ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті

ӘОК 681.5:697.1 (043)

Қолжазба құқығында

СЕЙТБЕКОВА АЙНАГУЛЬ МАНАРБЕКОВНА

Үлкен деректердегі ауытқуларды анықтау негізінде ауданның жылумен жабдықтау жүйесінің отын тұтынуын оңтайландыру әдістерін зерттеу және өңдеу

8D07103 – Автоматтандыру және басқару

Философия докторы (Ph.D) дәрежесін алуға арналған диссертация

Ғылыми кеңесші:
т.ғ.д, профессор
Утепбергенов И.Т.

Шетелдік ғылыми кеңесші:
т.ғ.д, профессор
Склярова Ю.В.

Қазақстан Республикасы
Алматы, 2026

МАЗМҰНЫ

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР 4
АНЫҚТАМАЛАР 5
БЕЛГІЛЕНУЛЕР ЖӘНЕ ҚЫСҚАРТУЛАР 6
КІРІСПЕ 7
1. ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА ЖЫЛУ ЭНЕРГЕТИКАСЫН ДАМЫТУДЫҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ МЕН АЛҒЫШАРТТАРЫ 12
1.1 Әлемдік жылу энергетикасының заманауи даму үрдістері 12
1.2 Қазақстан жылу энергетикасының қазіргі жағдайы мен даму тенденциялары 18
1.3 Жылу энергиясын өндіру, беру және тұтыну көрсеткіштерін статистикалық талдау 24
2. ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУДЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІ ЖӘНЕ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗ АРХИТЕКТУРАСЫН ӨҢДЕУ 31
2.1 Басқару жүйесінің Software-in-the-Loop концепциясын өңдеу 31
2.2 Аудандық жылыту желілеріне арналған цифрлық егіз архитектурасын әзірлеу 37
2.3 Цифрлық егізге негізделген жұмыс үрдісінің математикалық тұжырымдамасы және эксперименттің сандық қойылымы 43
2.4 Зерттелетін телімнің жылу-гидравликалық моделін әзірлеу 49
2.5 SIL концепциясына негізделген жылумен жабдықтауды зияткерлік басқару жүйесі моделінің формалды верификациясы 60
Екінші бөлім бойынша қорытынды 67
3. АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕСІНІҢ МАТЕМТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ 69
3.1 Орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесінің математикалық моделі 68
32 MATLAB / Simulink / Simscape бағдарламасында термогидравликалық желі моделін өңдеу 77
3.3 MATLAB/Simscape және Fluidit Heat нәтижелерін салыстыру жолымен модельді тексеру 79
Үшінші бөлім бойынша қорытынды 84
4. АНОМАЛИЯЛАРДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ОТЫН ШЫҒЫНДАРЫН БАСҚАРУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ 85
4.1 Жылу желісіндегі аномалиялық режимдерді машиналық оқыту әдістерімен анықтау 85
4.2 Жылыту жүйелеріндегі аномалияларды анықтау алгоритмдері 87
4.3 Жылу энергиясын есепке алу жүйесін зерттеу және әзірлеу 99
Төртінші бөлім бойынша қорытынды 99
ҚОРЫТЫНДЫ 101
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕККӨЗДЕР ТІЗІМІ 103
ҚОСЫМШАЛАР 112

Қосымша А. Диссертациялық жұмыс тақырыбы бойынша зияткерлік меншік объектілері 114
Қосымша Б. Зерттеу нәтижелерін енгізу актісі 117
Қосымша В. Humboldt-Innovation Academy (Берлин) оқу курсын бітіргені туралы сертификат 118
Қосымша Г. Жылытудың жылу энергиясын тұтынуымен ЫСЖ есептеу алгоритмі 119

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Бұл диссертациялық жұмыста келесі нормативтік құжаттарға сілтемелер қолданылған:

1. Қазақстан Республикасының 2024 жылғы 8 шілдедегі №120-VIII ҚРЗ «Жылу энергетикасы туралы» Заңы.

2. Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2024 жылғы 25 желтоқсандағы № 1102 қаулысымен бекітілген «Энергетикалық және коммуналдық секторларды жаңғырту» ұлттық жобасы // Қазақстан Республикасының нормативтік құқықтық актілерінің эталондық бақылау банкі.

