна. Өөрөө асаалтын үед асаалтын гүйдэл нь хэвийн үеийн гүйдлээс дунджаар 1.6 дахин өндөр байгаа бол зөөлөн асаалтын үед асаалтын гүйдэл нь хэвийн гүйдлээс ойролцоогоор 0.6 дахин их байна. Өөрөөр хэлбэл зөөлөн асаалтын үед асаалтын гүйдэл нь хэвийн гүйдлээс ойролцоогоор 2 дахин бага байна. Тус асаалтын коэффициентыг олоход асаалтын гүйдлийг хэвийн үеийн гүйдэлд харьцуулсан тул 5-р зурагт үзүүлсэн асаалтын төрлөөс шалтгаалсан хэвийн үеийн гүйдлийн өөрчлөлт нь асаалтын коэффициентын утганд нөлөөлөхгүй.

1. Хөдөлгүүрийн реле хамгаалалтын тавил

Хөдөлгүүрийн гүйдлийн хамгаалалтын хувьд хамгаалалтын тавилыг хөдөлгүүр дээр гарах богино залгааны хамгийн бага гүйдлээс бага боловч хөдөлгүүрийн ажиллагааны хамгийн өндөр гүйдлээс



(a) Өөрийн асаалтын



(b) Зөөлөн асаалтын үед

7-р зураг. Асаалтын гүйдэл болон 100 хувь ачаалалтай үеийн хэвийн гүйдлүүдийн харьцаа асаалт тус бүрээр.

1.8 дахин ихээр тохируулах шаардлагатай байдаг [9]. Тиймээс хамгаалалтын тавилыг өөрөө асаалтын үеийн асаалтын гүйдлийн утгаас тооцвол

$$I_{\text{хам.аж}} = 1.8 * \frac{V}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2)^2}} \qquad (3)$$

Энд: $I_{\text{хам.аж}}$ нь хамгаалалтын ажиллах гүйдэл, 1.8 нь найдваржилтын коэффициент

Хөдөлгүүр дээр гарч болох богино залгааны хамгийн бага гүйдлийг олоход хөдөлгүүрийн богино залгааны үеийн эсэргүүцлийг ашиглах ёстой. Өөрөөр хэлбэл (1)-р тэгшитгэлийн дагуу богино залгааны хамгийн бага гүйдэл нь асаалтын гүйдэлтэй тэнцүү байдаг [10].

Гэсэн хэдий ч тус судалгааны ажлын хувьд туршилтанд ашиглагдаж буй хөдөлгүүр нь богино холбогдсон ротортой асинхрон хөдөлгүүр тул ротор дээр богино залгаа болох магадлал маш бага гэж үзэж богино залгааны гүйдлийг (4)-р тэгшитгэлээр тооцов.

$$I_{\text{бз}} = V/\sqrt{{R_1}^2 + {X_1}^2} \qquad (4)$$

Энд: V-нь фазын хүчдэл, R_1, X_1 нь статорын бодит болон хуурмаг эсэргүүцэл.

Хэрэв 4-р тэгшитгэлээр бидний туршилтад ашиглагдсан асинхрон хөдөлгүүрийн богино залгааны гүйдлийг олбол 6.46А гарч байна.

$$I_{\text{б.з}} = \frac{220}{\sqrt{(21.2)^2 + (26.64)^2}} = 6.46A$$

Өөрөө асаалтын үед хөдөлгүүрийн ажиллагааны хамгийн их гүйдэл гэдэг нь асаалтын үеийн гүйдэл байна. Мөн хамгаалалтын мэдрэх чадварыг 5-р тэгшитгэлээр олдог бөгөөд мэдрэх чадвар өндөр байх тусам хамгаалалтын найдваржилт өндөрсөж хөдөлгүүрийн аюулгүй байдал хангагддаг гэж үздэг [11].

$$M_{\text{м.ч}} = I_{\text{бз}}/I_{\text{хам.аж}} \qquad (5)$$

Энд: $I_{\text{бз}}$ нь хөдөлгүүр дээр гарах богино залгааны хамгийн бага гүйдэл, $I_{\text{хам.аж}}$ нь хөдөлгүүрийн хамгаалалтын ажиллах гүйдэл.

Тиймээс өөрийн асаалтын үед $I_{\text{асаалт}}$ нь хэвийн үеийн гүйдлийн утгаас харьцангуй өндөр буюу 3.44А байсан нь хэмжилтээр тогтоогдсон. Тус асаалтын гүйдлээс реле хамгаалалтын тавилыг тооцвол $I_{\text{хам.аж}} = 6.192\text{A}$ гарч байгаа бөгөөд хөдөлгүүрийн богино залгааны гүйдлийн утгыг ашиглан реле хамгаалалтын мэдрэх чадварыг тооцоолбол $M_{\text{м.ч}} < 1$ гарч байгаа нь хамгаалалтын найдваржилт муу байгааг илэрхийлж байна. Тус асуудлаас зайлсхийхийн тулд хугацааны барилттай гүйдлийн хамгаалалтын функцийг ашигладаг. Гэвч хугацааны барилттай хамгаалалт нь хөдөлгүүрийн гэмтлийн үед эвдрэл гарах боломжийг улам нэмэгдүүлэх боломжийг олгодог [12].

Хөдөлгүүрийн зөөлөн асаалтыг ашигласнаар асаалтыг гүйдлийг мэдэгдэхүйц бууруулснаар гүйлдийн хамгаалалтын мэдрэх чадварыг $M_{\text{м.ч}} > 1.5$ хүртэл дээшлүүлснээр хугацааны барилттай хамгаалалтын функц ашиглах шаардлагагүй болж реле хамгаалалтын ажиллагаа түргэсэж найдвартай ажиллагаа дээшлэн, техникийн болон эдийн засгийн эрсдэлийг бууруулах боломжтой байна.

ДҮГНЭЛТ

Энэхүү өгүүллээр бид асинхрон хөдөлгүүрийн асаалтын гүйдлийг өөрөө асаалт болон зөөлөн асаалтыг үед туршилтын аргаар тодорхойлсон бөгөөд тус үр дүнд суурилж хөдөлгүүрийн гүйдлийн хамгаалалтын мэдрэх чадварыг тодорхойлж үзсэн. Үр дүнд нь тус хөдөлгүүрийн өөрийн асаалтын горимд гүйдлийн ихсэлтийн хамгаалалтын мэдрэх чадвар муутай тул ашиглах боломжгүй бол зөөлөн асаалтын горимд асаалтын гүйдэл буурч мэдрэх чадвар дээшилснээр гүйдлийн ихсэлтийн хамгаалалтыг ашиглах боломжтой болж байгааг тооцоогоор баталлаа.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Paul Waide and Conrad U. (2011). “BrunnerEnergy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems” IEA (International Energy Agency), pp. 11-31

[2] Д.Өлзий-Орших (2024). “Цахилгаан машин, бичил машин” 140-р хуудас.

[3] Эх сурвалж: Technological University (Maubin), Myanmar. “Three Phase Induction Motor Starting Analysis Using ETAP.” International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET) e-ISSN: 2319-8753

[4] Nana Twum Duah, Isaac Kofi Otchere, Kwabena Amoako Kyeremeh and Joseph Owusu “Comparative Analysis of Different Methods of Starting Induction Motor”, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 9, Iss. 12, pp. 322-327, 2022

[5] Orok Ifiok Jackson, Ekom Enefiok Okpo, and Anyanime Tim Umoette. “Comparative Analysis of Direct and Soft Starting Method for Induction Motor on Difference Load Levels”, Journal of Engineering Research and Reports, Vol. 26, Iss. 10, pp. 308-322, 2024

[6] L. Dettmar, Modellbasierte Entwicklung einer feldorientierten Regelung für Asynchronmaschinen, Master’s thesis, Hochschule Bochum, Bochum, Germany, Oct. 2024

[7] Texas Instruments, TMS320F28069M, TMS320F28068M InstaSPIN-MOTION™ Software User’s Guide, document SPRUHJ0C, rev. Oct. 2021.

[8] Stephen J. Chapman, “Electric Machinery and Power System Fundamentals” BAE SYSTEMS Australia, pp. 126-128, 2001

[9] Ж.Бат-Эрдэнэ, “Эрчим хүчний системийн реле хамгаалалт”, 2019

[10] Chapman, S.J., “Electric Machinery Fundamentals”, 4th edition, McGraw-Hill, pp. 380-472, 2003.

[11] Н.Цэвгээ, Ж.Арслан, “Реле хамгаалалт, автоматикийн элементийн бааз”, 2019

[12] Schweitzer Engineering Laboratories, SEL-710 Motor Protection Relay, WI-5180, Dec. 7, 2018.

УТАСГҮЙ СҮЛЖЭЭНИЙ ТЕХНОЛОГИ АШИГЛАЖ РЕЛЕ ХАМГААЛАЛТЫН ТӨХӨӨРӨМЖӨӨС ӨГӨГДӨЛ ЦУГЛУУЛАХ БИЧИЛ SCADA СИСТЕМИЙН СУДАЛГАА

Болбаатарын МӨНХТУЯА[1], Энхтөрийн СЭДЗАНА[2], Баярсайханы ДЭМБЭРЭЛЗОДОВ[3], Бандийн ТҮВШИНБАЯР[4]

Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгааны техникийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: tuvshinbayar.b@must.edu.mn[4]

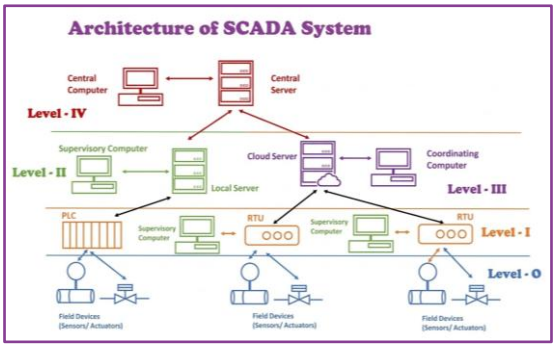
Хураангуй: Дэлхийн эрчим хүчний салбар хурдацтай хөгжихийн хэрээр дэд станц болон үйлдвэр дээр ашиглагдаж байгаа төхөөрөмжүүд нь ухаалаг болон шинэчлэгдэж байна. Үүнийг дагаад бодит цагийн хяналт удирдлагын систем (СКАДА)-ийг хэрэглээнд өргөн нэвтрүүлж байна. СКАДА системийн гол бүрэлдэхүүн хэсэг болох талбайн төхөөрөмжүүдээс мэдээлэл цуглуулах, нэгтгэх зорилгоор RTU төхөөрөмж ашигладаг. Гэвч RTU төхөөрөмж нь үнэ өртөг ихтэй, мөн жижиг дунд үйлдвэрүүд хяналт удирдлага хийх цөөн тооны төхөөрөмж байгаа тохиолдолд RTU төхөөрөмж ашиглах нь зардал ихэсгэх сул талтай. Тиймээс энэхүү судалгааны ажлаар RTU төхөөрөмжийг орлож чадахаар микроконтроллёр дээр суурилсан өртөг багатай удирдлагын төхөөрөмжийг хөгжүүлэхээр зорьсон. Ухаалаг тоон төхөөрөмжөөс мэдээлэл цуглуулахдаа RS-232 интерфейс болон Modbus протокол ашиглан авсан. Талбайн төхөөрөмжөөс авсан өгөгдлөө утасгүй сүлжээ (LoRa) ашиглаж төв систем рүү өгөх БИЧИЛ СКАДА системийг хөгжүүлсэн болно.

Түлхүүр үг:LoRa (Long Range), IED (Intelligent Electronic Device), Мэдээлэл дамжуулах протокол, микроконтроллёр

I. УДИРТГАЛ

Эрчим хүчний салбарын чиг хандлага нь тоон технологийн шийдэл рүү чиглэж байна. Уламжлалт цахилгаан эрчим хүчний сүлжээ нь ухаалаг, уян хатан, өөрөө удирдах чадвартай “Smart Grid” буюу “Ухаалаг сүлжээ” гэсэн шинэ ойлголт руу шилжиж байгаа бөгөөд энэ шилжилтийн гол онцлох технологийн шийдлүүдийн нэг нь СКАДА (Supervisory Control and Data Acquisition) систем юм [1]. Цахилгаан дамжуулах үндэсний сүлжээ ТӨХК (ЦДҮС ТӨХК)-ийн 2024 оны тайланд тусгасанчлан нийт 84 дэд станцын зөвхөн 36.9% буюу 31 станц нь СКАДА системд бодитоор холбогдсон байна [2]. Харин нэмж алслагдсан болон сүлжээгүй газар байрлах дэд станцуудыг нэмэлтээр холбосноор 72 дэд станц СКАДА системд холбогдох бололцоотой гэсэн тайлан мэдээлэл байна [2].

СКАДА нь алсын зайнаас бодит хугацааны (real-time) горимд хянах, удирдах зориулалттай техник болон программ хангамжийн цогцолбор юм. СКАДА системийн гол бүрэлдэхүүн болох RTU (Remote Terminal Unit) төхөөрөмж нь өндөр өртөг, нарийн суурилуулалтын шаардлагаас шалтгаалан жижиг



1-р зураг. СКАДА систем үндсэн бүтэц

болон дунд оврын дэд станцуудад нэвтрүүлэхэд эдийн засгийн хувьд хүндрэлтэй байдаг.

СКАДА системийн ажиллагааны үндсэн бүтцийн схемийг 1-р зурагт харуулсан байна. Системийн хамгийн доод хэсэг буюу “Level 0” түвшинд байрлах мэдрэгч болон реле хамгаалалтын төхөөрөмжүүд нь процессын бодит өгөгдлийг цуглуулж, түүнийгээ удирдлагын “Level I” түвшний PLC (Programmable Logic Controller) болон RTU төхөөрөмжүүд рүү дамжуулдаг. Уг хяналтын төхөөрөмжүүд нь хүлээн авсан мэдээллийг тоон хэлбэрт шилжүүлэн боловсруулж, “Level II” болон “Level III” түвшинд байрлах суурин (Local) болон үүлэн (Cloud) серверүүд рүү илгээснээр оператор хүн үйлдвэр болон станцын явцыг бодит хугацаанд хянах боломж бүрддэг. “Level IV” түвшинд байрлах төв сервер нь салбар нэгжүүдээс ирсэн бүх мэдээллийг нэгтгэж, өгөгдөл цуглуулан мөн доод түвшин рүү удирдлагын команд дамжуулах хоёр талт холбоог найдвартай хангаж байдаг. Серверт хадгалагдсан өгөгдлийн сан нь зөвхөн хяналт хийгээд зогсохгүй, хадгалагдсан их өгөгдөл (Big data) дээр тулгуурлан урт хугацааны тайлан боловсруулах, удирдлагын оновчтой шийдэл хийх боломжийг олгодог.

Одоогийн байдлаар IoT (Internet of Things) системд ашиглагдах төрөл бүрийн харилцаа холбооны технологиуд нөлөөгөө тэлэхээр өрсөлдөж байна [3]. Эдгээрийг өгөгдлийн хурд болон хамрах хүрээнээс хамааран Bluetooth, Zigbee, WiFi гэсэн гурван төрөлд хуваж болох ба эдгээр нь ойрын зайн холбоонд ашиглагддаг [4]. Гэвч эдгээр технологиуд нь эрчим хүчний өндөр хэрэглээ болон хамрах хүрээний хязгаарлагдмал байдлаас шалтгаалан алслагдсан цэгүүдээс мэдээлэл цуглуулахад төдийлөн тохиромжгүй байдаг [5]. Тиймээс энэхүү сул талыг нөхөх зорилгоор LPWAN (Low Power Wide Area Network) технологи гарч ирсэн. Энэ нь бага цахилгаан хэрэглээтэй, хол зайд ажиллах боломжтой

боловч өгөгдлийн хурд харьцангуй бага байдаг [6]. LPWAN ангиллын технологиуд дундаас алсын зайн холболт болон мэдээлэл дамжуулах өндөр чадвараараа LoRa (Long Range) технологи онцгойрдог бөгөөд энэ нь тус сүлжээний утасгүй интерфейс болон хөгжүүлэгдсэн [7]. LoRa CSS (Chirp Spread Spectrum) модуляцийг ашигласнаар IoT-ийн олон талт хэрэгцээг хангах техникийн шийдлийг хэрэгжүүлэх боломжтой болсон [8]. Уг модуляцийн арга нь зурвасын өргөн хүрээ болон дамжуулах хурдны уян хатан зохицуулалтыг бий болгохын зэрэгцээ холболтын өндөр нөөц (link budget)-ийн тусламжтайгаар саад ихтэй орчинд алсын зайд найдвартай мэдээлэл солилцох нөхцөлийг бүрдүүлдэг байна [9].

LoRa технологид ашигласан шинэ шийдэл 2-р зурагт үзүүлсэнчлэн системийн үндсэн логикоор ижил боловч мэдээлэл дамжуулах аргаараа өөр гэдгийг харуулсан байна. Уламжлалт архитектурт “Level I” түвшинд байрлах PLC болон RTU төхөөрөмжүүд нь мэдрэгчээс ирсэн өгөгдлийг цуглуулж, ихэвчлэн кабелийн холболтоор (Ethernet, RS-485 г.м) серверүүд рүү дамжуулдаг. Харин бидний хөгжүүлсэн LoRa-д суурилсан системийн хувьд эдгээр зангилаа төхөөрөмжүүдийн оролцоог багасгаж, шууд LoRa модулиудыг ашиглан мэдээллийг утасгүйгээр, хол зайд дамжуулахыг зорьсон.

II. Алгоритм ажиллагаа

Энэ бүлэгт бичил СКАДА системийн ажиллагааны алгоритмыг тайлбарлана. Бичил СКАДА систем Мастер төхөөрөмж болон Слейв төхөөрөмж гэсэн хоёр үндсэн хэсгээс бүрдэнэ. IED төхөөрөмжөөс мэдээллээ уншаад төв серверт дамжуулж байгаа хэсгийг Слейв төхөөрөмж гэнэ. Слейв төхөөрөмж нь Arduino микроконтроллёр дээр суурилсан бөгөөд үндсэн гурван үүрэг гүйцэтгэдэг. Үүнд:

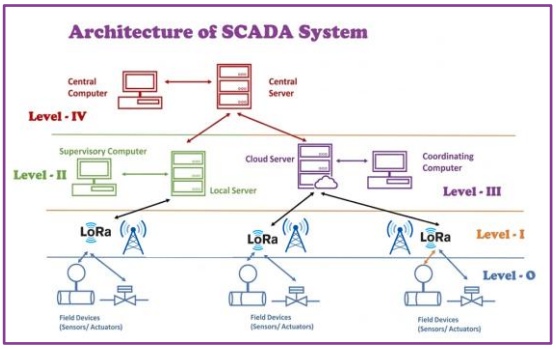
- ✓ IED-ээс өгөгдөл цуглуулах,
- ✓ LoRa-гаар Мастер төхөөрөмж рүү дамжуулах,
- ✓ Мастер төхөөрөмжөөс ирсэн командыг хүлээн авч IED-рүү дамжуулах.

Слейв төхөөрөмж нь IED-ээс тухайн сонгосон протоколоор өгөгдөл цуглуулж LoRa утасгүй сүлжээ ашиглан Мастер төхөөрөмж рүү дамжуулдаг. Слейв төхөөрөмж нь IED-ээс мэдээлэл авах протоколын төрлөөс хамаарч тухайн протоколын санг микроконтроллёр дээр суулгаж өгнө. IED-ээс гүйдэл, хүчдэл зэрэг параметрүүдийг уншиж авах ба амжилттай уншиж авсан тохиолдолд Мастер төхөөрөмж рүү LoRa сүлжээ ашиглаж мэдээллээ дамжуулна. Мөн Мастер төхөөрөмжөөс команд хүлээж авах ба таслах, залгах команд ирсэн тохиолдолд IED-рүү тус командуудыг илгээнэ. Мастер төхөөрөмж мөн адил микроконтроллёр дээр суурилах ба Слейв төхөөрөмжөөс өгөгдлийг хүлээж авах, авсан өгөгдлийг хадгалах, HMI дэлгэцээр харуулах, гараас өгсөн командуудыг уншиж Слейв төхөөрөмж рүү команд илгээх зэрэг үйлдлүүдийг хийнэ. Мастер төхөөрөмжөөр нь 3-р зурагд харуулсны дагуу ажиллах ба Слейв төхөөрөмжөөс ирсэн гүйдэл, хүчдэл, таслуурын төлөв зэрэг өгөгдлүүдийг хүлээж авах ба авсан мэдээллээ HMI дэлгэц дээр харуулах, өгөгдлийг хадгалах үйлдлүүдийг гүйцэтгэнэ. Тус төхөөрөмжид гаднаас оролтын дохио өгөх таслах, залгах товчлуурууд байх ба эдгээр товчлуурууд дарагдсан үед командуудыг уншиж Слейв төхөөрөмж рүү тасал, залга гэсэн командыг илгээнэ.