3. ҚР ЕЖ 4.02-104-2013 «Жылу желілері» (01.04.2019 ж. берілген өзгерістермен және толықтырулармен).

4. ҚР ЕЖ 4.02-101-2012 «Ауаны жылыту, желдету және кондиционерлеу».

5. ҚР ЕЖ 2.04-107-2022 «Ғимараттардың жылу қорғанысы».

6. «Электр станцияларының және жылу желілерінің жылу-механикалық жабдықтарын пайдалану кезіндегі қауіпсіздік техникасы қағидаларын бекіту туралы» ҚР Энергетика министрінің 2015 жылғы 20 ақпандағы №122 бұйрығы (01.06.2025 ж. берілген өзгерістермен).

АНЫҚТАМАЛАР

Бұл диссертациялық жұмыста анықтамалары келтірілген келесі терминдер қолданылған:

Цифрлық егіз	–	физикалық нысанның (құрылғы, жүйе, процесс) нақты уақыттағы деректермен жаңарып отыратын виртуалды көшірмесі.
Орталықтандырылған жылыту жүйесі	–	бір немесе бірнеше жылу көзінен өндірілген жылуды құбырлар арқылы көптеген тұтынушыларға (ғимараттарға) жеткізетін жылыту жүйесі.
Жасанды интеллект	–	дамның ойлау, үйрену және шешім қабылдау қабілеттерін компьютерлік жүйелерде модельдеуге бағытталған ғылым мен технология саласы.
Машиналық оқыту	–	компьютердің нақты бағдарламаланбай-ақ деректерден үлгілерді өздігінен үйреніп, болжау немесе шешім қабылдай алуын қамтамасыз ететін жасанды интеллекттің ішкі саласы.
Software-in-the-Loop	–	нақты физикалық жабдықтың орнына оның бағдарламалық моделін қолданып, басқару алгоритмдерін виртуалды ортада тексеру әдісі.
Жылугидравликалық моделдеу	–	жылу тасымалдағыштың температурасы мен қысымының таралуын, ағынын және жылу алмасуын компьтерлік бағдарлма немесе математикалық теңдеулер арқылы сипаттау.
Формалды верификация	–	жүйенің немесе бағдарламаның математикалық модель арқылы барлық мүмкін күйлерін тексеріп, оның берілген спецификацияға сәйкестігін дәлелдеу әдісі.
Имитациялық моделдеуі	–	нақты жүйенің мінез-құлқын компьютерде уақыт бойынша жасанды түрде қайта жаңғыртып зерттеу әдісі.
Аномалияларды анықтау	–	деректердегі қалыпты үлгіден ауытқыған, күтпеген немесе қауіпті жағдайларды автоматты түрде тауып, белгілеу процесі.
Үлкен деректер	–	көлемі өте ауқымды, құрылымы күрделі (құрылымдалған, жартылай құрылымдалған және құрылымдалмаған) және дәстүрлі деректерді өңдеу құралдарымен жинауға, сақтауға және талдауға мүмкіндік бермейтін ақпарат массиві.

БЕЛГІЛЕНУЛЕР ЖӘНЕ ҚЫСҚАРТУЛАР

4GDH	– Төртінші буындағы жылыту жүйесі
5GDH	– Бесінші буындағы жылыту жүйесі
SCADA	– Supervisory Control and Data Acquisition
БЛК	– Бағдарламаланатын логикалық контроллер
ЖЭО	– Жылу электр орталығы
АРЖ	– Автоматты реттеу жүйесі
SiL	– Software-in-the-Loop
OPC UA	– Open Platform Communications Unified Architecture
WinCC	– Windows Control Center
ЖИ	– Жасанды интеллект
МО	– Машиналық оқыту
HMI	– Human-Machine Interface
LSTM	– Long Short-Term Memory
ПӘК	– Пайдалы әсер коэффициенті
ОЖЖ	– Орталықтандырылған жылыту жүйесі
TIA Portal	– Totally Integrated Automation Portal
VAE	– Variational Autoencoder

КІРІСПЕ

Зерттеудің өзектілігі. Қазақстан Республикасының Президенті Қ.К. Тоқаевтың Қазақстан халқына Жолдауларында [1-3] энергетикалық және коммуналдық инфрақұрылымның тозуы, жылу электр станцияларындағы технологиялық бұзушылықтар және саланы жүйелі жаңғырту қажеттігі атап өтілген. Зерттеудің өзектілігі Қазақстан Республикасының «Жылу энергетикасы туралы» Заңында көзделген жылу энергетикасы деректерін жинау, өңдеу, мониторингтеу және талдау міндеттерімен де айқындалады. «Энергетикалық және коммуналдық секторларды жаңғырту» ұлттық жобасында жылу желілерінің тозу деңгейін төмендету, есепке алу мен басқаруды автоматтандыру, температура мен қысымды нақты уақыт режимінде мониторингтеу және жылу энергиясын есепке алу деректерін интеграциялау көзделген. Ұлттық жоба Big Data негізінде интеллектуалды басқару мен болжауды енгізуді, ресурстарды тұтынуды оңтайландыруды, сондай-ақ тозуды, авариялар мен шығындарды басқаруды міндеттейді. Осыған байланысты үлкен деректердегі режимдік ауытқуларды ерте анықтау және аудандық жылумен жабдықтау жүйесінің отын тұтынуын оңтайландыру әдістерін әзірлеу маңызды ғылыми және практикалық міндет болып табылады.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы.

Зерттеудің теориялық маңыздылығы аудандық жылумен жабдықтау жүйесін өзара байланысқан жылу-гидравликалық процестерден, автоматтандыру құралдарынан және ақпараттық ағындардан тұратын күрделі басқару объектісі ретінде қарастырумен анықталады. Жұмыста жылу желісіндегі температура, қысым, шығын, жылу жүктемесі, сыртқы ауа температурасы, жабдықтардың күйі және отын шығыны туралы әртекті деректерді бірлесіп өңдеу қағидалары дамытылады.

Жылу жүктемесі, желідегі жылу шығыны, жылу тасымалдағыштың температурасы мен шығыны, сорғы жабдықтарының жұмыс режимі және жылу энергиясы көзіндегі отын тұтынуы арасындағы байланыстарды сипаттайтын модельдер зерттеудің теориялық нәтижелеріне жатады. Ұсынылған тәсіл ауытқуларды анықтау міндетін тек диагностикалық есеп ретінде емес, отын тұтынуды оңтайландыруға арналған басқарушылық шешімдерді қалыптастырудың бастапқы кезеңі ретінде қарастырады.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы TIA Portal, WinCC, Python және Fluidit Heat бағдарламалық орталарын біріктіретін Software-in-the-Loop эксперименттік кешенін құрумен байланысты. Бұл кешен нақты жылу желісінің жабдықтарына әсер етпей, деректер алмасуды, басқару алгоритмдерін, апаттық жағдайларды және диспетчерлік әрекеттерді қауіпсіз тексеруге мүмкіндік береді.

MATLAB/Simulink/Simscape ортасында әзірленген модель жылумен жабдықтау жүйесінің жылу-гидравликалық режимдерін тәуелсіз есептеуге, әртүрлі жүктеме сценарийлерін салыстыруға және Fluidit Heat нәтижелерін тексеруге арналған. Зерттеу нәтижелері жылу желілерінің режимдерін бақылау, қалыптан тыс жағдайларды ерте анықтау, жалған дабылдар санын азайту, жылу энергиясының шығынын бағалау және отын тұтынуды төмендетуге бағытталған

басқару шешімдерін негіздеу кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Мәсселенің даму дәрежесі.

Орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелерін зерттеу саласында жылу және гидравликалық режимдерді есептеу, құбырлардағы қысым мен температураның өзгеруін модельдеу, жылу шығындарын анықтау, сорғы және жылу өндіру жабдықтарының жұмысын оңтайландыру әдістері жеткілікті дәрежеде дамыған. Қолданыстағы мамандандырылған бағдарламалық кешендер жылу желісінің стационарлық және динамикалық режимдерін есептеуге, желі топологиясын талдауға және әртүрлі жүктеме жағдайларын модельдеуге мүмкіндік береді.

Соңғы жылдары технологиялық процестердегі ауытқуларды анықтау үшін статистикалық талдау, машиналық оқыту, нейрондық желілер, автоэнкодерлер және уақыттық қатарларды болжау әдістері қолданылуда. Дегенмен деректерге негізделген модельдердің көпшілігі физикалық процестің заңдылықтарын жеткілікті ескермейді. Сонымен қатар жылумен жабдықтау жүйелерінде апаттық жағдайлар туралы белгіленген деректердің аз болуы, өлшеулердің толық болмауы, датчиктердің әртүрлі жиілікпен жұмыс істеуі және маусымдық өзгерістер жасанды интеллект модельдерін оқытуды қиындатады.