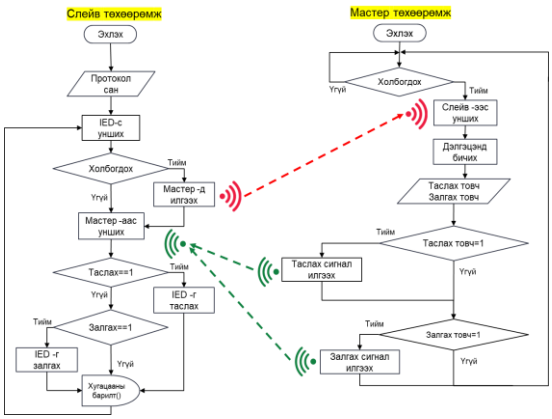
III. Техник хангамж

Өмнөх бүлэгт бичил СКАДА системийн ажиллагааны алгоритмын талаар өгүүлсэн бол энэ бүлэгт IED ба Слейв төхөөрөмж хооронд, Слейв төхөөрөмж ба Мастер төхөөрөмжийн хооронд ямар техник хангамж ашигласан талаар өгүүлэх болно. IED-ээс Слейв төхөөрөмжөөр мэдээлэл авахдаа бид Arduino микроконтроллёр ашигласан. Arduino нь бичил төсөл гүйцэтгэхэд өргөн хэрэглэгддэг нээлттэй микроконтоллёр юм. Сүүлийн үед Arduino нь хямд өртөгтэй, цахилгаан зарцуулалт бага учир өргөнөөр хэрэглэгдэх болсон.

IED нь гаднын төхөөрөмжүүдтэй мэдээлэл солилцохдоо RS-232, RS-485, Ethernet гэх зэрэг түгээмэл физик интерфейсүүдийг ашигладаг. Энэхүү судалгаагаар бид дамжуулах болон түгээх сүлжээнд түгээмэл хэрэглэгдэж байгаа SEL маркийн релег IED төхөөрөмж болгож сонгосон бөгөөд RS-232 интерфейсээр Слейв төхөөрөмжтэй холбогдсон. Arduino микроконтроллёр нь RS232 физик интерфейсийг шууд дэмждэггүй. Учир нь хүчдэлийн



2-р зураг. СКАДА систем үндсэн бүтэц



3-р зураг. Бичил СКАДА системийн ажиллагааны алгоритм

түвшин нь өөр бөгөөд RS-232 стандартад логик ‘1’ нь –3В ~ –25В, логик ‘0’ нь +3В ~ +25В хүчдэлтэй байдаг бол Arduino микроконтроллёр нь TTL логик ашигладаг бөгөөд логик ‘1’ нь +3.3В ~ +5В, логик ‘0’ нь 0В ~ 0.7В хооронд байна. Иймээс RS-232-г Arduino-д шууд холбох үед хүчдэлийн зөрөөний улмаас оролт гаралтын порт нь гэмтэх аюултай. Тиймээс RS-232-аас TTL түвшний дохио руу хөрвүүлэгч MAX232 ашиглаж мэдээллээ авсан.

Бидний ашиглаж буй IED нь загвар болон хэрэглээнээс хамааран Modbus RTU/TCP, DNP3, IEC61850, SEL, IEC60870 гэх зэрэг протоколуудыг

Утасгүй холбооны технологиуд

1-р хүснэгт

Үзүүлэлт	LoRa	ZigBee	WiMAX	Bluetooth	Wi-Fi
Үнэ хямд	X	X		X	
Гадны нөлөөнд тэсвэртэй	X				
Мэдээлэл дамжих хүрээ өргөн	X				
Нэг дор олон төхөөрөмж холбох боломжтой	X	X	X		X
Аюулгүй байдал, мэдээллийн найдвaржилт	X	X	X		X
Үнэ хямд	X	X		X	

дэмжин ажиллах боломжтой. Энэхүү судалгаанд цахилгаан системд өргөн хэрэглэгддэг Modbus RTU протоколыг сонгосон. Modbus RTU нь Arduino микроконтроллёр дээр ашиглахад хамгийн хялбар бөгөөд нээлттэй эх сурвалж ихтэй протокол.

Modbus протокол нь Мастер болон Слейв харилцааны бүтэцтэй ажилладаг бөгөөд хүсэлт илгээж хариу өгөх зарчим дээр ажилдаг ба хэт хурдан хүсэлт илгээвэл хариуг хүлээн авч чадахгүй алдаа үүсэх асуудалтай байдаг тул заавал хугацааны завсарлага авдаг. Тиймээс дээр дурсаж байсанчлан Слейв төхөөрөмж (Arduino) нь SEL реленээс мэдээлэл авахын тулд хүсэлт илгээх учраас 3-р зурагт харуулсан хугацааны барилтыг заавал тавих шаардлагатай байдаг.

Утасгүй холбооны Lora, Wifi, Bluetooth, 4G гэх зэрэг технологиуд байдаг ба 1-р хүснэгтэд харьцуулалтыг харуулав. Мастер төхөөрөмж болон Слейв төхөөрөмж хооронд EBYTE компанийн L32-433UD22S загварын LoRa утасгүй сүлжээ ашиглаж өгөгдлөө солилцсон. Уг модуль нь Semtech компанийн SX1278 чипт суурилсан бөгөөд sub-GHz ISM зурвасын (137–525 MHz) хэрэглээнд зориулсан өндөр гүйцэтгэлтэй юм. Уг модуль нь 433 MHz



4-р зураг. Бичил СКАДА системийн холболтын бүдүүвч



5-р зураг. Бичил СКАДА системийн биет байдал (Слейв)



6-р зураг. Бичил СКАДА системийн биет байдал (Мастер)

давтамжаар ажиллаж, 22 dBm дамжуулах чадалтай, UART интерфейсээр Arduino-тай холбогддог. Мастер төхөөрөмж нь Слейв төхөөрөмжөөс хүлээж авсан өгөгдлөө HMI дэлгэц дээр харуулна.

IV. Туршилтын үр дүн

Эхний туршилтаар бид Мастер төхөөрөмжөөс явуулсан команд IED дээр очих хугацааг хэмжсэн. Хугацааны хэмжилт хийхдээ Слейв төхөөрөмж команд хүлээн авсан үедээ буцаан хариу илгээх болно. Мастер төхөөрөмж нь явуулсан командын хугацааг тэмдэглэж аваад, Слейв төхөөрөмжөөс хариу ирэх хугацааг мөн адил тэмдэглэж авна. Энэ бичигдсэн хугацааг 2-т хуваасnаар мэдээлэл нэг чиглэлд дамжих хугацааг тооцсон болно. -р зурагт мэдээлэл дамжих хугацаа нь алгоритмын хугацаа барилт болон мэдээлэл дамжих хугацааны хамаарлыг харуулав.

Хоёрдох туршилтаар бид IED төхөөрөмжөөс Мастер төхөөрөмжид ирэх мэдээллийн хугацааг

хэмжсэн. Туршилтыг хийхдээ Мастер төхөөрөмж нь IED-ийн таслуурын төлөвийг байнгын унших хүсэлт явуулах ба IED төхөөрөмж нь тасралтгүй таслуурын төлөвийн мэдээлэл явуулна. IED төхөөрөмжөөс гараар таслуурын төлөв өөрчлөхөд Мастер төхөөрөмж дээр өмнө нь хадгалагдсан байсан таслуурын төлөв хэдий хугацааны дараа өөрчлөгдөж байгаа хугацааг хэмжиж авсан болно.

Туршилтын үр дүнг харахад эхний 0-300мс хугацаанд Modbus протоколоор мэдээлэл дамжуулахад алдаа гарж байгаа ба 0-300мс хооронд ажиллахгүй бүс үүсэж байна. Мөн алгоритмын хугацааны барилт 400–500 мс орчим байх үед мэдээлэл дамжуулах хугацаа богиносдог боловч хугацааны барилт 500–900 мс болох үед мэдээллийн дамжих хугацаа уртассан байна. Тиймээс мэдээлэл дамжих хугацааг богино байлгах хамгийн оновчтой утга нь алгоритмын хугацаа барилт 500 мс байх үе юм.

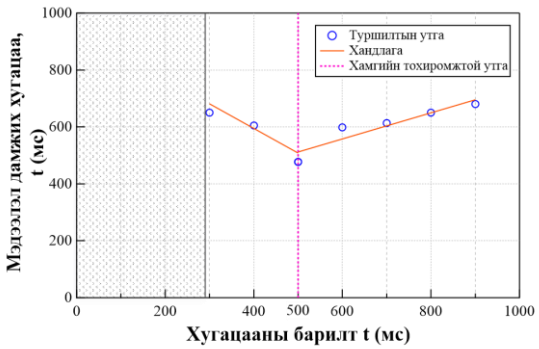
V. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү өгүүлэлд бид СКАДА системийн үндсэн бүрэлдэхүүн хэсэг болох талбайн төхөөрөмжүүдээс мэдээлэл цуглуулах RTU төхөөрөмжийн оронд хямд зардлаар микроконтроллёр ашиглаж утасгүй технологи ашиглан мэдээлэл цуглуулах төхөөрөмж хийж гүйцэтгэлээ.

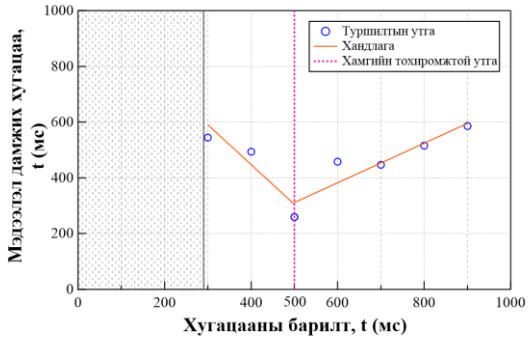
Ингэхдээ SEL маркийн реленээс RS-232 интерфейсээр Modbus протокол ашиглаж слейв төхөөрөмж дээр өгөгдлийг авч LoRa сүлжээ ашиглаж Мастер төхөөрөмж рүү мэдээлэл амжилттай дамжуулсан. Бидний туршилтаар манай төхөөрөмж Modbus RTU протоколын хариу хүлээх хугацаа болон LoRa-н дамжуулалтын хугацааг хамгийн тохиромжтой байх үеийн утгыг туршилтаар судлаж 500 мсек байх нь хамгийн тохиромжтой байсан.

Энэхүү судалгаагаар дэд станцуудад зориулсан бичил алсын зайн өгөгдөл дамжуулах системийг Arduino UNO микроконтроллёр болон LoRa утасгүй холбооны технологийг хослуулан боловсруулж, IED төхөөрөмжийг алсаас утасгүй технологиор хянаж, удирдах практикт боломжтойг туршилтаар харуулсан.

Цаашид судалгааны ажлыг илүү хурдан бөгөөд найдвартай ажиллагаа дээр анхаарч ажиллах шаардлагатай бөгөөд мэдээлэл дамжуулах хурдыг MQTT протокол эсвэл нэг чиглэлийн LoRa модуль ашиглах бол кибер аюулгүй байдлыг нууцлалын функц оруулж сайжруулах боломжтой.



7-р зураг. Бичил СКАДА системийн мэдээлэл өгөөд авч буй нийт хугацааны хэмжилтийн үр дүн



8-р зураг. Бичил СКАДА системийн зөвхөн мэдээлэл унших хугацааны хэмжилтийн үр дүн

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Fang, X., Misra, S., Xue, G., & Yang, D. (2012). "Smart Grid — The New Era of Power Systems: A Survey." IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14(4), 944-980. J.

[2] Цахилгаан дамжуулах үндэсний сүлжээ" ТӨХК. (2024). Үйл ажиллагааны тайлан - 2024. Улаанбаатар

[3] Цахилгаан дамжуулах үндэсний сүлжээ" ТӨХК. (2024). Үйл ажиллагааны тайлан - 2024. Улаанбаатар

[4] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M.Ayyash, ”Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols,and applications,” IEEE Commun. Surv. Tuts., vol. 17, no. 4, pp.

[5] A. Whitmore, A. Agarwal, and L. Xu, ”The Internet of Things? A survey of topics and trends,” Information Systems Frontiers, vol. 17, no. 2, pp.261–274, April, 2015.

[6] V. Gunes, S. Peter, T. Givargis, and F. Vahid, ”A survey on concepts,applications, and challenges in cyber-physical systems,” KSII Trans.Internet Inf. Syst., vol. 8, no. 12, pp. 4242–4268, Dec., 2014.

[7] P. Baronti, P. Pillai, V. W. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu,”Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the802.15. 4 and ZigBee standards,” Computer Communications, vol 30,no. 7, pp. 1655–1695, May, 2007.

[8] R. S. Sinha, Y. Wei, and S-H. Hwang, ”A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT,” KICS ICT express 2017, pp. 14–21, Mar., 2017.

[9] J.-P. Bardyn, T. Melly, O. Seller, and N. Sornin, ”IoT: The era of LPWAN is starting now,” in Proc. IEEE Eur. Solid-State Circuits Conf.,Sep. 2016, pp. 25–30.

[10] X. Xiong, K. Zheng, R. Xu, W. Xiang, and P. Chatzimisios, ”Low power wide area machine-to-machine networks: key techniques and prototype,”IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 9, pp. 64–71, Sep., 2015.

[11] G. Pasolini et al., "Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies", Sensors, vol. 18, no. 4, p. 1118, 2018.

[12] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, ”A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” KICS ICTexpress, pp. 1–7, Jan., 2018

[13] LoRa alliance, ”LoRaWAN what is it”. Technical Marketing Workgroup 1.0, Nov., 2015. available on line: https://loraalliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf

НАРНЫ ФОТОЦАХИЛГААН МОДУЛИУДЫН ҮЙЛДВЭРЛЭЛИЙН ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

Мөнхбаярын СОЛОНГО[1], Гансүхийн МӨНГӨНШАГАЙ[2]

[2]Монгол улс, Улаанбаатар, Сэргээгдэх Эрчим Хүчний Үндэсний Төв

[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Шинэ Сэргээгдэх Эрчим Хүчний салбар

B222100004@must.edu.mn[1]

Хураангуй: **Энэхүү судалгааны ажлын зорилго нь Монгол Улсын Дундговь аймгийн Луус суманд төлөвлөгдөж буй 25 МВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан станцын хувьд өөр өөр фотоцахилгаан (PV) модулиудын цахилгаан үйлдвэрлэлийн ялгааг симуляцын аргаар тодорхойлох явдал юм. Судалгаанд Jinko, Trina, ZTT, JA Solar болон Longi компаниудын нийт 5 төрлийн хоёр талт (bifacial) нарны модулийг сонгон авч System Advisor Model (SAM) программ ашиглан ижил нөхцөлд загварчлал хийв. Станцын суурилуулалтын өнцөг 45°, өмнө зүгт чиглэсэн хөдөлгөөнгүй системээр суурилуулахаар төлөвлөгдсөн. Симуляцын үр дүнд модуль бүрийн жилийн цахилгаан үйлдвэрлэл, системийн ашиглалтын коэффициент болон гүйцэтгэлийн харьцааг харьцуулан үнэлэв. Судалгааны үр дүн нь өндөр үр ашигтай Jinko, Trina, ZTT, JA Solar, Longi ашиглах нь станцын нийт үйлдвэрлэл, эдийн засагт эерэг нөлөө үзүүлдгийг харуулсан.**

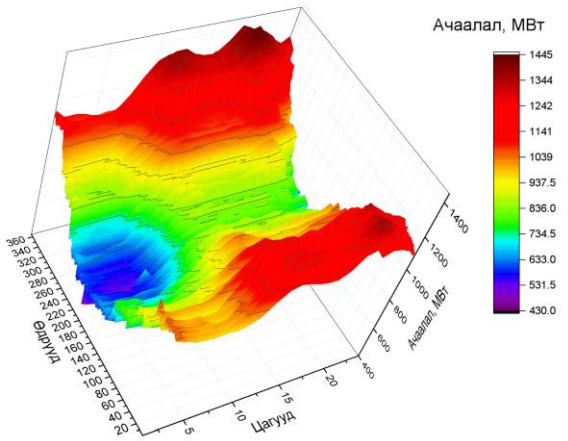
Түлхүүр үгс: Нарны цахилгаан станц, фотоцахилгаан модуль, хоёр талт модуль, System Advisor Model (SAM), гүйцэтгэлийн харьцаа, ашиглалтын коэффициент

I. УДИРТГАЛ

Дэлхийн эрчим хүчний салбарт нүүрстөрөгчийн ялгарлыг бууруулах, эрчим хүчний тогтвортой эх үүсвэрийг нэмэгдүүлэх зорилгоор сэргээгдэх эрчим хүчний хэрэглээ тасралтгүй өссөөр байна. Нарны эрчим хүч нь хүрээлэн буй орчинд ээлтэй, түлш шаардахгүй, ажиллагааны зардал харьцангуй бага зэрэг давуу талуудтай тул дэлхийн олон улс оронд эрчимтэй хөгжиж байна.

Фотоцахилгаан технологийн хөгжил нь нарны модулийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх, үйлдвэрлэлийн зардлыг бууруулах, системийн найдвартай ажиллагааг сайжруулахад чухал хувь нэмэр оруулж байна. Сүүлийн жилүүдэд N-type TOPCon, Back Contact зэрэг дэвшилтэт эсийн технологи бүхий модулиуд зах зээлд өргөн нэвтэрч, улам өндөр үр ашигтай систем байгуулах боломжийг бүрдүүлж байна.

Монгол Улс нь нарны цацрагийн нөөц ихтэй орон бөгөөд жилд дунджаар 270–300 нарлаг өдөртэй байдаг. Ялангуяа говийн бүс нутагт нарны цацрагийн нягтрал өндөр тул том оврын нарны цахилгаан станц байгуулах боломж нээлттэй байна. Ийм нөхцөлд фотоцахилгаан модулийн төрлийг зөв сонгох нь станцын нийт үйлдвэрлэл болон эдийн засгийн үр ашигт чухал нөлөө үзүүлдэг.



1-р зураг. Төвийн бүсийн ЭХС-ийн хоногийн цахилгаан ачааллын график (4 улиралд харгалзсан байдлаар)

Төслийн хэрэгжилтийн хүрээнд нарны цахилгаан станц (PV систем), батарей хуримтлуурын систем (BESS), инженерийн дэд бүтэц, сүлжээний холболт болон туслах байгууламжуудыг хамарсан цогц шийдлүүдийг төлөвлөсөн. Нарны цахилгаан станц нь нийт 25 МВт-ын суурилагдах хүчин чадалтай бөгөөд жилд ойролцоогоор 42–45 ГВт.ц цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэхээр тооцоологдсон ба үүнд фотоволтайк модулиуд, инвертерүүд болон цахилгаан хяналтын системүүд багтана.

II. СУДАЛГААНЫ АРГАЧЛАЛ

Нарны модуль гэдэг нь хэд хэдэн нарны зайг холбож, битүүмжилж хийсэн төхөөрөмжийг хэлнэ. Одоогийн байдлаар дэлхийн нарны цахилгаан үүсгүүрийн зах зээлд талст Цахиур (c-Si) нарны зайгаар хийсэн модулиуд ноёрхож байна. Нийт зах зээлд зарагдсан модулиудын бараг 94.5% нь талст

цахиурын нарны зайнуудаас бүтсэн ба үлдсэн хэсэг нь CdTe 4.2%, аморф Si 0.1%, CIGS 1.2% нимгэн хальсан технологид хуваагддаг.

2.1 Судалгааны байршил

Дундговь аймгийн Луус суманд төлөвлөгдөж буй нарны цахилгаан станцын жишээн дээр өөр өөр үйлдвэрлэгчийн нарны модулиудын цахилгаан үйлдвэрлэлийн ялгааг симуляцын аргаар тодорхойлохыг зорилоо.

ИНЖЕНЕР-ГЕОЛОГИЙН БА УУР АМЬСГАЛЫН ЕРӨНХИЙ ҮЗҮҮЛЭЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Үнэлгээ/Утга
Газарзүйн хэлбэр	Тал, нам толгодтой хээр
Хөрсний бүтэц	Элсэнцэр, нягтарсан тунамал, бага зэрэг
Хөлдөлтийн гүн	~1.5 м
Гүний ус	Нөлөө багатай, 5 м-ээс гүн
Жилийн тунадас	~248 мм
Салхины дундаж хурд	2.9 м/с (ихдээ 38 м/с хүртэл)

Судалгаанд ашигласан нарны цахилгаан станцын төсөл нь Монгол Улсын Дундговь аймгийн Луус сумын нутаг дэвсгэрт байрлах бөгөөд тухайн бүс нутаг нь нарны цацрагийн өндөр нөөцтэй, хуурай уур амьсгалтай, том оврын нарны станц байгуулахад тохиромжтой нөхцөлтэй юм.



2-р зураг. Судалгааны бүс-Дундговь аймгийн байршлын зураг

ТӨСЛИЙН ТАЛБАЙН МЭДЭЭЛЭЛ

2-Р ХҮСНЭГТ

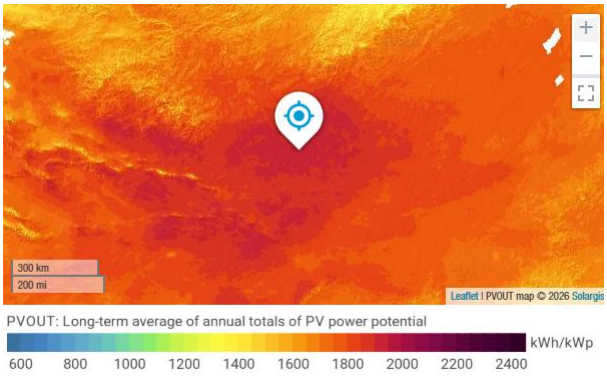
Ангилал	Үзүүлэлт	Утга
Байршлын мэдээлэл	Байршил	Дундговь аймаг, Луус сум
	Координат (UTM)	X: 574095–575302, Y: 5054212–5055426
	Нарны нөөц	Өндөр (жилд 270–300 нарлаг өдөр)
	Дундаж температур	~ -20°C → +30°C
	Нарны тусгал (GHI)	~ 1600–1800 кВт.ц/м²/жил
	Газрын налуу	0°

СУУРИЛУУЛАЛТЫН ПАРАМЕТРҮҮД

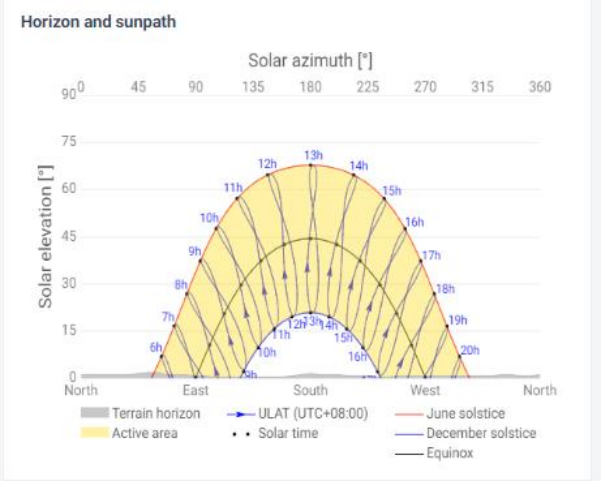
2-р хүснэгт

Үзүүлэлт	Утга
Суурилуулалтын төрөл	Fixed tilt
Налалтын өнцөг (Tilt)	45°
Азимут	180° (өмнө зүг)

Төслийн нийт талбайн хэмжээ 360,000 м² бөгөөд энэ талбайд фотоцахилгаан модулиудыг хөдөлгөөнгүй суурилуулалтын (fixed tilt) системээр байрлуулах байдлаар төлөвлөсөн.



3-р зураг. Жилийн PV эрчим хүчний потенциалын урт хугацааны дундаж



4-р зураг 4. Дундговь аймгийн Луус сум дахь PV системийн азимутын өнцгийн тодорхойлолт (180°, урагшаа чиглэл)

Энэхүү зурагт судалгааны талбайд суурилуулсан PV массивын азимутын чиглэлийг харуулсан бөгөөд 180° буюу урагшаа чиглэлд байрлуулсан. Энэ нь Монгол орны хойд хагасын байршилд хамгийн их нарны цацраг хүлээн авах оновчтой чиглэл юм.Нарны азимут өнцөг нь тухайн агшинд нар тэнгэрт хойд зүгээс цагийн зүүний дагуу хэдэн градусын өнцөгт байрлаж байгааг илэрхийлдэг параметр юм.

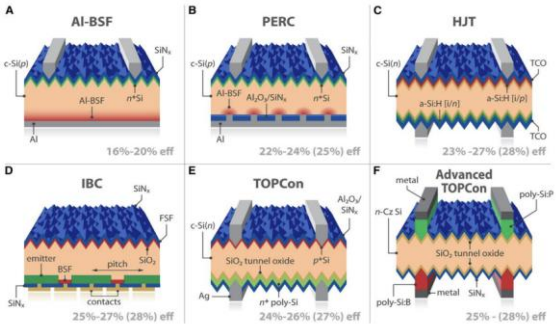
- 0° → Хойд зүг (North)
- 90° → Зүүн зүг (East)
- 180° → Өмнө зүг (South)

- 270° → Баруун зүг (West)

2.2 Системийн үндсэн параметрүүд

Нарны цахилгаан үүсгүүр (НЦҮ)-ийн технологийн ангиллуудыг мэдэхийн тулд хамгийн түрүүнд хийсэн материалуудыг нь мэдэх шаардлагатай болдог.

Фотоцахилгаан технологийн хөгжлийг авч үзвэл цахиурт суурилсан нарны зайнууд зонхилж байгаа бөгөөд тэдгээрийн үндсэн төрлүүдийг Зураг 5-д үзүүлэв. Эдгээр технологиуд нь бүтцийн хувьд ялгаатай боловч бүгд нарны энергийг цахилгаан энерги болгон хувиргах ижил зарчимд тулгуурладаг.



5-р зураг. Цахиуран нарны зайн технологиуд

Нарны зай буюу НЦҮ дэх хамгийн бага нэгжийн гэрэл шингээгч материал нь боломжит ашигт үйлийн коэффициентын хамгийн өндөр утгад хүрэхийн тулд тодорхой шаардлагуудыг хангасан байх ёстой.

Цахиурын нарны хавтан нь цахиур (Si) хагас дамжуулагч материалд суурилсан фотоцахилгаан төхөөрөмж бөгөөд нарны цацрагийн энергийг цахилгаан энерги болгон хувиргадаг.

Энэхүү процесс нь Photovoltaic effect дээр үндэслэдэг.Цахиурын нарны хавтан дараах зарчмаар ажиллана:

1. Нарны цацраг хавтангийн гадаргууд тусна
2. Цахиур материал дотор электронууд өдөөгдөнө
3. Электронуудын хөдөлгөөнөөр тогтмол гүйдэл (DC) үүснэ
4. Үүссэн гүйдлийг инвертерээр хувьсах гүйдэл (AC) болгон хувиргана

Цахиур нь:

- Хагас дамжуулагч шинж чанартай
- Электрон хөдөлгөөнд тохиромжтой
- Байгальд элбэг
- Урт хугацаанд тогтвортой

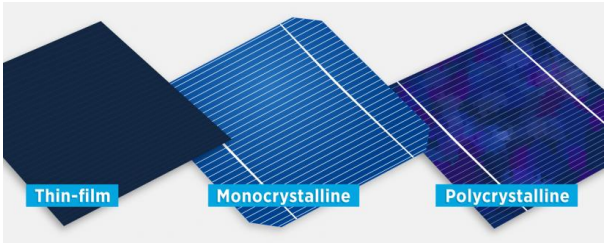
Иймээс дэлхийн PV системийн ихэнх нь цахиур суурьтай байдаг.

Цахиурын хавтангийн төрлүүд

1. Monocrystalline (нэг талст)
   a. Өндөр үр ашигтай
   b. Орчин үеийн станцуудад өргөн хэрэглэгддэг
2. Polycrystalline (олон талст)
   a. Үр ашиг харьцангуй бага
3. Орчин үеийн технологиуд:
   a. TOPCon (N-type)
   b. Back Contact

Эдгээр нь бүгд цахиурт суурилсан дэвшилтэт хувилбарууд юм.

Цахиурын хавтангийн төрлүүдийг бүтцийн онцлогоор нь ангилбал монокристалл, поликристалл болон нимгэн хальсан технологи гэж хуваж болох бөгөөд үүнийг Зураг 6-д харуулсан. Эдгээрээс монокристалл хавтан нь хамгийн өндөр үр ашигтайд тооцогддог.



6-р зураг. Цахиурын хавтангийн төрлүүд

Энэ нь дотоод цэгэн дефектээс үүссэн байгалийн р хэлбэрийн дамжуулалттай байдаг. Энергийн завсар, шингээлтийн коэффициент нь нэг уулзвартай нарны зайн хамгийн тохиромжтой шинж чанар юм. Энэ нь үндсэн шинж чанарын хувьд хамгийн ирээдүйтэй органик бус нарны зайн материал юм.

Нарны цахилгаан үүсгүүр буюу хавтангийн төрлүүд Нэгдүгээр үеийн фотоволтайк үүр – Талст цахиур (Crystalline Silicon – c-Si)

Энэхүү үеийн технологи нь цахиурын талст суурьтай, өндөр үр ашигтай, бат бөх, удаан ашиглалттай тул дэлхий даяар хамгийн өргөн хэрэглэгддэг.

• Нэг талст цахиур (Monocrystalline Silicon – Mono-Si):

Нэгэн төрлийн, тасралтгүй бүтцийн талстуудыг ашиглан үйлдвэрлэдэг. Үр ашиг өндөр (18–22%) бөгөөд удаан эдэлгээтэй ч үйлдвэрлэлийн зардал өндөртэй.

• Олон талст цахиур (Polycrystalline Silicon – Poly-Si):

Олон жижиг талстууд бүхий бүтэцтэй тул үйлдвэрлэхэд хялбар, хямд боловч үр ашиг арай бага (~15–17%). Ихэвчлэн томоохон нарны станцуудад ашигладаг.

Төлөв: Бүрэн арилжааны хэрэглээнд нэвтэрсэн, хамгийн өргөн хэрэглэгддэг. Хоёрдугаар үеийн фотоволтайк үүр

– Нимгэн хальсан технологи (Thin-Film) Фотоволтайк материалыг нимгэн давхаргаар шил, хуванцар дээр түрхэн хийдэг технологи. Жин багатай, уян хатан боловч үр ашиг нь харьцангуй бага.

• Кадмийн теллурид (CdTe):

Хямд өртөгтэй, бага гэрэл болон өндөр температурт сайн ажилладаг. Харин хортой элементийн агууламжтай учраас аюулгүй ажиллагаа шаардана.

• Зэс-Индий-Галлий-Селениум (CIGS):

Нимгэн хальсан төрлүүд дундаа хамгийн үр ашигтай, гаднах төрхөөр жигд, харанхуй харагддаг.

• Аморф цахиур (a-Si):

Маш хямд өртөгтэй, уян хатан ч үр ашиг бага (~6–9%). Жин багатай, зөөврийн хэрэглээнд тохиромжтой.

Төлөв: Арилжааны түвшинд ашиглагдаж байгаа, барилга интеграцид (BIPV) мөн тохиромжтой.

Гуравдугаар үеийн фотоволтайк үүр – Шинээр гарч ирж буй технологиуд Эдгээр нь илүү үр ашигтай, бага зардлаар үйлдвэрлэх зорилготой, шинэ материал болон аргыг ашигладаг.

• Перевскит нарны эс (Perovskite): Хурдан хөгжиж буй, өндөр үр ашиг (≥25%) үзүүлэх ч урт хугацааны бат бөх байдал нь асуудал хэвээр байна.

• Органик фотоволтайк (OPV): Органик полимерт суурилсан, уян хатан, хөнгөн бөгөөд байгаль орчинд бага нөлөөтэй.

• Квант цэг ба будгаар мэдрэмтгийжүүлсэн (Quantum Dot, DSSC): Өөр өөр спектрт хариу өгөх чадвартай, тунгалаг эсвэл өнгөт модуль бүтээхэд тохиромжтой.

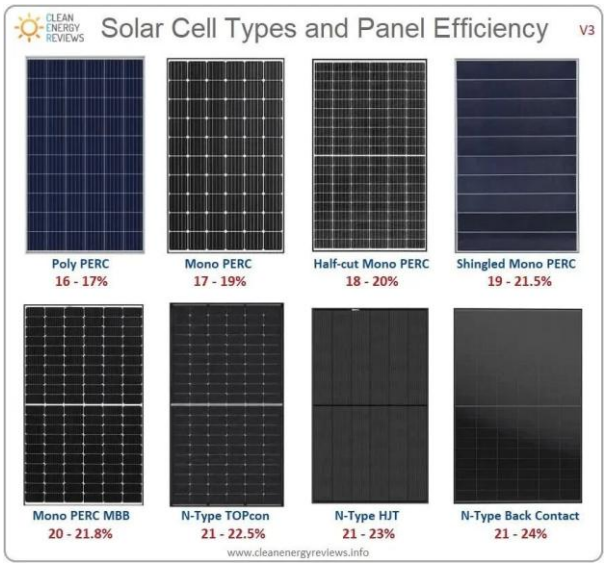
Төлөв: Судалгааны болон туршилтын шатандаа явж байгаа.

Дөрөвдүгээр үеийн фотоволтайк үүр – Гибрид ба нанотехнологи

Энэ үеийн технологи нь органик материалуудыг наноматериалтай (жишээ нь графен, нүүрстөрөгчийн нано хоолой) хослуулан өндөр үр ашиг, уян хатан байдал, тунгалаг бүтэцтэй болгодог.

• Хэрэглээ: Уян хатан, тунгалаг хавтангуудыг барилга, зөөврийн төхөөрөмж, ухаалаг гадаргуу гэх мэт орчин үеийн дэд бүтцэд ашиглах зорилготой. • Шинэлэг давуу тал: Ашиглалтын зардал багатай, олон төрлийн хэрэглээнд хялбар тохируулгатай. Төлөв: Судалгааны шатанд, арилжааны хэрэглээнд хараахан нэвтрээгүй.

Монокристалл буюу нэг талст нарны хавтангийн бүтэц, гадаад хэлбэрийг Зураг 7-д үзүүлсэн бөгөөд энэ төрлийн хавтан нь жигд бүтэцтэй, өндөр үр ашигтайгаараа онцлог юм.



7-р зураг 7. Монокристалл буюу нэг талст нарны хавтан

2.3 Судалгаанд ашигласан фотоцахилгаан модулиуд

Судалгаанд дараах таван төрлийн өндөр үр ашигтай нарны модулийг сонгон авч харьцуулсан.

Нарны модулийн брендүүд	**Jinko (Нөхцөлт сонголт)**	**Trina (Нөхцөлт сонголт)**	**ZTT (Нөхцөлт сонголт)**	**JA Solar (Үндсэн сонголт)**	**Longi (Өндөр үр ашигтай)**
Марк дугаар	66HL5-BDV	TSM-NEG21C.20	ZTT78NHBD	JAM66D46 LB	LR7-72HVHF
Төрөл	N Type TOPCON	N Type TOPCON	N Type TOPCON	N Type TOPCON	Back contact
Нарны зайн тоо	132 (66x2)	132	156 (78x2)	132 (6x22)	144(6x24)
Хамгийн их АҮК, %	23.18	23.3	23.1	23.2	24.8
Хамгийн Их Чадал, Ватт	720	725	645	720	665
Нээлттэй хэлхээний хүчдэл V_{OC}, В	49.04	49.6		49.00	54.52
Богино холболтын гүйдэл I_{SC}, А	18.67	18.54		18.59	15.35
Талбай, м.кв	3.106	3.106	2.795	3.106	2.701
Урт, м	2.384	2.384	2.465	2.384	2.382

Өргөн, м	1.303	1.303	1.134	1.303	1.134
Хоёр талтай эсэх	Тийм	Тийм	Тийм	Тийм	Тийм
Ар талын нэвтрүүлэлт, %	80	80	80	80	70
Температурын коэффициент Pmax, %/C	-0.29	-0.29	-0.29	-0.29	-0.26
Температурын коэффициент V_{OC}, %/C	-0.25	-0.24	-0.25	-0.25	-0.2
Температурын коэффициент I_{SC}, %/C	0.045	0.04	0.045	0.045	0.05
Ажиллагааны температур дээд, C	70	70	70	85	85
Ажиллагааны температур доод, C	-40	-40	-40	-40	-40
Хамгийн их системийн хүчдэл, В	1500	1500	1500	1500	1500
Хамгийн их цуваа гал хамгаалагчийн үзүүлэлт, А	35	35	30	30	30
Цуглуулагч хайрцгийн хамгаалалт	IP68	IP68	IP68	IP68	IP68
Цуглуулагч хайрцгийн диод	3 Диод	3 Диод	3 Диод	3 Диод	3 Диод
Кабел, мм2	4	4	4	4	4
АУК жилийн бууралт, %	0.4	0.4		0.4	0.35
Чадлын баталгаа, жил	30	30	30	30	30
Бүтээгдэхүүний баталгаа, жил	12	12	12	12	15
Урд талын механик ачаалал, Па	5400	5400	5400	5400	5400
Ар талын механик ачаалал, Па	2400	2400	2400	2400	2400
Жин, кг	37.5	38.3	32.4	38.2	28.5

III. СИМУЛЯЦИЙН ҮР ДҮН БА ШИНЖИЛГЭЭ

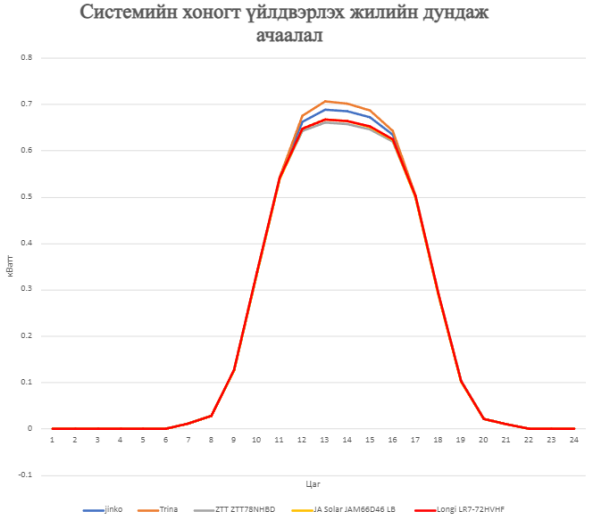
Энэхүү судалгаанд Дундговь аймгийн Луус сумын байршилд 25 МВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан станцын нөхцөлд таван төрлийн хоёр талт фотоцахилгаан модулиудын гүйцэтгэлийг System Advisor Model (SAM) программ ашиглан харьцуулан үнэлэв. Судалгааг ижил орчны болон системийн параметрүүдийн хүрээнд гүйцэтгэсэн.

[redacted] *Жилийн цахилгаан үйлдвэрлэлийн харьцуулалт*

Симуляцын үр дүнгээс харахад судалгаанд хамрагдсан бүх модулиудын жилийн цахилгаан үйлдвэрлэл ойролцоо түвшинд байсан боловч технологийн ялгаанаас шалтгаалан тодорхой зөрүү ажиглагдсан.