Қолданыстағы зерттеулерде жылу-гидравликалық модельдеу, автоматтандырылған басқару, ауытқуларды анықтау және отын шығынын оңтайландыру міндеттері көбінесе жеке қарастырылады. Ауытқудың түрін анықтап қана қоймай, оның жылу энергиясын өндіруге және отын тұтынуға әсерін бағалайтын, содан кейін қауіпсіз әрі энергия тиімді басқару әрекетін ұсынатын кешенді әдістер жеткіліксіз зерттелген.

Қазақстанның жылумен жабдықтау жүйелеріне қатысты зерттеулерде жабдықтар мен желілердің тозуы, жылу шығындары, есепке алу құралдарының жеткіліксіздігі және инфрақұрылымды жаңғырту мәселелері қарастырылғанымен, нақты уақыттағы технологиялық деректерді, цифрлық модельдерді және жасанды интеллект әдістерін бір ортада біріктіру мәселесі өзекті болып қалуда. Осыған байланысты физикалық заңдылықтар мен үлкен деректерді талдауды біріктіретін гибридті тәсілдерді әзірлеу қажеттілігі туындайды.

Зерттеу объектісі мен пәні.

Зерттеу объектісі – жылу энергиясының көзін, беру және қайтару құбырларын, сорғы жабдықтарын, жылу пункттерін, тұтынушыларды, өлшеу құралдарын және автоматтандырылған басқару жүйесін қамтитын аудандық орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесі.

Зерттеу пәні – жылумен жабдықтау жүйесінің технологиялық деректерін жинау және өңдеу процестері, қалыпты және қалыптан тыс режимдердің заңдылықтары, ауытқуларды анықтау мен жіктеу модельдері, сондай-ақ жылумен жабдықтаудың сенімділігі мен сапасына қойылатын шектеулер жағдайында отын тұтынуды оңтайландыру әдістері.

Зерттеудің мақсаты – үлкен көлемдегі режимдік және технологиялық деректерден ауытқуларды анықтау негізінде ауданның орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесінің отын тұтынуын оңтайландыру әдістері мен

автоматтандырылған басқару құралдарын әзірлеу.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі зерттеу міндеттері анықталды:

1. Қазақстан Республикасындағы орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелерінің қазіргі жағдайын, технологиялық ерекшеліктерін, энергия тиімділігі көрсеткіштерін және цифрландыру деңгейін талдау.

2. Жылумен жабдықтау жүйесінің отын шығынына әсер ететін сыртқы ауа температурасы, жылу жүктемесі, беру және кері құбырлардағы температура, қысым, жылу тасымалдағыш шығыны, желідегі жылу шығыны және жабдықтың тиімділігі сияқты негізгі факторларды анықтау.

3. БЛК, SCADA, архивтік және есептік деректерді жинау мен синхрондауды қамтамасыз ететін TIA Portal, WinCC, Python және Fluidit Heat бағдарламалық құралдарын біріктіру негізінде аудандық жылумен жабдықтау жүйесінің цифрлық егіз архитектурасын әзірлеу.

4. Нақты жылу желісінің құрылымы мен бастапқы деректері негізінде Fluidit Heat ортасында термогидравликалық модель құрып, қалыпты және өзгертілген жылу жүктемелері кезіндегі температура, қысым, шығын және жылу қуаты параметрлерін зерттеу.

5. MATLAB/Simulink/Simscape ортасында жылу желісінің физикалық моделін әзірлеп, оның нәтижелерін Fluidit Heat моделінің нәтижелерімен салыстыру арқылы модельдердің сәйкестігін бағалау.

6. Ұсынылған алгоритмдерді Software-in-the-Loop ортасында тексеріп, қалыпты режим, жоғары жүктеме, датчик ақауы, байланыс үзілуі және технологиялық ауытқу сценарийлері бойынша басқару жүйесінің тұрақтылығы мен тиімділігін бағалау.

Зерттеу әдістері.