- Jinko болон Trina модулиуд хамгийн өндөр үйлдвэрлэл үзүүлсэн
- ZTT болон JA Solar модулиуд дундаж түвшний гүйцэтгэлтэй байсан
- Longi модуль харьцангуй бага үйлдвэрлэл үзүүлсэн

Энэхүү ялгаа нь модулийн үр ашиг, температурын коэффициент болон bifacial гүйцэтгэлээс хамаарч байна.



8-р зураг. PV модулийн үйлдвэрлэлийн харьцуулалт

[redacted] *Цагийн үйлдвэрлэлийн өөрчлөлт*

Цагийн (hourly) үйлдвэрлэлийн графикаас харахад:

Өдрийн оргил үйлдвэрлэл 11:00–15:00 цагийн хооронд тохиолдсон

Зуны улиралд үйлдвэрлэл хамгийн өндөр

Өвлийн улиралд нарны өнцөг бага, өдөр богино тул үйлдвэрлэл буурсан

Jinko болон Trina модулиуд нь бага цацраг (low irradiance)-ийн нөхцөлд ч харьцангуй тогтвортой үйлдвэрлэл үзүүлсэн нь давуу тал болсон.

Performance Ratio (PR)-ийн шинжилгээ

PR утгуудыг харьцуулахад:

N-type TOPCon технологитой модулиуд (Jinko, Trina) илүү өндөр PR үзүүлсэн

ZTT болон JA Solar нь дунджаар ойролцоо үзүүлэлттэй

Longi модуль бага зэрэг доогуур PR үзүүлсэн

Энэ нь системийн алдагдалд температурын нөлөө чухал үүрэгтэйг харуулж байна.

Capacity Factor-ийн харьцуулалт

Системийн ашиглалтын коэффициент (Capacity Factor):

Jinko, Trina- хамгийн өндөр

ZTT, JA Solar - дундаж

Longi -хамгийн бага

Энэ нь жилийн туршид бодит үйлдвэрлэл нэрлэсэн чадлаас хэр үр ашигтай байгааг илэрхийлнэ.

Температурын нөлөөллийн шинжилгээ

Дундговь аймгийн нөхцөлд зуны улиралд температур өндөр (+30°C дээш) хүрдэг тул:

Температурын коэффициент бага (−0.29%/°C орчим) модулиуд илүү давуу

TOPCon технологи нь дулааны алдагдал багатай

Longi модуль харьцангуй өндөр температурын алдагдалтай байж болох нь үйлдвэрлэл буурахад нөлөөлсөн.

IV. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлын хүрээнд Дундговь аймгийн Луус сумын байршилд төлөвлөгдөж буй 25 МВт хүчин чадалтай нарны цахилгаан станцын нөхцөлд таван төрлийн хоёр талт фотоцахилгаан модулиудын гүйцэтгэлийг System Advisor Model (SAM) программ ашиглан харьцуулан үнэлэв. Судалгааг ижил орчны болон системийн параметрүүдийн хүрээнд гүйцэтгэсэн нь модулиудын технологийн ялгаанаас үүдэлтэй нөлөөллийг бодитой тодорхойлох боломжийг бүрдүүлсэн.

Симуляцийн үр дүнгээс харахад бүх модулиудын цахилгаан үйлдвэрлэл нь нарны цацрагийн улирлын болон хоногийн хэлбэлзэлтэй нягт уялдаатай байсан бөгөөд 45° налуу, өмнө зүг рүү чиглэсэн суурилуулалтын шийдэл нь тухайн бүс нутгийн нөхцөлд оновчтой болох нь батлагдсан. Модулиудын гүйцэтгэлийн харьцуулалтаас Jinko болон Trina үйлдвэрлэгчийн N-type TOPCon технологид суурилсан модулиуд нь өндөр, тогтвортой үйлдвэрлэл үзүүлсэн бол ZTT болон JA Solar модулиуд ойролцоо түвшний үр дүнтэй гарсан. Харин Longi Back Contact модуль нь судалгааны нөхцөлд харьцангуй бага үйлдвэрлэл үзүүлсэн нь температурын коэффициент болон системийн бусад параметрүүдтэй холбоотой байж болохыг харуулж байна.

Жилийн нийт үйлдвэрлэл, гүйцэтгэлийн харьцаа (PR), ашиглалтын коэффициент (Capacity factor)-ийг нэгтгэн дүгнэхэд N-type TOPCon технологи нь тухайн төслийн нөхцөлд илүү давуу гүйцэтгэлтэй болох нь тогтоогдлоо. Мөн хоёр талт (bifacial) технологийн хэрэглээ нь газрын ойлтын нөлөөг ашиглан нэмэлт үйлдвэрлэл бий болгох боломжтой бөгөөд энэ нь нийт системийн үр ашгийг нэмэгдүүлэх чухал хүчин зүйл болж байна.

Иймд нарны цахилгаан станцын модуль сонголтыг хийхдээ зөвхөн нэрлэсэн чадал болон үр ашигт тулгуурлах бус тухайн байршлын уур амьсгал, нарны нөөц, температурын нөхцөл, суурилуулалтын хэлбэр, системийн алдагдлуудыг цогцоор нь авч үзэх шаардлагатай. Энэхүү судалгааны үр дүн нь Монгол орны говийн бүсэд орчин үеийн өндөр үр ашигтай фотоцахилгаан технологийг ашиглах нь цахилгаан эрчим хүчний үйлдвэрлэлийг нэмэгдүүлэх, импортын хамаарлыг бууруулахад чухал ач холбогдолтой болохыг харуулж байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] С. Батмөнх, Ба. Бат-Эрдэнэ ба Н.И. Воропай,“Монголын эрчим хүчний салбарын хөгжил: I. Тойм, бодлого, шинжилгээ, загварчлалын асуудал,” Эрчим хүч&Engineering. Улаанбаатар, № 197, 2020 оны 7-р сар.

[2] Li, H., Wang, Y., & Peng, J. (2018). Performance comparison of bifacial and monofacial PV modules under different conditions. *Applied Energy*, 220, 320–328.

[3] Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. Y. (2022). Solar cell efficiency tables (Version 60). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(7), 687–701.

[4] Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., Georghiou, G. E., Schubert, M., & Werner, J. H. (2009). Temperature behaviour of different photovoltaic systems installed in Cyprus. *Renewable Energy*, 34(2), 574–579.

[5] Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic degradation rates—An analytical review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12–29.

[6] King, D. L., Boyson, W. E., & Kratochvil, J. A. (2004). Photovoltaic array performance model. *Sandia National Laboratories Report*, SAND2004-3535.

[7] JinkoSolar. (2023). *Tiger Neo N-type bifacial module datasheet.*

[8] Trina Solar. (2023). *Vertex N series datasheet.*

[9] ZTT. (2023). *Bifacial PV module datasheet.*

[10] JA Solar. (2023).

[11] *DeepBlue series bifacial module datasheet.*

ОРЧИН ҮЕИЙН МАММОГРАФ АППАРАТНЫ ТЕХНИК ҮЗҮҮЛЭЛТИЙН ХАРЬЦУУЛАЛТ

Сүвдэйн ХҮСЛЭН[1], Даваажавын ПҮРЭВДАШ[2]
[1]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Цахилгаан техникийн тэнхим,
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: huslensuvedei@gmail.com[1], dashaa@must.edu.mn[2]

Хураангуй: **Энэхүү судалгаанд Монгол Улсын эмнэлгүүдэд ашиглагдаж буй маммографийн аппаратуудын техник үзүүлэлт, технологийн түвшнийг харьцуулан үнэлэв. Судалгаанд нийт 11 төрлийн аппаратыг хамруулж, зургийн чанар (50 оноо), техникийн гүйцэтгэл (30 оноо), технологийн түвшин (20 оноо) гэсэн 100 онооны нэгдсэн үнэлгээний системээр дүгнэхэд тоон болон 3 хэмжээст томосинтез технологитой аппаратууд өндөр үзүүлэлттэй байгаагаас AMULET Innovality хамгийн их буюу 99 оноо авсан. Тоон системүүд нь илүү өндөр нарийвчлал, бага пикселийн хэмжээ, илүү сайн детекторын технологитой тул эрт үеийн эмгэг өөрчлөлтийг илрүүлэх чадвар өндөр байна. Монгол Улсад маммографийн технологийн нэвтрэлт дунд түвшинд байгаа боловч технологийн жигд байдал хангалтгүй, дэвшилтэт системүүдийн (3 хэмжээст томосинтез, хиймэл оюун ухаан) хэрэглээ харьцангуй бага байна. Иймд аналог төхөөрөмжийг шинэчлэх, дэвшилтэт технологийг нэвтрүүлэх, скринингийн хүртээмжийг нэмэгдүүлэх шаардлагатай байна.**

Түлхүүр үг: Цацрагийн тун, технологийн түвшин, 3 хэмжээст томосинтез, хиймэл оюун ухаан

I. ОРШИЛ

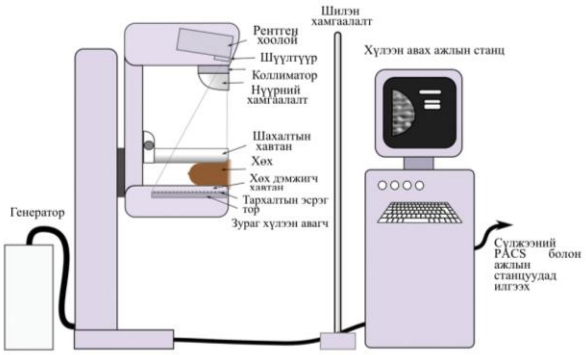
Хөхний хорт хавдар дэлхий даяар эмэгтэйчүүдийн дунд хамгийн түгээмэл тохиолддог хавдрын төрөл бөгөөд нас баралтын гол шалтгаануудын нэг хэвээр байна. Дэлхийн эрүүл мэндийн байгууллагын тайланд дурдсанаар (2023), хөхний хавдрыг эхний шатанд нь оношилж чадвал эмчилгээний үр дүн 90%-иас дээш байдаг байна [1]. Энэ учраас эмнэл зүйн оношилгоонд ашиглагддаг дүрслэлийн арга, тухайлбал маммографийн аппаратын технологийн хөгжил нь анагаах ухаан, олон нийтийн эрүүл мэндийн гол зорилтуудын нэг юм. Маммографийн аппарат нь хөхний эд дэх нягтралын ялгааг ашиглан кальцижилт, зангилаа зэрэг эмгэгийг рентген туяагаар илрүүлэх арга бөгөөд дэлхий даяар хөхний хавдрыг эрт илрүүлэх стандарт арга гэж үздэг [2]. Монгол Улсын хувьд хөхний хавдрын өвчлөл сүүлийн жилүүдэд нэмэгдэж байгаа бөгөөд нийт тохиолдлын ойролцоогоор 90% нь хожуу шатанд (III–IV) оношлогддог нь оношилгооны системийн сул талыг илтгэнэ. Иймд маммографийн аппаратын техник үзүүлэлт, технологийн түвшнийг судлах нь чухал ач холбогдолтой.

Сүүлийн арван жилд анагаах ухааны мэргэжилтнүүд бүрэн талбайн тоон маммограф, хөхний тоон томосинтез зэрэг дэвшилтэт системүүд нэвтэрснээр дүрсний болон оношилгооны чанар, мөн цацрагийн аюулгүй байдал сайжирсан [4], [5].

Энэхүү судалгааны зорилго нь Монгол Улсын эмнэлгүүдэд ашиглагдаж буй маммографийн аппаратуудын техник үзүүлэлтийг харьцуулах юм.

II. МАММОГРАФ АППАРАТНЫ АЖИЛЛАХ ЗАРЧИМ

Маммограф аппарат нь бага энергийн (20-49 кВп) рентген туяаг ашиглан эмэгтэй хүний хөхний эд дэх нягтралын ялгаа болон бусад эмгэг өөрчлөлтийг дүрслэн илрүүлдэг [3]. Энэхүү арга нь хүний биеийн бусад хэсгийн рентген зурагтай харьцуулахад бага энерги ашигладгаараа онцлог юм.



1-р зураг. Маммограф аппаратны үндсэн бүтэц

1-р зурагт үзүүлснээр маммографийн аппарат нь анод, катод бүхий рентген хоолой, шүүлтүүр, чиглүүлэгч (коллиматор), хөх шахах хавтан, детектор болон дүрс боловсруулах систем зэрэг үндсэн хэсгүүдээс бүрдэнэ.

Рентген хоолойд өндөр хүчдэл өгснөөр катодоос ялгарсан электронууд анодын гадаргуу руу хурдтай хөдөлж мөргөлдөх үед рентген туяа үүсдэг. Маммограф аппаратны системд ихэвчлэн молибден болон родиум анод ашиглагддаг бөгөөд эдгээр нь хөхний зөөлөн эдийг дүрслэхэд тохиромжтой энергийн спектр үүсгэдэг. Үүссэн рентген туяа нь шүүлтүүрээр дамжин илүүдэл энергийг багасгаж, цацрагийн тунг оновчтой болгодог.

Рентген туяа хөхөөр нэвтрэхдээ нягтралаас хамааран ялгаатай шингээлт үүсгэдэг нь дүрс үүсэх үндсэн физик зарчим юм [5]. Өндөр нягтралтай бүтэц (жишээ нь кальцижилт, хавдрын зангилаа) нь илүү их шингээж цайвар, харин бага нягтралтай эд бараан дүрслэгддэг. Шинжилгээ хийх үед хөхийг тусгай хавтангаар зөөлөн шахсанаар:

- Хөхний эд жигд тархана

- Дүрсний тодрол, нарийвчлал сайжирна
- Хөдөлгөөний сарнил багасна
- Цацрагийн тун буурна

Стандарт шинжилгээнд ихэвчлэн дээд-доод болон ташуу хажуу чиглэлийн гэсэн хоёр үндсэн проекц ашиглагддаг [2]. Мөн автомат экспозици хяналтын систем ашиглагдсанаар хөхний зузаан, нягтралаас хамааран хүчдэл, гүйдлийг автоматаар тохируулж, дүрсний чанарыг тогтвортой байлгаж, цацрагийн тунг бууруулдаг [3].

III. СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

Судалгаанд нийт 11 ширхэг маммографийн аппаратыг техник үзүүлэлт болон технологийн түвшнээр нь харьцуулан үнэлэх зорилгоор 100 онооны интеграл үнэлгээний систем боловсруулсан.

1. Зургийн чанарын үнэлгээ (50 оноо)

Маммографийн оношилгооны хамгийн чухал хүчин зүйл тул хамгийн өндөр үнэлгээ (50%) өгсөн.

Үзүүлэлтүүд:

- Пикселийн хэмжээ- 20 оноо (Пиксел жижиг байх тусам дүрсний нарийвчлал сайжирна)
- Нарийвчлал (шугам/миллиметр)- 20 оноо (Их байх тусам бичил өөрчлөлт илрүүлэх чадвар нэмэгдэнэ)
- Детекторын төрөл- 10 оноо
  → a-Se = 10 оноо
  → a-Si (CsI) = 8 оноо
  → CCD = 6 оноо
  → Аналог = 7 оноо

МАММОГРАФ АППАРАТУУДЫН ЗУРГИЙН ЧАНАРЫН ҮНЭЛГЭЭ

1-Р ХҮСНЭГТ

№	Аппаратны нэр	Зургийн чанар (50)
1	Senographe DS	30
2	ELMA-T3 (Analog)	28
3	MAMMOMAT Revelation	42
4	MAMMOMAT Fusion	38
5	MAMMOMAT B.brilliant	42
6	MAMMOMAT Inspiration	48
7	AIDIA (DRTECH)	45
8	AMULET Innovality	50
9	Senographe Crystal Nova	32

Хүснэгт 1-д судалгаанд хамрагдсан маммограф аппаратуудын зургийн чанарыг онооны системээс боловсруулж харуулсан. Эдгээр үзүүлэлтүүд нь хөхний хавдрын эрт үеийн микрокальцификат илрүүлэхэд шууд нөлөөлдөг. Хамгийн өндөр үзүүлэлттэй аппарат нь AMULET Innovality байна.

2. Техникийн гүйцэтгэлийн үнэлгээ (30 оноо)

Энэ нь аппаратын ажиллагааны чанарыг тодорхойлох үзүүлэлтүүд.

Үзүүлэлтүүд:

- кВп хүрээ- 10 оноо (Өргөн хүрээтэй байх нь янз бүрийн эдэд тохирох боломж олгоно)
- Шахалтын систем- 10 оноо (Автомат систем нь тогтвортой, стандарт даралт өгнө)
- Детекторын хэмжээ - 10 оноо (Том детектор нь илүү өргөн талбайг хамарна)

МАММОГРАФ АППАРАТУУДЫН ТЕХНИКИЙН ГҮЙЦЭТГЭЛ

2-Р ХҮСНЭГТ

№	Аппаратны нэр	Техникийн гүйцэтгэл (30)
1	Senographe DS	25
2	ELMA-T3 (Analog)	20
3	MAMMOMAT Revelation	27
4	MAMMOMAT Fusion	26
5	MAMMOMAT B.brilliant	28
6	MAMMOMAT Inspiration	27
7	AIDIA (DRTECH)	27
8	AMULET Innovality	29
9	Senographe Crystal Nova	26

Хүснэгт 2-т судалгаанд хамрагдсан маммограф аппаратуудын техникийн гүйцэтгэлийг үнэлж харуулсан. Эдгээр нь зураг авах нөхцөл, давтагдах чанар, оношилгооны найдвартай байдлыг нэмэгдүүлдэг. Тэргүүлсэн аппарат AMULET Innovality байна. Бусад өндөр үзүүлэлттэй аппаратууд нь Mammomat B.Brilliant, Mammomat Inspiration, Mammomat Revelation, AIDIA зэрэг багтана.

3. Технологийн түвшний үнэлгээ (20 оноо)

Орчин үеийн дэвшилт технологийн нэвтрэлтийг үнэлсэн.

Үзүүлэлтүүд:

- 3D Томосинтез – 8 оноо
- Тун бууруулах систем – 4 оноо
- Автомат экспозици – 4 оноо
- PACS/RIS – 2 оноо
- AI / CAD – 2 оноо

МАММОГРАФ АППАРАТУУДЫН ТЕХНОЛОГИЙН ТҮВШИН

3-Р ХҮСНЭГТ

№	Аппаратны нэр	Техникийн түвшин (20)
1	Senographe DS	12
2	ELMA-T3 (Analog)	4
3	MAMMOMAT Revelation	20
4	MAMMOMAT Fusion	16
5	MAMMOMAT B.brilliant	20
6	MAMMOMAT Inspiration	20
7	AIDIA (DRTECH)	14
8	AMULET Innovality	20

9	Senographe Crystal Nova	12

Хүснэгт 3-т судалгаанд хамрагдсан маммограф аппаратуудын техникийн түвшнийг үнэлж харуулсан. Эдгээр технологи нь оношилгооны нарийвчлал, эмчийн ажлын үр ашиг, өвчтөний аюулгүй байдлыг сайжруулдаг. Өндөр үзүүлэлттэй аппаратууд AMULET Innovality, Mammomat B.Brilliant, Mammomat Inspiration, Mammomat Revelation байна.

IV. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

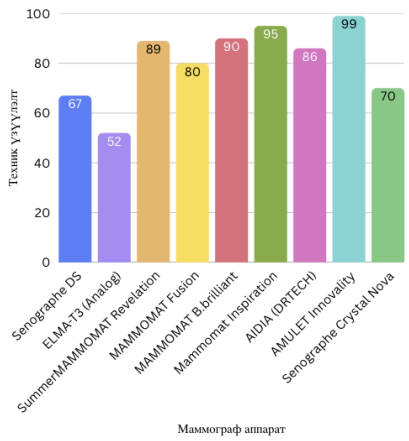
Судалгаанд хамрагдсан аппаратуудын дундаж оноо 72–78/100, хамгийн өндөр нь 85–92 (3 хэмжээст тоон систем), хамгийн бага нь 55–65 (аналог систем) байв.

МАММОГРАФ АППАРАТУУДЫН
ТЕХНИК ҮЗҮҮЛЭЛТИЙН НЭГДСЭН ДҮГНЭЛТ

4-Р ХҮСНЭГТ

№	Аппаратны нэр	Нийт оноо (100)
1	Senographe DS	67
2	ELMA-T3 (Analog)	52
3	MAMMOMAT Revelation	89
4	MAMMOMAT Fusion	80
5	MAMMOMAT B.brilliant	90
6	MAMMOMAT Inspiration	95
7	AIDIA (DRTECH)	86
8	AMULET Innovality	99
9	Senographe Crystal Nova	70

Хүснэгт 4-т судалгаанд хамрагдсан маммографийн аппаратуудын гурван үндсэн хэсгээс бүрдсэн үнэлгээний системээр үнэлж нийт оноог боловсруулсан.



Зураг 2. Маммографи аппаратуудын техник үзүүлэлтүүд

Зураг 2-т судалгаанд хамрагдсан маммографийн аппаратуудын зургийн чанар, техникийн гүйцэтгэл, технологийн түвшний нийлбэр 100 онооны системээр үнэлэгдсэн үр дүнг бар графикаар харуулсан.

Тоон болон 3 хэмжээст томосинтез технологитой аппаратууд өндөр үзүүлэлттэй гарсан. Ялангуяа AMULET Innovality 99 оноо авч тэргүүлсэн.

Мөн

MAMMOMAT Inspiration (95)

MAMMOMAT B.brilliant (90)

MAMMOMAT Revelation (89)

зэрэг аппаратууд өндөр үзүүлэлттэй байна.

Аналог систем болох ELMA-T3 (52) хамгийн бага үнэлгээ авсан.

Зургийн чанарын үзүүлэлтэд тоон системүүдийн пикселийн хэмжээ 70–100 мкм бол аналог системүүд ойролцоогоор >150 мкм, a-Se детектор бүхий төхөөрөмжүүд хамгийн өндөр оноо авсан. Үүнээс харахад тоон маммограф нь илүү өндөр нарийвчлалтай бөгөөд эрт үеийн хавдрыг илрүүлэх боломж илүү.

Техникийн гүйцэтгэл нь ихэнх аппаратын кВп хүрээ 20–35 кВп хооронд байсан ба автомат шахалтын системтэй төхөөрөмжүүд 60–70%-ийн гүйцэтгэлтэй. Том детектор (≥ 24×30 см) дундаж түвшинд байна. Техникийн үзүүлэлтүүд ерөнхийдөө хангалттай боловч стандартчилал бүрэн хангагдаагүй.

Технологийн түвшин 3D томосинтез 20–30% нэвтэрсэн. АВтомат экспозици 80%, PACS/RIS 60%, AI/CAD 20%-с бага технологийн дэвшилттэй. AI болон 3D технологийн нэвтрэлт бага байна.

Цацрагийн тун дундажаар 1.2 – 1.8 мГр байгаа нь ДЭМБ зөвлөмжид багтсан ≤2.5 мГр гэсэн аюулгүй түвшинд ихэнх төхөөрөмж ажиллаж байна [1].

V. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

Судалгаанаас харахад Монгол Улсад маммографийн технологийн хөгжлийн түвшин дунд шатанд байна. Тоон системүүд давамгайлж байгаа нь эерэг үзүүлэлт боловч зарим эмнэлэг аналог төхөөрөмж ашиглаж байгаа нь оношилгооны чанарт сөрөг нөлөө үзүүлж байна.

Технологийн хувьд:

3 хэмжээст томосинтез

a-Se детектор

бага тун

ашигладаг төхөөрөмжүүд өндөр үнэлгээтэй байна.

Бага оноо авсан төхөөрөмжүүд нь аналог ба AI болон PACS холболтгүй төхөөрөмжүүд байна.

Цацрагийн тун дунджаар 1.2- 1.8 мГр байгаа нь зөвшөөрөгдөх ≤2.5 мГр хэмжээнд байна.

Монгол Улсад хөхний хавдар нь эмэгтэйчүүдийн хавдрын топ 3-т ордог ба жилд ойролцоогоор 250–300 шинэ тохиолдол бүртгэгддэг. Ихэнх тохиолдол хожуу шатанд оношлогддог. Өндөр чанартай аппарат нь эрт илрүүлэлт нэмэгдүүлнэ. Ингэснээр олон улсын

судалгаагаар нас баралт 20–30% буурах боломжтой [6].

Монгол Улсад тоон маммографи нэвтэрч байгаа ч технологийн жигд байдал хангалтгүй байна. AI, 3D гэх зэрэг дэвшилтэт технологийг илүү нэвтрүүлэх шаардлагатай. Аппаратын чанар сайжрах нь хавдрын эрт илрүүлэлтэд шууд нөлөөлнө.

ДҮГНЭЛТ

Хэдийгээр Монгол Улс тоон маммографийн нэвтрэлт сайжирч байгаа боловч технологийн жигд байдал хангалтгүй, дэвшилтэт системийн хүртээмж бага байна. Хөхний хавдрын 90% нь хожуу үе шатанд оношлогдож байгаа тул 3 хэмжээст технологи, хиймэл оюун ухаан, бага тунтай систем ашиглах шаардлагатай.

Судалгаагаар маммографийн аппаратын техник үзүүлэлт нь оношилгоонд шууд нөлөөлдөг болохыг тогтоолоо. Иймд аналог төхөөрөмжийг шинэчлэх, дэвшилтэт технологи нэвтрүүлэх, скринингийг өргөжүүлэх шаардлагатай байна.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] World Health Organization. (2023). *Breast cancer*. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/breast-cancer

[2] American College of Radiology. (2022). *Mammography quality standards*. https://www.acr.org/Clinical-Resources/Radiology-Safety/Mammography

[3] International Atomic Energy Agency. (2021). *Mammography: Quality control and optimization*. https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/radiology/mammography

[4] European Society of Breast Imaging. (2019). *Breast imaging recommendations*. https://www.eusobi.org

[5] Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., & Boone, J. M. (2012). *The essential physics of medical imaging* (3rd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.

[6] International Agency for Research on Cancer. (2016). *Breast cancer screening*. https://www.iarc.who.int

АВТОМАТ УДИРДЛАГЫН КАСКАД СИСТЕМИЙН ТОХИРУУЛГЫН ПАРАМЕТРИЙН ОНОВЧТОЙ УТГУУДЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

Цэцэгмаагийн УУГАНЧИМЭГ[1], Халзангийн ЦОЛМОН[2]

[1,2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулаан хангамж, автоматжуулалтын тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: uuganchimeg5960@gmail.com[1] kh.tsolmon@must.edu.mn[2]

Хураангуй: Судалгааны ажлын объектоор орчин үеийн уурын генератор НХ35/3.82-450 зуухны дулааны ачааллыг ачаалал-агаар схемээр тохируулах схемийг авч үзэв. Автомат тохируулгын системийн хамгийн өргөн хэрэглэгддэг ПИД тохируулгаар тохируулав. Тохируулгын параметрийг орчин үеийн автомат удирдлагын онолын тохируулгын аргууд болох Зиглер-Никольс ба Ламбда аргуудаар олж үр дүнг харьцуулсан бөгөөд зуухны агаарын зарцуулалтын тохируулгын чанарын үзүүлэлтийг үзүүлэв. Судалгааны үр дүнгээс харахад Зиглер-Никольс арга нь даалгаврын утганд хүрэх хугацаа (~4 мин) богино боловч хэт тохируулга 5–10% байсан бол Ламбда-В арга (λ=2τ) нь хэт тохируулгыг <3%-д байлгаж, объектын параметрийн K±30%, T±20% өөрчлөлтийн бүх 9/9 хувилбарт тогтвортой байгааг нотолсон. Далайцын нөөц >12 dB, давтамжийн нөөц >65° байгаа нь аюулгүй ажиллагааны давуу талыг харуулж байна. Хосолсон арга — дотоод хүрээнд Зиглер-Никольс PI (Kp=5.63, Ti=10c), гадаад хүрээнд Ламбда-В PID (Kp=0.67, Ti=720c, Td=90c), цочир үйлчлэлийн тохируулга (KFF=0.15) — нь −40°C хүртэлх нөхцөлд хамгийн оновчтой болох нь тогтоогдов.

Түлхүүр үг: дамжуулалтын функц, Зиглер-Никольс арга, Ламбда арга, хазайлт, цочир үйлчлэл

I. УДИРТГАЛ

Орчин үеийн уурын генераторын нэг хэлбэр болох барабант зуух нь харьцангуй өндөр түвшинд автоматжуулагдсан агрегат юм. Уурын генераторын автоматжуулалт нь зуухны ашигт үйлийн коэффициентыг нэмэгдүүлэх, түлшний хувийн зарцуулалтыг бууруулах, аюулгүй ажиллагааг хангах гол хүчин зүйлийн нэг юм [1]. Зуухны илүүдэл агаарын оновчтой хэмжээг тохируулах үндсэн арга нь үлээх салхилуурын үлээлгээр галын хотолд өгөгдөх агаарын зарцуулалтыг өөрчлөх бөгөөд үйлдвэрлэлийн бодит нөхцөлд зуухны галын хотолд өгөгдөж буй түлш ба агаарын зарцуулалтыг найдвартай, нарийвчлалтай хэмжих техникийн боломж бүрдсэн тохиолдолд тэдгээрийн хоорондох тохиромжтой харьцааг ерөнхий агаарын өгөлтөөр тохируулах арга нь хялбар бөгөөд оновчтой юм.

Үйлдвэрлэлд ашиглагдаж буй контроллеруудын талаас их нь ПИД контроллер бөгөөд давуу тал нь динамик системийг хамгийн оновчтой удирдах юм [2].

Энэ судалгаанд ПИД тохируулгын хамгийн өргөн хэрэглэгддэг хоёр аргыг — Зиглер-Никольс [6] болон Ламбда аргыг [5] — каскад системийн дотоод болон гадаад хүрээнд тус тус хэрэглэж, тохируулгын чанарын үзүүлэлтийг харьцуулсан. Зиглер-Никольс арга нь хурдан тохируулга, Ламбда арга нь тогтвортой байдлыг тэргүүн зорилго болгодог учраас эдгээр хоёр аргын харьцуулалт нь НХ35/3.82-450 уурын генераторын бодит ажиллагааны нөхцөлд практик ач холбогдолтой юм.

II. СУДАЛГААНЫ ОБЪЕКТ

Аливаа технологийн процесс, тоног төхөөрөмж, агрегат үйлдвэрлэлийн процессыг автомат удирдлагын төхөөрөмжийн тусламжтайгаар удирдаж болно. Түүнийг автомат удирдлагын объект гэнэ [1]. Энэхүү судалгааны объектоор БНХАУ-ын "Чэнгдү Инженеринг" зуухны үйлдвэрт үйлдвэрлэгдсэн НХ35/3.82-450 уурын генераторыг сонгов. Энэ нь тогоотой, нэг циклон, босоо усан хоолойтой, ердийн эргэлттэй нам температурт түлшний шаталтыг явуулдаг эргэх буцлах давхаргатай орчин үеийн уурын генератор бөгөөд каскад автоматжуулалтын тохируулгын судалгаанд хамгийн тохиромжтой объект болно. Зуухны техникийн үзүүлэлтүүдийг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв.

ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТҮҮД

1-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Хэмжих нэгж	Утга
Уур гаргах чадал	тн/цаг	35
Уурын даралт	МПа	3.82
Уурын температур	°C	450
Тэжээлийн усны температур	°C	150

Мөн зуухны дагуу огтлолыг 1-р зурагт үзүүлэв.

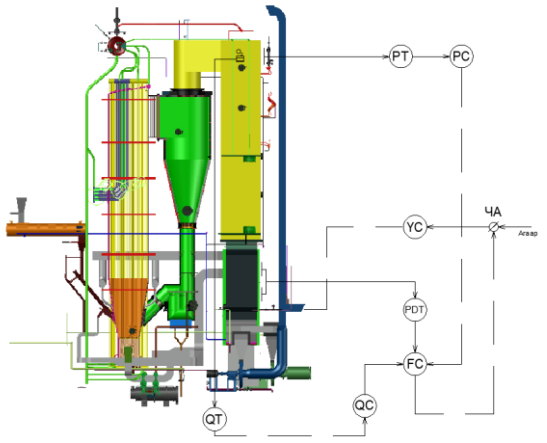


1-р зураг. НХ35/3.82 зуухны дагуу огтлол

III. ТОХИРУУЛГЫН АРГА, СХЕМ

Ачаалал-агаар схемээр агаарын зарцуулалтыг тохируулах

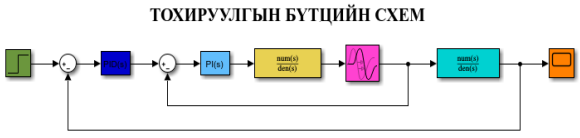
Түлшний шаталтын бүтээгдэхүүн болох утааны хийн найрлага дахь чөлөөт O_2-ийн агууламж нь илүүдэл агаарын хэмжээг тодорхойлж өгдөг гол үзүүлэлт бөгөөд түлшний бүтцээс бага хамаардаг. Иймд ерөнхий агаарын регуляторт O_2-ийн агууламжаар авсан сигналыг оролтын сигнал болгож ашиглах бүрэн боломжтой. Гэвч үйлдвэрлэлийн нөхцөлд найдвартай, түргэн ажиллагаатай хийн шинжлүүр дутагдалтай байдгаас шалтгаалан хүчилтөрөгчийн агууламжаар шууд авсан сигналтай биш харин O_2-ийн засвар оруулах үйлчлэлийн сигналтай схемийг агаарын өгөлтийн автомат тохируулгын системд түгээмэл хэрэглэдэг [2]. Тохируулгын ачаалал-агаар схемийг 2-р зураг үзүүлэв.



2-р зураг. Тохируулгын ачаалал-агаар схем

Тохируулгын бүтцийн схемийг загварчлах

Тохируулгын бүтцийн схемийг Matlab Simulink орчинд загварчилж, системийн ажиллагааг судлах боломжийг бүрдүүлсэн ба загварчлах явцад системийн үндсэн элементүүдийг ашиглан тохируулгын процессыг динамик байдлаар 3-р зурагт үзүүлэв.



3-р зураг. Тохируулгын бүтцийн схем

Зиглер-Никольс арга

Зиглер-Никольсийн арга нь ПИД контроллерын параметрүүдийг тохируулахад түгээмэл хэрэглэгддэг аргачлал юм. Энэ аргыг анх 1942 онд Жон Г.Зиглер болон Натаниал Б.Никольс нар боловсруулсан бөгөөд үйлдвэрийн процессуудад ПИД контроллерыг хурдан, оновчтой тохируулах зорилготой [6]. Энэ арга нь системийн математик загвар тодорхойгүй үед динамик шинж чанар буюу шилжилтийн тодорхойломжоос ПИД контроллерын хөглөлтийн параметр Kp, Ti, Td коэффициентуудыг тодорхойлох боломжтой юм. Параметрүүдийг туршилтаар тохируулах шилжилтийн тодорхойломжийн болон хязгаарын өөрчлөлтөөр гэсэн үндсэн хоёр арга байна.

НЭГЖ ШАТАЛСАН ҮЙЛЧЛЭЛИЙН, ГАРАЛТЫГ ZIEGLER-NICHOLS 1-Р АРГА

2-Р ХҮСНЭГТ.

Тохируулгын төрөл	Kp	Ti	Td
П	T/L	∞	0
ПИ	0.9·T/L	L/0.3	0
ПИД	1.2·T/L	2L	0.5L

2-р арга хязгаарын өөрчлөлийн арга нь битүү системд, системийн тасралтгүй хэлбэлзэх үеийн параметрийг ашиглаж тохируулгын коэффициентуудыг тодорхойлдог бөгөөд ингэхдээ Ti, Td-г 0 болгож Kp-г аажмаар өсгөх ба систем тодорхой утгад хүрэхэд системийн гаралт тогтмол хэлбэлзэж эхэлнэ. Энэ үед Kcr болон Pcr-г тэмдэглэж 3-р хүснэгтэд үзүүлсэн томьёог ашиглан Kp, Ti, Td коэффициентуудыг тодорхойлно [4].

БИТҮҮ СИСТЕМИЙН ГАРАЛТАД ҮНДЭСЛЭН ZIEGLER-NICHOLS 2-Р АРГА

3-Р ХҮСНЭГТ.

Тохируулгын төрөл	Kp	Ti	Td
П	0.5·Kcr	∞	0
ПИ	0.45·Kcr	(1/1.2)·Pcr	0
ПИД	0.6·Kcr	0.5·Pcr	0.125·Pcr

Ламбда арга

Ламбда арга нь ПИД болон ПИ контроллерын тохируулгын процесст өргөн хэрэглэгддэг арга бөгөөд дотоод загварт суурилсан удирдлагын зарчимд үндэслэгддэг юм [5]. Энэ аргын ажиллах зарчим нь битүү системийн динамик шинж чанарыг ламбда (λ) параметрээр тодорхойлох болно. Энэ параметр нь контроллерт процессын хувьсагчийг А цэгээс Б цэг хүртэл шилжүүлэхэд хэр хугацаа зарцуулахыг тодорхойлдог. (λ)-ын утга бага байх нь системийн хариу үйлдэл хурдан илрэх ч хэт тохируулга болон хэлбэлзэл үүсэж болзошгүйг илтгэнэ. Харин (λ)-ын утга их байх нь системийн хариу үйлдэл удаан боловч тогтвортой бөгөөд хэт тохируулга багатай байхыг илтгэнэ.

IV. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

1-р эрэмбийн хожимдолтой апериод хэсэг

Шилжилтийн тодорхойломжийн туршилтаас олсон 1-р эрэмбийн хожимдолтой апериод хэсэг — параметрийг 4-р хүснэгтэд үзүүлэв.

$$W(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

FOPDT ЗАГВАРЫН ПАРАМЕТР

4-Р ХҮСНЭГТ.

Хүрээ	Гадаад: Түлш - T_supply	Дотоод: Хавхлага - F_fuel
K (Өсгөлт)	2.0 °C/%	0.8
τ [сек]	180	3
T [сек]	720	15
W(s)	2.0·e^(-180s)/(720s+1)	0.8·e^(-3s)/(15s+1)

Зиглер-Никольс аргаар тохируулгын параметрийн тооцоолол

Дотоод хүрээнд ПИ тохируулгын хуулиар тохируулах нээлттэй системийн шилжилтийн тодорхойломжийн аргаар тооцов.

$$K_p = \frac{0.9 \cdot T}{K \cdot \tau}, \quad T_i = 3.33 \cdot \tau \quad (2)$$

ПИ тохируулгын оновчтой параметрийн утгыг (2)-д үзүүлснээр тооцов.

$$K_p = 0.9 \cdot T/(K \cdot \tau) = 0.9 \times 15/(0.8 \times 3) = 5.63$$

$$T_i = 3.33 \cdot \tau = 10.0 \text{ сек}$$

Гадаад хүрээнд ПИД тохируулгын хуулиар тохируулах битүү системийн арга хэрэглэв.

Гэдрэг холболтоос $K_u = 3.14$, Tu = 720 сек олж:

$$K_p = 0.6 \cdot K_u, \quad T_i = 0.5 \cdot T_u, \quad T_d = 0.125 \cdot T_u \quad (3)$$

ПИД тохируулгын оновчтой параметрийн утгыг (3)-д үзүүлснээр тооцов.

$$K_p = 0.6 \cdot K_u = 1.88 \approx 2.0$$

$$T_i = 0.5 \cdot T_u = 360 \approx 380 \text{ сек}$$

$$T_d = 0.125 \cdot T_u = 90 \approx 85 \text{ сек}$$

Ламбда аргаар тохируулгын параметрийн тооцоолол

Ламбда арга нь FOPDT загварт суурилж, хаалттай хүрээний хүссэн хугацааны тогтмолыг λ параметрээр зааж өгдөг.

ПИ тохируулга:

$$K_p = \frac{T}{K \cdot (\lambda + \tau)}, \quad T_i = T \quad (4)$$

ПИД тохируулга:

$$T_d = \frac{\tau}{2} \quad (5)$$

λ-г 3 хувилбараар сонгож 5-р хүснэгтэд үзүүлэв.