Зерттеу барысында жүйелік талдау, физикалық және математикалық модельдеу, жүйелік сәйкестендіру, жылу-гидравликалық есептеу, имитациялық модельдеу, үлкен деректерді статистикалық өңдеу және талдау, модельдік және эксперименттік деректерді салыстырмалы бағалау, жасанды интеллект және машиналық оқыту негізінде аномалияларды анықтау, сондай-ақ жылумен жабдықтау жүйесінің режимдік параметрлерін ескере отырып отын тұтынуын оңтайландыру әдістері қолданылды. Жылумен жабдықтау жүйесінің математикалық моделі масса және энергия балансы, гидравликалық және жылулық процестер, жылу көзінің отын шығыны мен тұтынушылардың жылу жүктемесі негізінде құрылды. Нақты және модельдік параметрлер арасындағы диагностикалық ауытқулар аномальды режимдерді анықтаудың ақпараттық белгілері ретінде пайдаланылды. Технологиялық деректерді жинау және басқару TIA Portal/PLC және WinCC/SCADA, жылу желісінің режимдерін модельдеу Fluidit Heat, ал үлкен деректерді өңдеу және аномалияларды интеллектуалды анықтау Python ортасында жүзеге асырылды. Аномалияларды анықтау алгоритмдерінің бағдарламалық іске асырылуы мен салыстырмалы зерттеуі диссертацияның төртінші тарауында қарастырылды.

Эксперименттік зерттеулер Software-in-the-Loop әдіснамасы негізінде орындалады. БЛК және SCADA деңгейлері TIA Portal, PLCSIM және WinCC Runtime құралдарымен, интеграциялық және аналитикалық деңгей Python

бағдарламалау ортасымен, ал жылу желісінің термогидравликалық цифрлық моделі Fluidit Heat арқылы іске асырылды. Ұсынылған Software-in-the-Loop концепциясын UPPAAL ортасында формалды верификациялау.

Физикалық модельді тәуелсіз тексеру үшін MATLAB/Simulink/Simscape құралдары пайдаланылады. Жылу желісінің қалыпты және жоғары жүктемелі режимдері, параметрлердің өзгеруі, жылу шығындары және гидравликалық шектеулер имитациялық модельдеу арқылы зерттеледі.

Деректерді алдын ала өңдеу кезінде статистикалық сүзгілеу, интерполяция, масштабтау, корреляциялық талдау, жылжымалы терезе және белгілерді қалыптастыру әдістері пайдаланылады. Ауытқуларды анықтау үшін статистикалық шектер, модельдік қалдықтар, Isolation Forest, біркластық SVM, автоэнкодерлер және LSTM/GRU типіндегі уақыттық модельдерді салыстырмалы зерттеу көзделеді.

Зерттеудің **ғылыми жаңалығы** мынадай нәтижелермен анықталады:

1. Software-in-the-Loop контурында OPC UA-алмасу, Python-оркестрация синхрондылығы және UPPAAL ортасында ресми түрде верификацияланған Fluidit Heat термогидравликалық есебімен ерекшеленетін бағдарламалы-аппаратты гетерогенді координациялау тәсілі тупиктердің болмауы (deadlocks) мен уақытша шектеулерді қадағалау үшін дайындалды, ол квази нақты уақытта сценарийлердің орындалуын қамтамасыз етеді және ұсынылған шешімді ресми түрде уақытша дұрыстығы расталмайтын қолданыстағы simulation архитектура шешімінен ерекшелейді.

2. Жылу желісінің физика-математикалық моделінің (Fluidit Heat) және автоэнкодердің бірігуімен ерекшеленетін аномалияларды анықтаудың гибридті тәсілі әзірленді, ол белгіленген апаттық таңдаулар болмағанда метрологиялық істен шығулар (датчиктер дрейфі) мен технологиялық ақаулықтарды (ағып кету, қысым инверсиясы) бөлуге мүмкіндік береді. Data-driven (Isolation Forest, DBSCAN) тәсілдеріне қарағанда ұсынылатын әдісжалған іске қосулар жиілігін төмендететін кіріс белгі ретінде өлшеуіш және есептеу мәндерінінің арасында тұтқырлықты қолданады. Тәсілді таңдау салыстырмалы талдауға негізделген.

3. Орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесінің көздерінің арасында жылу жүктемесін тиімді тарату алгоритмі мен математикалық моделі әзірленген. Ол отын шығынын минимизациялаудың мақсатты қызметі тек жиілік жүктемені емес, әр қорек көзінің ПӘК ескеретін, сонымен қатар Fluidit Heat бағдарламасында есептелген таратылған желідегі гидравликалық шығындарды да ескеретіндігімен ерекшеленеді. Технологиялық шектеулерді қадағалаған кезде отынның қосынды шығыны минимал болған жағдайда бұл қорек көздеріндегі жүктемелер мен құбырдағы берілетін қысымның үйлесуін анықтауға мүмкіндік береді. Танымал тәсілдерге қарағанда оңтайландыру SIL-стендті жабық контурда орындалады, ол оларды нақты объектіде пайдаланғанша басқарушы әсерді верификациялауға мүмкіндік береді.

4. Температура шығыны, қысым бойынша ақаулықтарды бағалау саны мен MATLAB/Simulink/Simscape тәуелсіз моделі бар Fluidit Heat коммерциялық симулятордан ерекшеленетін жылу желісінің физикалық модельдерінің кросс верификациясының әдісі өңделген. Модельдің сенімдігі тек сапамен расталатын

қолданыстағы бар тәсілдерден ұсынылатын тәсілдің айырмашылығы оның отын шығынын оңтайландыру үшін модельдің жарамдылығының сандық бағасын қамтамасыз ететіндігі болып табылады.

Қорғауға шығарылатын негізгі ережелер.

1. Жылумен жабдықтау жүйесін автоматтандырылған басқару объектісі ретінде сипаттайтын және жылу энергиясы көзінен тұтынушыларға дейінгі физикалық әрі ақпараттық процестерді қамтитын құрылымдық-функционалдық моделі.

2. Бірнеше бағдарламалық қамтуды біріктіретін Software-in-the-Loop архитектурасы және оның компоненттері арасындағы деректер алмасу алгоритмдері.

3. Жылу-гидравликалық модель мен нақты немесе имитациялық өлшеулер арасындағы қалдықтарды талдау негізінде қалыпты режимнен ауытқуларды анықтау әдісі.

4. Жылу жүктемесін қамтамасыз ету, температура мен қысымның рұқсат етілген диапазондарын және жабдықтардың технологиялық шектеулерін сақтау кезінде отын тұтынуды азайту әдісі.

Жұмыстың ғылымды дамыту бағыттарына немесе мемлекеттік бағдарламаларға сәйкестігі. Диссертациялық жұмыстың негізгі зерттеу нәтижелері 2025-2027 жылдарға арналған «Жас ғалым» жобасы бойынша жас ғалымдарды гранттық қаржыландыруға арналған AP25795155 «Жасанды интеллект технологияларын қолданумен автоматтандырылған басқарудың және қаланы жылумен қамтамасыз етудегі аномалияларды талдаудың зияткерлік жүйесін әзірлеу» жобасын іске асыру барысында алынды.

Автордың жарияланымдары. Докторлық диссертация тақырыбына сәйкес орындалған зерттеулер нәтижелері бойынша 6 ғылыми жұмыстар жарияланды, олардың ішінде 1 жұмыс Scopus халықаралық деректер қорына кіретін басылымдарда, 5 жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған басылымдарда, 1 халықаралық конференция жинағында, сонымен қатар 2 куәлік және 1 пайдалы модельге патент алынды.

Диссертацияның құрылымы мен көлемі. Диссертациялық жұмыс кіріспеден, 4 бөлімдерден, қорытындыдан, 115 пайдаланылған дереккөздер тізімінен, 4 қосымшадан, 45 суреттен, 21 кестеден тұрады. Диссертациялық жұмыс мәтінінің жалпы көлемі – 117 бет.

1. ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНДА ЖЫЛУ ЭНЕРГЕТИКАСЫН ДАМЫТУДЫҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ МЕН АЛҒЫШАРТТАРЫ

1.1 Әлемдік жылу энергетикасының заманауи даму үрдістері

Жылу энергетикасы жылу энергиясын өндіру, түрлендіру, тасымалдау, бөлу және тұтыну үдерістерін қамтитын энергетикалық жүйенің маңызды саласы болып табылады. Оның құрамына электр және жылу энергиясын аралас өндіретін жылу электр орталықтары, қазандықтар, орталықтандырылған жылумен және салқындатумен жабдықтау желілері, өнеркәсіптік жылу қондырғылары, ғимараттардың жылыту жүйелері, жылу сорғылары мен энергия сақтау құрылғылары кіреді.