ЛАМБДАГИЙН АРГЫН PID ТОХИРУУЛГЫН ПАРАМЕТР (3 ХУВИЛБАР)

5-Р ХҮСНЭГТ.

Хүрээ	Хувилбар	λ [c]	Kp	Ti [c]	Td [c]	Kp/Kp_ZN
Дотоод (PI)	A: λ=T	15	1.04	15	—	0.18
	B: λ=2τ	6	2.08	15	—	0.37
	C: λ=3τ	9	1.56	15	—	0.28
Гадаад (PID)	A: λ=T	720	0.40	720	90	0.20
	B: λ=2τ	360	0.67	720	90	0.33
	C: λ=3τ	540	0.50	720	90	0.25

Simulink загварчлал

Каскад PID системийн MATLAB/Simulink загварыг дараах бүтцээр байгуулав:

(1) Дулааны ачааллын муруйн функц — T_supply setpoint ($T_{sp} = 0.021 \cdot T^2 - 1.96 \cdot T + 86.4$);

(2) Гадаад хүрээний PID тохируулга (TIC-301);

(3) Цочир үйлчлэлийн тохируулга (KFF = 0.15);

(4) Дотоод хүрээний PI тохируулагч (FIC-101);

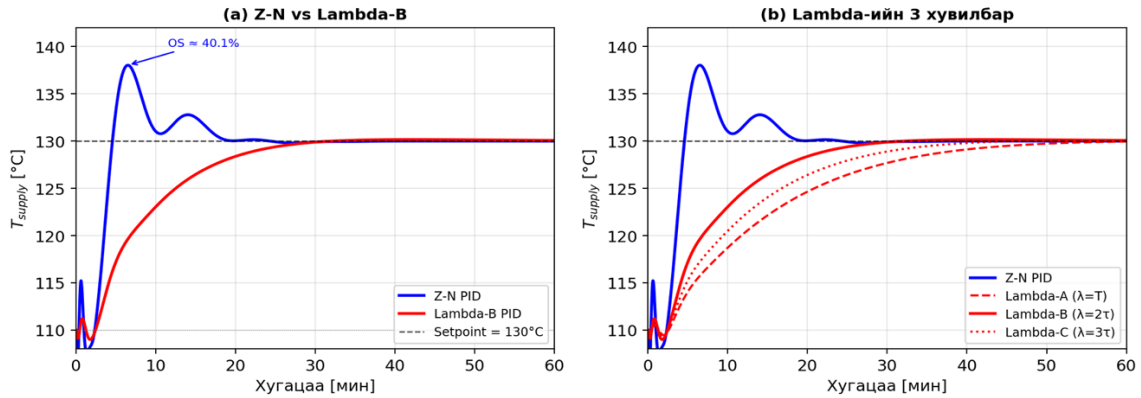
(5–6) FOPDT объектууд.

Дотоод хүрээний өөрчлөлт −10% түлш даралт; гадаад хүрээний T ramp −20→−35°C; робуст туршилт K±30%, T±20% өөрчлөлтийг авч үзэв.

V. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

Даалгаврын утгын шинжилгээ

Даалгаврын утгыг өөрчлөх үеийн тодорхойломжийг 4-р зурагт үзүүлэв. Z-N тохируулга нь даалгаврын утгад хүрэх хугацаа хурдан боловч хэт тохируулга их байв. Ламбда-B (λ = 2τ) тохируулга нь аажмаар хүрч байгаа боловч хэт тохируулга мэдэгдэхүйц бага байв. Ламбда-A (λ = T) хамгийн удаан, Ламбда-C (λ = 3τ) дунд зэрэг хариу үзүүлэв.



4-р зураг. Setpoint step response (110→130°C): (a) Z-N vs Ламбда-В, (b) Ламбда-ийн 3 хувилбар

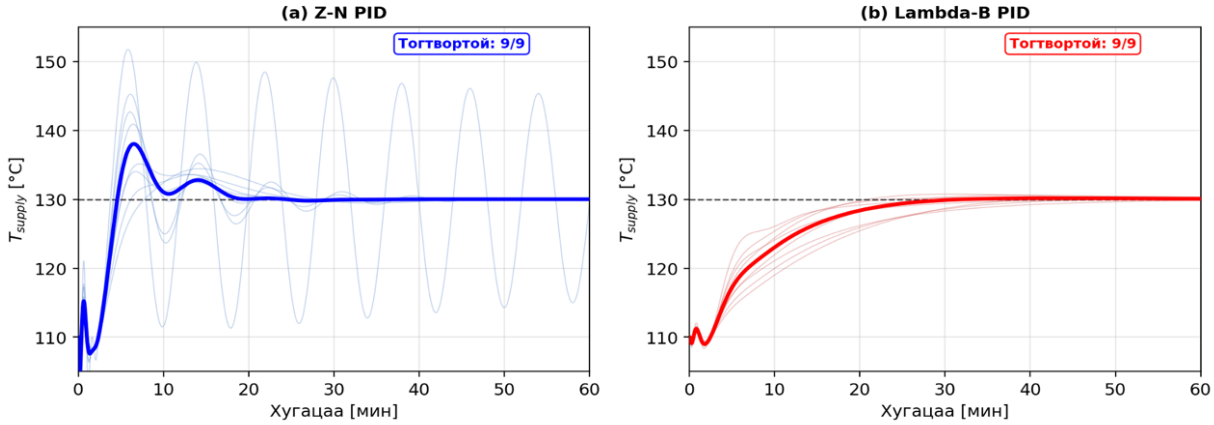
Хазайлт ба цочир үйлчлэлийн шинжилгээ

Түлшний зарцуулалт −10% өөрчлөлтөд Z-N тохируулга хурдан өөрчлөгдсөн бол Ламбда-В удаан боловч монотон (хэлбэлзэлгүй) тогтворжив. Каскад системийн бүтэц нь дотоод хүрээгээр түлш өөрчлөлтийг 10–30 секундэд тохируулах нь нэг хүрээт PID-ээс 3–5 дахин хурдан байна.

Гадна агаарын температурын цочир үйлчлэлийн өөрчлөлтөөр алдааг 30–50% бууруулсан. Цочир үйлчлэлийн тохируулгагүй тохиолдолд Ламбда аргын удаан тодорхойломж нь даалгаврын утга тасралтгүй өөрчлөгдөх нөхцөлд мөрдөх хяналтыг хангахад хүндрэлтэй болно.

Robustness шинжилгээ

Объектын параметрийн K±30%, T±20% өөрчлөлтөд Z-N тохируулга зарим тохиолдолд их хэлбэлзэлтэй байсан; Ламбда-В тохируулга бүх 9/9 хувилбарт тогтвортой байгааг 5-р зурагт үзүүлэв. Энэ нь Ламбда аргын гол давуу тал бөгөөд зуухны ачааллын горим өөрчлөгдөх нөхцөлд тогтвортой ажиллагааг хангах хувьд онцгой ач холбогдолтой.



5-р зураг. Robustness (K±30%, T±20%): (a) Z-N — их хэлбэлзэл, (b) Ламбда-В — бүгд тогтвортой

Харьцуулалт

Z-N БА ЛАМБДА-В АРГУУДЫН ЧАНАРЫН ҮЗҮҮЛЭЛТ

6-Р ХҮСНЭГТ.

Үзүүлэлт	Z-N PID	Ламбда-В PID
Гадаад Kp / Ti / Td	2.0 / 380 с / 85 с	0.67 / 720 с / 90 с
Дотоод Kp / Ti	5.63 / 10.0 с	2.08 / 15.0 с
Хэт тохируулга	5–10%	< 3%
Тогтворжилтын хугацаа	~12 мин	~18 мин
Хамгийн дээд утгад хүрэх хугацаа	~4 мин	~7 мин
Хазайлтаар	Хурдан (~10 мин), бага хэлбэлзэл	Удаан (~18 мин), монотон
Цочир үйлчлэлээр	Хамаарал бага	Хамаарал их
Робуст	7–8/9 тогтвортой	9/9 тогтвортой

Далайцын нөөц / Давтамжийн нөөц	8.5 dB / 52°	>12 dB / >65°

Тохируулгын хавхлагын элэгдэл (TV)	Их	Бага

6-р хүснэгтэд үзүүлснээр Z-N PID тохируулга нь тогтворжилтын хугацаа богино боловч хэт тохируулга 5–10% болж, робуст тохируулга 7–8/9 дүн үзүүлсэн. Харин Ламбда-В PID тохируулга нь хэт тохируулга <3%, бүх 9/9 робуст хувилбарт тогтвортой, далайцын нөөц >12 dB, давтамжийн нөөц >65° байгаа нь аюулгүй ажиллагааны хувьд давуу болохыг харуулж байна. Тохируулгын хавхлагын элэгдэл Ламбда-В аргад мэдэгдэхүйц бага байгаа нь механик хэсгийн үйлчилгээний хугацааг уртасгах ач холбогдолтой.

VI. ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгаагаар дараах үндсэн дүгнэлтэд хүрэв:

1) Z-N аргын үйлчлэл хурдан боловч хэт тохируулга 5–10%-тай, робуст сул байна. Тиймээс Z-N арга нь хурдан хариу шаардагдах богино хугацааны горимын өөрчлөлтөд тохиромжтой.
2) Ламбда арга нь удаан хариу боловч хэт тохируулга <3%, бүх 9/9 Робуст хувилбарт тогтвортой, хавхлагын элэгдэл бага байна. Тиймээс Ламбда-В арга нь аюулгүй ажиллагаа, механик элэгдлийг бууруулах шаардлага бүхий үйлдвэрлэлийн нөхцөлд давуу талтай.
3) Цочир үйлчлэлийн тохируулга нь Ламбда аргад чухал бөгөөд даалгаврын утга өөрчлөгдөхөд алдааг 30–50% бууруулсан. Иймд Ламбда аргыг хэрэглэхдээ KFF = 0.15 цочир үйлчлэлийн коэффициентыг заавал тохируулж өгөх шаардлагатай.
4) Хосолсон арга — дотоод хүрээнд Z-N PI (Kp=5.63, Ti=10c), гадаад хүрээнд Ламбда-В PID (Kp=0.67, Ti=720c, Td=90c), цочир үйлчлэл (KFF=0.15) — нь −40°C хүртэлх нөхцөлд хамгийн оновчтой. Энэ хосолсон аргачлал нь −40°C хүртэлх нөхцөлд ажиллах уурын генераторын автоматжуулалтад практик утгаараа хэрэглэгдэх бүрэн боломжтой бөгөөд цаашид бодит объектод турших судалгааг үргэлжлүүлэх хэрэгтэй.
5) Каскад системийн бүтэц нь нэг хүрээт PID-ийн дотоод хэлбэлзлийг 3–5 дахин хурдан тохируулна. Дотоод хүрээний хугацааны тогтмол нь гадаад хүрээнийхээс 60 дахин хурдан бөгөөд энэ нь каскад бүтцийн технологийн үндсэн давуу тал юм. Улаанбаатарын дулааны системийн зуухнуудын автоматжуулалтад энэ аргачлалыг нэвтрүүлэх нь эрчим хүчний хэмнэлт болон ажиллагааны найдвартай байдлыг дээшлүүлэх практик боломжтой юм.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Ц.Эрдэнэцэцэг, Ц.Жамбалсамбуу, Д.Түвшинбаатар, Д.Даваадорж, Технологийн процессын автоматжуулалт, Улаанбаатар хот: Таймпринтинг, 2006.

[2] K. Ogata, Modern Control Engineering, Upper Saddle River, New Jersey, USA: Pearson Education, 2010.

[3] Ц.Эрдэнэцэцэг, Д.Үлэмж, Автомат удирдлагын онол, Улаанбаатар хот: ШУТИС хэвлэлийн газар, 2023.

[4] Д.Мандал, Уурын генератор, Улаанбаатар хот: Соёмбо принтинг хэвлэлийн үйлдвэр, 2012.

[5] V. VanDoren, "Control Engineering," [Online]. Available: https://www.controleng.com/fundamentals-of-Lambda-tuning/. [Accessed 16 April 2013].

[6] Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. Trans. ASME, 64, pp. 759–768, 1942.

ДАРАЛТ ТЕМПЕРАТУРЫН ШУГАМАН ХАМААРЛЫН ОНОЛ БА ТУРШИЛТЫН ЗӨРҮҮГ СУДЛАХ НЬ

Отгонцэцэгийн БИЛГҮҮН[1], Авирмэдийн ТҮМЭНБАЯР[2]
[1,2]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний инженерчлэлийн сургууль, Дулааны цахилгаан станцын тэнхим
Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: batbayar.j@must.edu.mn[1]

Хураангуй: **Энэхүү судалгааны ажлаар Техникийн термодинамик-1 хичээлийн хүрээнд** судалдаг **төгс хийн үндсэн хуулиудын нэг болох эзлэхүүн тогтмол нөхцөлд төгс хийг халаахад түүний даралт, температурын хооронд шууд хамааралтай байдаг гэдгийг нотолсон Ж.Шарлийн хуулийг түүний боловсруулсан аргачлалын дагуу ашиглан агаарыг төгс хийн оронд ашиглан халааж туршин түүний даралт, температурын онолын ба туршилтын утгуудыг харьцуулсан. Тухайн төхөөрөмжийн туршилтын үеийн алдааг тодорхойлон халалтын процессын нөлөөгөөр температур ба даралтын өөрчлөлтийн шугаман хамаарлыг тооцоолон хэмжилтийн ба тооцооны утгуудын зөрүүг тооцон гаргаж, дүгнэсэн.**

Түлхүүр үг: Шарлийн хууль, шугаман хамаарал, зөрүү, температур, агаарын даралт

I. УДИРТГАЛ

Хийн төлөвийг тодорхойлох үндсэн параметрүүд нь даралт, температур, эзлэхүүн болон бодисын тоо хэмжээ байдаг. Эдгээр хэмжигдэхүүнүүдийн хоорондын хамаарлыг тайлбарласан хэд хэдэн онол, хуулиуд байдаг ба тэдгээрийн нэг болох Шарлийн хууль нь эзлэхүүн тогтмол үед хийн даралт, температурын хооронд шууд пропорциональ хамаарал байдаг гэдгийг илэрхийлдэг. Энэ хуулийг 18-р зууны сүүл үе буюу 1787 онд Жак Шарль өөрийн туршилтаар олж нээсэн ба судалгаагаар тогтмол эзлэхүүнтэй саванд агуулагдах тодорхой хэмжээний хийд температурыг нь нэмэхэд даралт нь мөн зэрэгцээгээр нэмэгддэг болохыг тогтоосон байна.

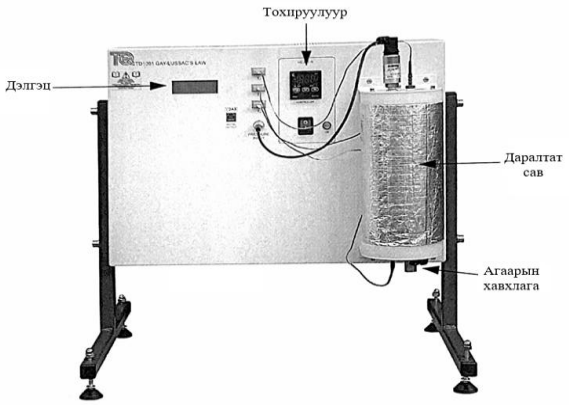
Математик хэлбэрээр энэхүү хамаарлыг $P/T=const$, буюу $P_1/T_1 = P_2/T_2$ гэж илэрхийлдэг. Уг хоёр томьёо нь даралт (P) ба температур (T) хоёрын пропорциональ буюу шууд хамааралтайг илэрхийлэх бөгөөд температур нь үнэмлэхүй температур буюу нэгж нь Кельвинээр илэрхийлэгдэнэ.

Энэ нь зөвхөн онолын ач холбогдолтой төдийгүй практикт өргөн хэрэглэгддэг. Жишээ дурдахад агааржуулалтын систем, даралтын сав, хөдөлгүүр мотор, хийн хоолой зэрэг олон салбарт температурын зөрүүгээс үүсэх даралтыг урьдчилан тооцох шаардлага байдаг. Иймээс эзлэхүүн тогтмол үед температур ба даралтын хамаарлыг судлах нь термодинамик болон инженерчлэлийн чухал асуудал юм. Гэсэн хэдий ч бодит туршилтын нөхцөл онолын үр дүнгийн хооронд тодорхой хэмжээний зөрүү гарч болдог.

Энэхүү судалгааны гол зорилго нь эзлэхүүн тогтмол үед температур ба даралтын хоорондын хамаарлыг онолын болон туршилтын аргаар судалж, тэдгээрийн хооронд үүсэх зөрүүний шалтгааныг тодорхойлох явдал юм.

II. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ОБЪЕКТЫН ТУХАЙ

Туршилтыг Шарлын хуулийг судлахад зориулан Англи улсад бүтээсэн лабораторийн стендыг ашигласан ба уг төхөөрөмж нь хэрэглэхэд хялбар, хэмжилтүүдийг нарийвчлал өндөртэй гаргаж ирдгээрээ давуу талуудтай болно. Мөн стенд нь туслах төхөөрөмж холбон хэмжилтүүдийг давтамж хугацааг өгөх хэмжилтийн үр дүнг хялбар тэмдэглэн авах боломжтой юм.



1-р зураг. Шарлийн хуулийг туршилтаар судлах лабораторийн стенд

Төхөөрөмжийн техникийн үзүүлэлтүүдийг дараах хүснэгтэд үзүүлэв.

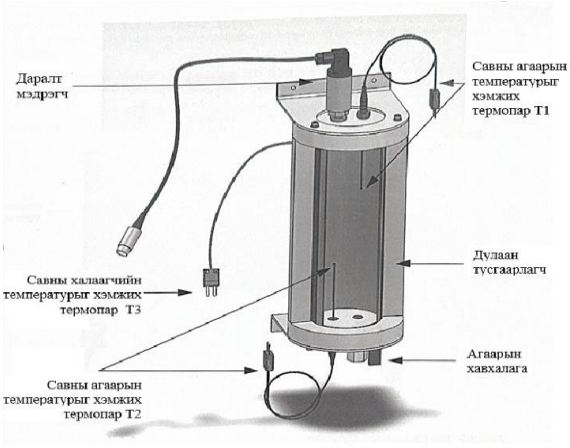
ЛАБОРАТОРИЙН СТЕНДИЙН ТЕХНИКИЙН ҮЗҮҮЛЭЛТ

1-Р ХҮСНЭГТ.

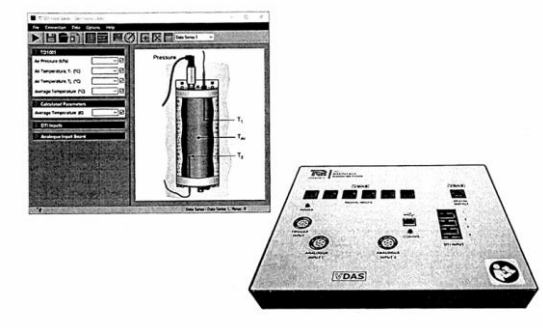
Зүйл	Мэдээлэл
Төхөөрөмжийн хэмжээ	Хэмжээ 600 мм (өндөр) x 630 мм (өргөн) x 520 мм гүн
Туршилтын зөвшөөрөгдөх дээд даралт (орчны нөхцлөөс хамаарна)	Ойролцоогоор 120 кПа (1.2 Бар)
Хөрвүүлэгчийн зөвшөөрөгдөх дээд даралт	Ойролцоогоор 160 кПа (1.6 Бар)
Хамгийн их температур	Ойролцоогоор 65°C (338K)

Нийт жин	18кг

Даралтын савны зөвшөөрөгдсөн дээд хэмжээ бол 160 кПа 65℃ төхөөрөмжийн аюулгүй байдалд анхааран 120 кПа мөн 60℃ дээш халаахгүй байх хэрэгтэй.



2-р зураг. Цахилгаан халаагч бүхий савны хөндлөн огтлол, мэдрэгч элементүүдийн байршил



3-р зураг. Хэмжилтийн үр дүнг цахилгаан дохио болгон хувиргах VDAS төхөөрөмжийн техник болон программ хангамж

III. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Агаарын даралтыг тогтмол төлөвт байгаа эсэхийг шалган (Орчны температур тогтмол үед) хэмжилтүүдийг тэмдэглэн авч анхны төлөвийг тодорхойлно. Анхны төлөвийн үед тодорхойлсон P_1 даралт, T_1 температуртай хийг халаахад түүний эцсийн төлөвт даралт нь P_2, температур нь T_2 болж нэмэгдэх ба энэ үед даралт, температурын харьцаа нь дараах хэлбэртэй байна.

$$\frac{P}{T} = const \qquad (1)$$

Урьдчилан даралтыг тооцох ба доорх томьёогоор онолын утгыг тооцоолж, хэмжилтийн үр дүнтэй харьцуулан шинжилгээ хийж, даралтын зөрүүг юунаас хамааралтай болохыг тодруулах нь туршилтын гол үйл явц юм. Ингэснээр тухайн хийн даралт ба температурын хоорондын онолын хамаарал бодит туршилтын нөхцөлд хэр зэрэг тохирч байгааг үнэлэх боломж бүрдэнэ. Мөн туршилтын явцад гарч болох хэмжилтийн алдаа, багаж хэрэгслийн нарийвчлал, орчны нөхцөл болон хийний бодит шинж чанар зэрэг хүчин зүйлс даралтын утгад хэрхэн нөлөөлж байгааг тодорхойлох боломжтой болно. Иймд байдлаар онолын болон туршилтын үр дүнг харьцуулан судалснаар тухайн хий буюу агаарын шинж чанарыг илүү бодитой ойлгож, онолын хуулийн хэрэглээг практикт үнэлэх ач холбогдолтой юм.

$$P_2 = (P_1 \times T_2) / T_1 \qquad (2)$$

IV. СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ҮР ДҮН

Тус лабораторийн стендийг ашиглан бид тухайн стендийн ажиллагааг танин мэдэх, туршилт хийх дадал олох, эзэмших зорилготойгоор 10 секундийн зайцтайгаар хэд хэдэн удаагийн туршилтыг явуулсан ба эцэст дараах туршилтын үр дүнгүүдийг ашиглан тооцоолол хийж дүгнэлт гаргахаар сонгон авсан.

Дараах хүснэгтүүдэд дээрх 2-р томьёог ашиглан тооцсон онолын үр дүн ба туршилтаар хэмжиж авсан бодит үр дүнгүүдийг үзүүлсэн байна.

Түүнчлэн 2-р зурагт туршилтын ба онолын үр дүнг харьцуулсан графикийг харууллаа.

ТООЦООНЫ УТГА

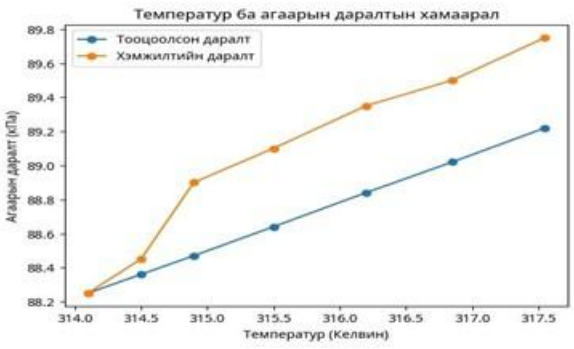
2-Р ХҮСНЭГТ.

Хугацаа (сек)	Температур (Келвинээр)	Агаарын даралт (кПа)
0	314.10	88.25
10	314.50	88.36
20	314.90	88.47
30	315.50	88.64
40	316.20	88.84
50	316.85	89.02
60	317.55	89.22

ЛАБОРАТОРИЙН ТУРШИЛТЫН УТГА

3-Р ХҮСНЭГТ.

Хугацаа (сек)	Температур (Келвинээр)	Агаарын даралт (кПа)
0	314.10	88.25
10	314.50	88.45
20	314.90	88.90
30	315.50	89.10
40	316.20	89.35
50	316.85	89.50
60	317.55	89.75



4-р зураг. Даралт температурын хамаарлын график

Туршилтаар хэмжсэн ба тооцоолсон даралтын зөрүүг доорх томьёогоор тооцсон бөгөөд дундаж зөрүү нь 0.36 кПа байна. Энэ нь ойролцоогоор 0.4–0.6 % орчим алдаа бөгөөд энэ сургалтын зориулалт бүхий лабораторийн стендийн хувьд боломжийн бага зөрүү буюу алдаа гэж үзэж болно.

$$\Delta P = P_{хэмжсэн} - P_{тооцоолсон} \quad (3)$$

$$\Delta P_{дунд} = (\Delta P1 + \Delta P2 + \Delta P3 + \Delta P4 + \Delta P5 + \Delta P6 + \Delta P7) / 7$$

$$Алдаа\ (\%) = |P_{хэмжсэн} - P_{тооцоолсон}| / P_{тооцоолсон} \times 100\% \quad (4)$$

Туршилтаар даралтын саванд байгаа агаарыг халааж, температур ба даралтын хамаарлыг тодорхойлох үед хэмжсэн утгууд болон онолын буюу тооцоолсон утгуудын хооронд тодорхой хэмжээний зөрүү гарсан. Онолын хувьд тогтмол эзлэхүүнтэй системд даралт нь температуртай шууд хамааралтай байдаг. Гэвч бодит туршилтын нөхцөлд олон хүчин зүйлс нөлөөлдөг тул хэмжилтийн үр дүн онолын утгатай яг адилхан гарахгүй байх тохиолдол элбэг юм.

Нэгдүгээрт, хэмжилтийн багажийн нарийвчлал зөрүү үүсэх гол шалтгаануудын нэг байж болно. Температур хэмжигч болон даралт хэмжигч багажууд тодорхой хэмжээнд алдаатай хэмжих магадлалтай байдаг.

Хоёрдугаарт, дулаан жигд тархаагүй байх явдал нөлөөлж болно. Туршилтын явцад сав доторх агаар бүх хэсгээрээ нэгэн зэрэг ижил температурт хүрдэггүй. Халаах үед халаагчийн ойролцоо хэсгийн агаар илүү хурдан халж, бусад хэсэг нь арай удаан халж болдог. Иймээс хэмжилтийн үед дундаж температур тогтворжоогүй байвал даралтын утга онолын тооцооллоос зөрөх магадлалтай.

Гуравдугаарт, дулааны алдагдал нөлөөлдөг. Туршилтын сав орчны агаартай дулаан солилцоо хийж байдаг. Халаах явцад савнаас орчин руу тодорхой хэмжээний дулаан алдагддаг. Үүний улмаас бодит температур онолын тооцоонд ашигласан температураас бага байж болох бөгөөд энэ нь даралтын хэмжилтэд нөлөөлнө.

Дөрөвдүгээрт, туршилтын орчны нөхцөл мөн нөлөөлж болно. Орчны температурын хэлбэлзэл, агаарын урсгал, төхөөрөмжийн байрлал зэрэг хүчин зүйлс нь хэмжилтийн тогтвортой байдалд нөлөөлж болдог. Мөн хэмжилтийн хугацааг яг адил нөхцөлд барихгүй байх нь бага зэргийн зөрүү гаргах боломжтой.

V. ДҮГНЭЛТ

Тухайн туршилтаар хэмжсэн ба тооцоолсон даралтын зөрүүг доорх томьёогоор тооцсон бөгөөд дундаж зөрүү нь 0.36 кПа байна. Энэ нь ойролцоогоор 0.4–0.6 % орчим алдаа гарч байгаа нь даралт ба температурын хооронд шугаман буюу шууд хамааралтай болохыг бүрэн баталж байна. Түүнчлэн хэмжилт ба тооцооны утга зөрүүтэй байхад ихэвчлэн туршилтын нөхцөл, хэмжилтийн багажийн нарийвчлал, дулаан дамжуулалт болон системийн бодит шинж чанаруудтай холбоотой гэдгийг энэхүү туршилтаар өөрийн хувьд ойлгож ухаарлаа.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Цэен-Ойдов, “Техникийн термодинамикийн сурах бичиг,” 2018 оны 4 сар.

[2] “Лабораторийн ажлын заавар: Шаарлийн хуулийг туршилтаар судлах,” хэвлэгдээгүй.

[3] A. R. Mahmoud, “Gay-Lussac’s Law: Pressure–Temperature Relationship in Gases,” 2025 оны 9 сар.

ҮХРИЙН ЯЛГАДАСТ СУУРИЛСАН АНАЭРОБ ЗАДРАЛЫН БИОГАЗ ҮҮСЭЛТИЙН АЖИГЛАЛТЫН ҮР ДҮНГ СУДАЛГААНЫ ЭХ СУРВАЛЖУУДТАЙ ХАРЬЦУУЛСАН СУДАЛГАА

Мөнхбаярын СОЛОНГО[1], Сүхбатын МӨНХШҮР[2], Лхагвасүрэнгийн СҮХ-ЭРДЭНЭ[3]

[1,2,3]Монгол улс, Улаанбаатар, ШУТИС, Эрчим хүчний сургууль, Шинэ Сэргээгдэх эрчим хүчний инженерийн тэнхим

Холбоо барих зохиогчийн и-мэйл хаяг: B222100004@must.edu.mn[1]

Хураангуй: **Энэхүү судалгааны зорилго нь үхрийн ялгадаст суурилсан бага оврын анаэроб задралын системд биогаз үүсэх боломжийг урьдчилсан байдлаар үнэлэхэд оршино. Судалгаанд 1 л багтаамжтай хуванцар реакторт 200 мл ус, 200 г үхрийн ялгадас хийж, шприцийн хоолойгоор хий цуглуулах савтай холбосон хаалттай систем байгуулсан. Туршилтын явцад хий үүсэж, хий дамжуулах шугамаар цуглуулах саванд шилжсэн нь органик бодисын анаэроб биологийн задрал явагдаж байгааг илтгэв. Өмнөх судалгааны үр дүнтэй харьцуулахад үхрийн ялгадас нь биогазын тогтвортой суурь субстрат болох хандлагатай нь нийцэж байв. Мөн Монгол Улсын үхрийн нөөцөд тулгуурлан хийсэн онолын тооцоогоор үхрийн баасны жилийн биогазын потенциал 666.8 сая м³/жилд хүрэх боломжтой нь фермерийн түвшинд сэргээгдэх эрчим хүчний чухал түүхий эд болохыг харуулж байна. Гэвч энэхүү туршилтад хийн эзлэхүүн, найрлага, метаны агууламж, pH, температур зэрэг үзүүлэлтүүдийг хэмжээгүй тул судалгааны үр дүнг биогазын гарцыг тоон утгаар тогтоосон бүрэн үнэлгээ бус, харин биогаз үүсэх боломжийг харуулсан урьдчилсан туршилтын дүн гэж үзэв. Цаашид хийн гарц, метаны хувь, температурын горим, pH-ийн өөрчлөлт болон системийн үр ашгийг тоон аргаар тодорхойлсон нарийвчилсан судалгаа хийх шаардлагатай.**

Түлхүүр үг: ***анаэроб задрал, биогаз, үхрийн ялгадас, бага оврын реактор, биоэнерги, фермерийн хэрэглээ***

I. УДИРТГАЛ

1.1 Органик хаягдлыг эрчим хүчний эх үүсвэр болгон хувиргах технологиудын дотроос Анаэроб задрал нь фермерийн аж ахуйд нэвтрүүлэх боломжтой шийдэлд тооцогддог. Энэ процесст органик бодис хүчилтөрөгчгүй орчинд бичил биетний үйлчлэлээр задарч, ихэвчлэн Метан болон Нүүрсхүчлийн хий-ээс бүрдэх биогаз үүсдэг. Малын ялгадас нь органик бодис, чийг, бичил биетний эх үүсвэрийг агуулдгаараа анаэроб задралд тохиромжтой субстрат юм.

Монгол Улсад мал аж ахуй өргөн тархсан бөгөөд ялгадасны нөөц их хэмжээгээр бүрддэг ч ихэнх нь задгай орчинд задран алдагддаг. Иймээс төвлөрсөн фермерийн нөхцөлд биогазын технологийг турших нь практик ач холбогдолтой.



1-р зураг. Амьтны хаягдлыг биогаз болгон хувиргах анаэроб задралын ерөнхий схем (зохиогчийн боловсруулсан зураг).

1.2 Судалгааны зорилго, зорилтууд

Энэхүү судалгааны зорилго нь үхрийн ялгадаст суурилсан бага оврын анаэроб задралын туршилтаар хий үүсэх боломжийг чанарын түвшинд үнэлж, өмнөх судалгааны үр дүн болон Монголын биологийн нөөцийн тооцоотой уялдуулан дүгнэхэд оршино. Судалгааны үндсэн зорилтууд нь үхрийн ялгадас–усны хольц бүхий batch систем байгуулах, хий үүсэх явцыг ажиглах, үр дүнг өмнөх судалгаатай харьцуулах, фермерийн хэрэглээний боломжийг хэлэлцэх явдал юм.

II. СЭДВИЙН СУДЛАГДСАН БАЙДЛЫН ТОЙМ

2.1 Үхрийн ялгадасны биогазын боломж

Үхрийн ялгадасны анаэроб задралын биогазын боломжийг олон улсын түвшинд янз бүрийн нөхцөлд судалсан байна. Gemechu (2020) Этиопт 2000 мл хуванцар савтай batch задлагч ашиглан үхрийн баас, хонины ялгадас, гахайн ялгадсыг харьцуулахад үхрийн бааснаас хамгийн их биогаз гарч, метаны агууламж 66.9%-д хүрснийг тогтоосон [2]. Тус судалгаанд хамгийн өндөр гарц ойролцоогоор 12 дахь өдөр ажиглагдсан нь үхрийн ялгадас бага оврын реакторт ч тогтвортой субстрат болдгийг харуулжээ.

Halmaciu 6 зэрэгцээ 2000 мл лабораторийн реактор дээр 28 хоногийн турш үхрийн ялгадасны биогазын боломжийг судлахад 37°C мезофиль нөхцөл, pH 6.40–6.94 орчим орчинд хий урсгал хамгийн өндөр нь 10 дахь өдөр бүртгэгдсэн байна [3]. Энэ нь анаэроб задралын үр ашиг нь зөвхөн

субстратаас бус реакторын тогтвортой ажиллагаа, бичил орчны нөхцөлөөс шалтгаалдгийг харуулж байна.

2.2 Анаэроб задралын ажиллах нөхцөл

Mohammed-ын batch анаэроб задралын туршилтад үхэр, хонь, шувууны ялгадсыг 37°C нөхцөлд, ялгадас:ус = 1:1 харьцаатай 12 хоног задлахад pH 7 үед хамгийн өндөр, pH 6.5 үед хамгийн бага биогазын гарц гарсан байна [4]. Мөн гэрэл нэвтрүүлдэг реактораас илүүтэй хараар бүрсэн, гэрлээс тусгаарласан реактор илүү өндөр гарц өгснийг тогтоосон нь реакторын битүүмжлэл, гэрлийн нөлөө, тогтвортой орчин бага оврын туршилтад ч чухал болохыг харуулжээ.

Нар цэвэр үхрийн баас, үхрийн баас–гахайн баас, үхрийн баас–ногооны хаягдлын хольцыг харьцуулахад цэвэр үхрийн бааснаас 0.391 м³ биогаз гарч, метаны агууламж 69.18%-д хүрсэн байна [6]. Энэ нь хамтран задрал заавал дан үхрийн бааснаас өндөр гарц өгөхгүй, харин хольцын харьцааг оновчлох шаардлагатайг илтгэнэ.

2.3 Задралын талаарх өмнөх судалгаанууд

Dincă нар (2014) амьтны ялгадас, шинэ биомасс, глюкозын хамтран задралын судалгаанд глюкоз нэмэх нь био-задралын үйл явцыг сайжруулж болохыг харуулсан [7]. Мөн Clean Technologies-ийн судалгаанд инокулум, үйлдвэрийн органик шингэн хаягдал, навчны зутангийн 10:2:2 харьцаа хамгийн өндөр 9.21 L/kg VS метан гарц өгсөн бөгөөд хэт ачаалал өгөхөд гарц буурч байв [8]. Иймээс хам-субстрат ашиглахдаа зөв харьцаа сонгох шаардлагатай.

Mutungwazi нар (2022) амьтны ялгадасны физик-хими ба микробиомын судалгаагаар үхрийн ялгадасны C/N харьцаа 22.3 байсан нь анаэроб задралд таатай гэж үздэг 20–30 орчим мужид ойр байгааг тогтоосон [5]. Энэ нь үхрийн ялгадас зөвхөн практик туршилтаар бус, химийн найрлага ба бичил биетний бүтцийн хувьд ч тогтвортой субстрат болохыг дэмжиж байна.

СУДЛАГДСАН БАЙДЛЫН ТОЙМЫН ҮНДСЭН ҮР ДҮНГИЙН НЭГТГЭЛ

1-Р ХҮСНЭГТ

Судалгаа	Субстрат/арга зүй	Гол үр дүн	Чиний ажилд өгөх ач холбогдол
Gemechu (2020)	2000 мл хуванцар сав, batch задрал; үхэр, хонь, гахай	Үхрийн бааснаас хамгийн их хий, CH_4 = 66.9%	Үхрийн ялгадас сайн суурь субстрат болохыг батална
Halmaciu et al. (2022)	6 зэрэгцээ 2000 мл реактор, 28 хоног, 37°C	Хамгийн өндөр хий 10 дахь өдөр, pH тогтвортой орчин чухал	Мезофиль нөхцөл ба реакторын тогтвортой байдлын ач холбогдол
Mohammed et al. (2022)	2 л batch реактор, 37°C, 1:1 харьцаа	pH 7 үед гарц өндөр, харанхуй реактор илүү сайн	pH, гэрлээс хамгаалалт чухал
San et al. (2024)	50 л реактор; цэвэр CD, CD+PD, CD+VW	Цэвэр үхрийн баас 0.391 м³, CH_4 = 69.18%	Цэвэр үхрийн баасны өндөр потенциалыг дэмжинэ
Mutungwazi et al. (2022)	Микробиом ба C/N шинжилгээ	Үхрийн ялгадасны C/N = 22.3	Үхрийн ялгадасны химийн таатай нөхцөлийг нотолно

III. МОНГОЛЫН БИОЛОГИЙН НӨӨЦ БА ОНОЛЫН ТООЦОО

Монгол Улсын 2024 оны мал тооллогын урьдчилсан дүнгээр нийт 57.65 сая толгой мал тоологдсоноос 5.0744 сая нь үхэр байна [1]. Хэрэв нэг үхэр өдөрт дунджаар 10 кг шинэ баас гаргаж, 1 кг шинэ үхрийн бааснаас 0.036 м³ биогаз гарна гэж FAO-ийн жишиг коэффициентоор үзвэл Монголын үхрийн баасны өдрийн онолын биогазын потенциал 1,826,784 м³/өдөр, жилийн потенциал 666,776,160 м³/жил болно [9], [10].

МОНГОЛ УЛСЫН 2024 ОНЫ МАЛ ТООЛЛОГЫН УРЬДЧИЛСАН ДҮН [1]

2-Р ХҮСНЭГТ

Малын төрөл	Тоо, сая толгой	Нийт дэх хувь, %
Үхэр	5.07	8.8
Хонь	24.49	42.5
Ямаа	22.92	39.8
Адуу	4.68	8.1
Тэмээ	0.48	0.8

3.2 Үхрийн баасны онолын биогазын потенциал

Биогаз дахь метаны эзлэх хувь ерөнхийдөө 50–70% байдаг гэж үзвэл Монголын үхрийн бааснаас гарах метаны онолын потенциал 333.4–466.7 сая м³ CH_4/жил, дундаж тооцоогоор 400.1 сая м³ CH_4/жил байна [9]. 1 м³ биогазыг 6 kWh дулааны энерги гэж тооцоход нийт потенциал нь жилд 4.00 тэрбум кВт.ц буюу 4.0 ТВт.ц орчим дулааны энергитэй тэнцэнэ [9].

Гэвч энэ нь бүх үхрийн баасыг 100% цуглуулж, алдагдалгүй боловсруулсан идеал нөхцөлийн онолын дээд үнэлгээ юм. Монголын бэлчээрийн мал аж ахуйн онцлогоос шалтгаалан ялгадасны дийлэнх нь задгай орчинд үлддэг тул бодит ашиглалтын хувь үүнээс доогуур байна. Иймээс төвлөрсөн саалийн ферм, хашаалсан аж ахуй, өвөлжөө орчмын төвлөрсөн менежменттэй нэгжүүдэд энэхүү потенциалыг

бодитоор ашиглах боломж илүү өндөр гэж үзнэ [11], [12].

МОНГОЛЫН ҮХРИЙН БААСНЫ БИОГАЗЫН ОНОЛЫН ПОТЕНЦИАЛ

3-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Утга
Үхрийн тоо (2024)	5,074,400 толгой
1 үхрийн өдөрт гарах шинэ баас	10 кг/өдөр
1 кг шинэ баасны биогазын гарц	0.036 м³/кг
Өдрийн онолын биогазын потенциал	1,826,784 м³/өдөр
Жилийн онолын биогазын потенциал	666,776,160 м³/жил
Метаны онолын хүрээ (50–70%)	333.4–466.7 сая м³ CH_4/жил
Дулааны энергийн эквивалент	4.00 ТВт.ц/жил

ЦУГЛУУЛАЛТЫН СЦЕНАРИ ТООЦОО

4-Р ХҮСНЭГТ

Цуглуулах хувь	Жилийн биогаз	Жилийн дулааны энерги	Түлээ модны эквивалент
10%	66.7 сая м³/жил	400.1 сая кВт.ц/жил	233.4 мян. т/жил
25%	166.7 сая м³/жил	1.00 тэрбум кВт.ц/жил	583.4 мян. т/жил
50%	333.4 сая м³/жил	2.00 тэрбум кВт.ц/жил	1.17 сая т/жил

3.3 Биогазыг ашиглах боломж ба CO_2 бууралтын тооцоо

Монгол Улсын хэмжээнд 2024 оны байдлаар 5.0744 сая толгой үхэр тоологдсон бөгөөд FAO-ийн жишигт нэг үхэр өдөрт дунджаар 10 кг шинэ баас гаргаж, 1 кг шинэ үхрийн бааснаас 0.036 м³ биогаз гарна гэж үзвэл үхрийн баасны жилийн онолын биогазын потенциал ойролцоогоор 666.8 сая м³/жил байна. Энэ хэмжээг хэрэглээнд шилжүүлэн үнэлэхэд 1 м³ биогазыг 6 кВт/ц дулааны энерги, 0.70 м³ биогазыг 1 кВт/ц цахилгаантай тэнцэх жишиг коэффициентоор авч үзэв. Мөн хоол хийх хэрэглээнд 1 хүн өдөрт 0.33 м³ биогаз шаардана гэсэн FAO-ийн жишгийг ашиглав.

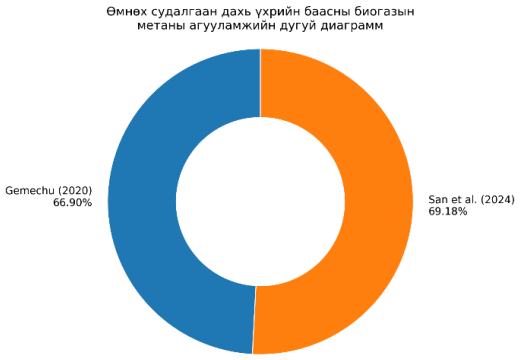
Дээрх жишгээр тооцоход Монголын бүх үхрийн баасыг онолын хувьд бүрэн цуглуулж боловсруулсан тохиолдолд жилд 5.53 сая хүний хоол хийх хэрэгцээг хангахуйц биогаз үйлдвэрлэх, эсвэл 952.5 ГВт.ц/жил цахилгаан үйлдвэрлэх боломжтой байна. Хэрэв ийм цахилгаан нь Монголын төвийн эрчим хүчний системийн 0.75 т CO_2/МВт.ц ялгарлын коэффициенттой нүүрсэн суурьтай цахилгааныг орлуулбал жилд ойролцоогоор 714.4 мянган тCO_2 ялгарал зайлсхийх боломжтой. Нэмж хэлэхэд Монголын First Biennial Transparency Report-д 2022 онд ялгадасны менежменттэй холбоотой ялгарал 496.99 Gg CO_2-eq байсан гэж тайлагнасан тул ялгадаснаас гарах метаны тодорхой хэсгийг барьж ашиглах нь шууд менежментийн ялгарал бууруулах давхар ач холбогдолтой.

БИОГАЗЫН ХЭРЭГЛЭЭ БА CO_2 БУУРАЛТЫН СЦЕНАРИ ТООЦОО

5-Р ХҮСНЭГТ

Цуглуулах хувь	Биогаз (сая м³/жил)	Цахилгаан (ГВт.ц/жил)	Хоол хийх хэрэгцээ (сая хүн/жил)	CO_2 бууралт (мян. т/жил)
10%	66.7	95.3	0.55	71.4
25%	166.7	238.1	1.38	178.6
50%	333.4	476.3	2.77	357.2
100%	666.8	952.5	5.53	714.4

Хүснэгт 5-т үзүүлсэн дүн нь онолын дээд болон сценари үнэлгээ бөгөөд Монголын бэлчээрийн, тархмал мал аж ахуйн нөхцөлд бүх үхрийн баасыг бодитоор цуглуулах боломжгүйг анхаарах шаардлагатай. Иймээс 10–25%-ийн цуглуулалтын сценари нь саалийн фермер, төвлөрсөн хашаалсан маллагаа, өвөлжөө хаврын аж ахуй зэрэг нөхцөлд илүү бодитой гэж үзэж болно. Эдгээр тооцоо нь үхрийн ялгадаснаас гаргах биогазын боломжийг зөвхөн эрчим хүчний төдийгүй уур амьсгалын өөрчлөлтийг сааруулах арга хэмжээний хувьд ч үнэлэх шаардлагатайг харуулж байна.



2-р зураг. Өмнөх судалгаан дахь үхрийн баасны биогазын метаны агууламжийн харьцуулалт



3-р зураг. Монголын үхрийн баасны биогазын сценари тооцоо.

IV. СУДАЛГААНЫ МАТЕРИАЛ, АРГА ЗҮЙ

4.1 Туршилтын материал

Энэхүү судалгаанд 1 л багтаамжтай хуванцар савыг бага оврын batch анаэроб реактор болгон ашиглав. Реакторт 200 мл ус, 200 г үхрийн ялгадас хийж нэгэн төрлийн нойтон субстрат бэлтгэсэн. Савны амсрыг битүүмжилж, шприцийн хоолойгоор хий цуглуулах тусдаа савтай холбосон. Ийнхүү хүчилтөрөгчгүй орчинд задрал явагдах энгийн хаалттай систем бүрдүүлэв. Ижил төрлийн судалгаанд 2000 мл хуванцар сав болон 2 л реактор ашигласан нь ийм төрлийн бага оврын лабораторийн setup нь урьдчилсан үнэлгээнд тохиромжтойг харуулдаг [2], [4].

4.2 Туршилтын төхөөрөмжийн угсралт

Туршилтын явцад системийг өрөөний нөхцөлд байршуулж, хий үүсэх эсэх, хий дамжуулах хоолойгоор цуглуулах сав руу шилжих эсэх, субстратын бүтэц өөрчлөгдөх эсэхийг чанарын аргаар ажиглав. pH, температур, хийн эзлэхүүн, метаны агууламж, TS/VS зэрэг үзүүлэлтийг хэмжээгүй тул энэхүү судалгааг чанарын урьдчилсан лабораторийн туршилт гэж тодорхойлов.



4-р зураг. Үхрийн ялгадаст суурилсан бага оврын анаэроб задралын туршилтын угсралт.

4.3 Туршилтын аргачлал

ТУРШИЛТЫН СИСТЕМИЙН ҮНДСЭН ТООЦООНЫ ҮЗҮҮЛЭЛТ

6-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Тооцоо / үр дүн
Реакторын нэрлэсэн эзлэхүүн	1000 мл
Нэмсэн ус	200 мл
Нэмсэн үхрийн ялгадас	200 г
Нийт нойтон тэжээл	400 г
Ус : ялгадасны харьцаа	1 : 1
200 г ялгадасны онолын биогазын потенциал	0.0072 м³
Литрээр илэрхийлбэл	7.2 л
Метаны онолын хүрээ (50–70%)	3.6–5.0 л CH_4

4.4 Ажиглалтын үнэлгээний арга

200 г үхрийн ялгадаснаас гарах 7.2 л биогаз нь зөвхөн FAO-ийн гарцын коэффициент дээр суурилсан онолын ойролцоо дээд үнэлгээ бөгөөд бодит туршилтад температур, pH, инокулумын идэвх, битүүмжлэл, хий алдагдал, задралын гүйцэтгэлээс шалтгаалан үүнээс доогуур гарц гарах магадлалтай [9], [10].

V. ҮР ДҮН

5.1 Туршилтын ажиглалтын үр дүн

Туршилтын явцад реактор савнаас хий үүсэж, шприцийн хоолойгоор дамжин хий цуглуулах сав руу шилжсэн нь ажиглагдав. Энэ нь үхрийн ялгадас–усны хольц бүхий субстрат дотор анаэроб задралын процесс эхэлж, хийн бүтээгдэхүүн үүсэж байгааг чанарын түвшинд харуулж байна. Гэсэн хэдий ч хийн эзлэхүүн, даралт, химийн найрлага, метаны эзлэх хувийг хэмжээгүй тул “үүссэн хий нь тодорхой хэмжээний метантай биогаз байсан” гэж тоон утгаар батлах боломжгүй.

5.2 Чанарын ажиглалтын хүснэгт

МАНАЙ ТУРШИЛТЫН ЧАНАРЫН АЖИГЛАЛТЫН НЭГТГЭЛ

7-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Ажиглагдсан байдал	Үнэлгээ
Реактор дотор хий үүсэх шинж	Ажиглагдсан	Илэрхий
Хий хоолойгоор шилжих байдал	Ажиглагдсан	Дунд–илэрхий
Хий цуглуулах саванд очих байдал	Ажиглагдсан	Дунд
Субстратын бүтэц өөрчлөгдөх	Ажиглагдсан	Дунд
Хийн эзлэхүүн	Хэмжээгүй	—
Метаны агууламж	Хэмжээгүй	—
pH	Хэмжээгүй	—
Температур	Хэмжээгүй	—

5.3 Жишиг судалгаатай харьцуулсан үзүүлэлт

ЖИШИГ СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН БА МАНАЙ ТУРШИЛТЫН ХАРЬЦУУЛАЛТ

8-Р ХҮСНЭГТ

Үзүүлэлт	Өмнөх судалгааны үр дүн	Манай туршилт
Реакторын төрөл	2000 мл хуванцар сав, жижиг batch реактор [2]	1 л хуванцар сав
Ус : ялгадасны харьцаа	1 : 1 нөхцөл түгээмэл хэрэглэсэн [4]	1 : 1
Үхрийн баасны метан	66.9% [2]	Хэмжээгүй
Цэвэр үхрийн баасны нийт биогаз	0.391 м³ [6]	Хэмжээгүй
Оновчтой pH	pH 7 үед өндөр гарц [4]	Хэмжээгүй
Үхрийн ялгадасны C/N	22.3 [5]	Хэмжээгүй
Хий үүсэх үзэгдэл	Ажиглагдаж, хэмжигдсэн [2], [6]	Ажиглагдсан

VI. ХЭЛЭЛЦҮҮЛЭГ

6.1 Үр дүнгийн тайлбар

Манай туршилтад хий үүсэж, хоолойгоор дамжин хий цуглуулах сав руу шилжсэн нь үхрийн ялгадасны анаэроб задрал явагдаж байгааг чанарын түвшинд илтгэсэн. Энэ ажиглалт нь өмнөх туршилтын судалгаануудын чиг хандлагатай нийцэж байна. Gemechu-ийн судалгаанд үхрийн бааснаас хамгийн өндөр биогаз гарч, метаны агууламж 66.9%-д хүрсэн бол San нарын судалгаанд цэвэр үхрийн баас 0.391 м³ нийт биогаз, 69.18% метан өгсөн нь үхрийн ялгадас биогазын үр ашигтай суурь субстрат болохыг харуулсан [2], [6].

6.2 Өмнөх судалгаатай харьцуулалт

Манай туршилтын үндсэн хязгаарлалт нь pH, температур, HRT, TS/VS, хийн эзлэхүүн, хийн найрлага хэмжигдээгүйд оршино. Mohammed нарын судалгаанд pH 7 үед хамгийн өндөр гарц гарсан, мөн гэрэл нэвтрүүлдэг бус хараар бүрсэн, тусгаарласан реактор илүү үр ашигтай байсан [4]. Halmaciu нарын судалгаанд 37°C мезофиль нөхцөл, өдөр тутмын pH хяналт, 28 хоногийн ажиллагаа чухал байсан [3]. Иймээс манай системийн дараагийн шатны сайжруулалтад pH хэмжилт, температурын тогтворжилт, усан шилжилтийн аргаар хий хэмжих, реакторын битүүмжлэлийг илүү сайжруулах шаардлагатай.

Хамтран задралын талаарх судалгаанууд мөн чухал сургамж өгч байна. Dincă нар глюкоз болон шинэ биомасс нэмэх нь зарим нөхцөлд гарцыг сайжруулж болохыг харуулсан бол Clean Technologies-ийн судалгаанд хам-субстратын харьцаа оновчгүй бол гарц буурч болохыг тогтоосон [7], [8]. Иймээс үхрийн ялгадсыг суурь субстрат болгон ашиглаад цаашид хүнсний хаягдал, ургамлын үлдэгдэл, нэмэлт инокулумтай хослуулсан туршилт хийх нь үр ашигтай чиглэл байж болно.

Mutungwazi нарын судалгаагаар үхрийн ялгадасны C/N харьцаа 22.3 байсан нь анаэроб задралын хувьд таатай нөхцөлд ойр байгааг харуулсан [5]. Энэ нь үхрийн ялгадас зөвхөн практик туршилтаар бус, мөн физик-хими ба микробиомын хувьд тогтвортой субстрат болохыг дэмжиж байна. Иймээс Монголын фермерийн төвлөрсөн аж ахуйд үхрийн ялгадас суурьтай биогазын систем турших нь технологийн хувьд үндэслэлтэй гэж дүгнэж болно.

6.3 Фермерийн хэрэглээний боломж

Үхрийн ялгадаст суурилсан биогазын системийг фермерийн аж ахуйд гурван үндсэн чиглэлээр ашиглах боломжтой. Нэгдүгээрт, ялгадасны менежментийг сайжруулна. Задгай орчинд тарамдаж байгаа ялгадсыг реакторт төвлөрүүлснээр үнэр, хөрс-усны бохирдол, хүлэмжийн хийн шууд алдагдлыг бууруулах боломжтой [11], [12].

Хоёрдугаарт, үүссэн биогазыг ус халаах, хоол хийх, жижиг оврын халаалт, зарим тохиолдолд цахилгаан үйлдвэрлэлд ашиглаж болно. Камбожийн судалгаанд биогазыг өрхийн түвшинд халаалт, хоол хийх, ахуйн хэрэгцээнд ашиглах боломжийг онцолсон бөгөөд 1 м³ биогазын энергийг 6 kWh орчим гэж үзсэн [6], [9].

Гуравдугаарт, анаэроб задралын дараах digestate нь азот, фосфор, калийн агууламжтай тул органик бордоо хэлбэрээр дахин ашиглах боломжтой. Clean Technologies-ийн судалгаанд задралын дараа азот, кали, фосфорын агууламж өссөнөөр бордооны чанар сайжирсан гэж үзсэн [8]. Ийм технологи нь фермд “эрчим хүч + органик бордоо” гэсэн давхар өгөөж бий болгоно.

Монголын нөхцөлд бүх үхрийн ялгадсыг бодитоор цуглуулах боломжгүй ч 10%-ийг л цуглуулж чадсан тохиолдолд ч онолын хувьд 66.7 сая м³/жил биогазын потенциал бүрдэнэ. Энэ нь төвлөрсөн саалийн болон махны фермер, хашаалсан өвөлжөө, эрчимжсэн аж ахуйн нэгжид биогазын систем нэвтрүүлэх бодит боломж байгааг харуулж байна.

VII. ДҮГНЭЛТ

Монгол Улсад 2024 оны байдлаар 5.0744 сая толгой үхэр тоологдсон бөгөөд FAO-ийн жишиг коэффициентоор тооцоход үхрийн баасны жилийн онолын биогазын потенциал 666.8 сая м³/жил байна. Иймээс үхрийн ялгадас нь фермерийн түвшний сэргээгдэх эрчим хүчний чухал түүхий эд байж болохыг энэхүү судалгаа урьдчилсан байдлаар харууллаа. Гэвч судалгааны явцад лабораторийн нарийвчилсан багаж, хэмжилтийн төхөөрөмж хүрэлцээгүйгээс шалтгаалан хийн эзлэхүүн, найрлага, метаны агууламж, температур, pH зэрэг үзүүлэлтүүдийг тоон аргаар тодорхойлох боломжгүй

байв. Иймээс уг судалгааны үр дүнг биогазын гарцыг бүрэн тоон утгаар тогтоосон үнэлгээ бус, харин үхрийн ялгадаснаас биогаз үүсэх боломжийг ажиглалтын түвшинд харуулсан урьдчилсан чанарын туршилтын дүн гэж үзэв. Цаашид лабораторийн нарийн багаж, хэмжилтийн төхөөрөмж ашиглан хийн гарц, метаны хувь, температурын горим, pH-ийн өөрчлөлт, системийн үр ашгийг тоон аргаар тодорхойлсон нарийвчилсан судалгаа хийх шаардлагатай.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ, НОМ ЗҮЙ

[1] Үндэсний статистикийн хороо, “2024 оны мал тооллогын урьдчилсан дүн,” Улаанбаатар, 2025.

[2] F. K. Gemechu, “Evaluating the Potential of Domestic Animal Manure for Biogas Production in Ethiopia,” Journal of Energy, 2020.

[3] I. A. Halmaciu, I. Ionel, and I. Vetres, “Experimental research concerning the possibility of the cow manure conversion into biogas,” IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 960, 012016, 2022.

[4] M. Mohammed, A. Belkair, R. Hassan, A. Jirhiman, and A. Ahmeedah, “Improving Biogas Production from Animal Manure by Batch Anaerobic Digestion,” 2022.

[5] A. Mutungwazi, G. N. Ijoma, H. J. O. Ogola, and T. S. Matambo, “Physico-Chemical and Metagenomic Profile Analyses of Animal Manures Routinely Used as Inocula in Anaerobic Digestion for Biogas Production,” Microorganisms, vol. 10, no. 4, 671, 2022.

[6] S. San, S. Heng, V. Torn, C. Choeung, H. Cheng, S. Hun, and C. Or, “Production of biogas from co-substrates using cow dung, pig dung, and vegetable waste: A case study in Cambodia,” AIMS Energy, vol. 12, no. 5, pp. 1010–1024, 2024.

[7] M. Dincă, M. Ferdeş, G. Voicu, G. Paraschiv, G. Moiceanu, G. Muşuroi, and S. Ioniță, “Biogas production from mixtures of animal manure and fresh biomass with and without glucose addition,” COMAT 2014.

[8] S. S. Habib et al., “Biogas and organic fertilizer production from anaerobic digestion of rubber processing effluent, Gliricidia leaves slurry, and inoculum,” Clean Technologies, 2025.

[9] FAO, Biogas technology: A training manual for extension, Rome, 1996.

[10] FAO, Household biogas and manure output assumptions for cattle dung-based biogas systems.

[11] UNFCCC, Mongolia’s Initial Biennial Update Report and National Inventory Report, Bonn, 2017.

[12] UNFCCC, Mongolia’s First Biennial Transparency Report, Bonn, 2025.

[13] Joint Crediting Mechanism (JCM), “Calculating the conservative emission factor of Mongolia’s Central Energy System grid,” 2023.

[14] SNV, “Updated Guidebook on Biogas Development,” 1984/updated edition