Қазіргі уақытта әлемдік жылу энергетикасы бір мезгілде бірнеше фактордың ықпалында дамуда. Олардың қатарына климаттың өзгеруін тежеу қажеттілігі, отын бағасының тұрақсыздығы, энергетикалық қауіпсіздік, урбандалу, ғимараттардың энергия тиімділігі, жаңартылатын энергия көздерінің таралуы және цифрлық технологиялардың дамуы жатады. Осы факторлардың жиынтығы жылумен жабдықтау жүйелерін дәстүрлі орталықтандырылған және отынға тәуелді инфрақұрылымнан төмен температуралы, көп көзді, икемді және интеллектуалды басқарылатын жүйелерге көшіруде.

Халықаралық энергетикалық агенттіктің мәліметі бойынша, 2024 жылы жылу энергиясын тұтыну әлемдегі түпкілікті энергия тұтынудың жартысына жуығын және энергетикамен байланысты көмірқышқыл газы шығарындыларының шамамен 37%-ын құрады. 2018–2024 жылдар аралығында әлемдік жылу тұтыну 6%-ға өскенімен, дәстүрлі биомассаны есептемегендегі заманауи жаңартылатын энергия көздерінің үлесі 2024 жылы небәрі 14%-ға жетті [4]. Бұл көрсеткіштер жылу секторын декарбонизациялау қарқынының электр энергетикасындағы өзгерістермен салыстырғанда баяу екенін көрсетеді.

Жылу тұтынудың елеулі бөлігі тұрғын және қоғамдық ғимараттарға тиесілі. UNEP пен GlobalABC бағалауы бойынша, ғимараттар және құрылыс секторы әлемдік энергия тұтынудың 32%-ын және көмірқышқыл газы шығарындыларының 34%-ын қалыптастырады. Париж келісімінен кейін ғимараттардың энергия сыйымдылығы төмендегенімен, нақты өзгеріс белгіленген мақсаттан айтарлықтай төмен болды. Сондықтан жылу өндіру көздерін ғана емес, ғимараттардың жылу қорғанысын, автоматты реттеу жүйелерін және тұтынушылардың мінез-құлқын да жетілдіру қажет [5].

Орталықтандырылған жылумен жабдықтау әлемдік жылу энергетикасының маңызды сегменті болып қала береді. Қазіргі кезде мұндай жүйелер 600 миллионнан астам адамға қызмет көрсетеді, ал жылу желілерінің жалпы ұзындығы бір миллион километрден асады. 2010 жылдан бері орталықтандырылған жүйелер арқылы берілетін жылу көлемі шамамен 35%-ға өскен. Сонымен бірге әлемдік орталықтандырылған жылу өндірісінің шамамен жартысы көмірге, үштен біріне жуығы табиғи газға негізделген, ал жаңартылатын энергия көздерінің үлесі шамамен 7%-ды ғана құрайды [6].

Бұл жағдай әлемдік жылу энергетикасында екі қарама-қарсы үрдістің бар

екенін көрсетеді. Бір жағынан, урбандалу мен халықтың өмір сүру деңгейінің жоғарылауы жылуға және салқындатуға сұранысты арттырады. Екінші жағынан, климаттық міндеттемелер мен энергетикалық қауіпсіздік қазба отынын пайдалануды азайтуды талап етеді. Сондықтан заманауи даму стратегиясы сұранысты төмендету, инфрақұрылымды жаңғырту және қалған жылу қажеттілігін төмен көміртекті энергия көздерімен қамтамасыз ету қағидаларына негізделеді.

1. Энергия тиімділігін арттыру және жылу сұранысын басқару. Әлемдік жылу энергетикасындағы бірінші және экономикалық тұрғыдан ең тиімді бағыт – жылу сұранысын азайту. Бұл бағыт ғимараттардың жылу оқшаулауын жақсартуды, терезелер мен инженерлік жүйелерді жаңартуды, жеке жылу пункттерін орнатуды, ауа райына тәуелді реттеуді және жылу энергиясын есепке алуды қамтиды.

Ғимараттардың энергия тиімділігін арттыру жылу көздерінің қуатын, желідегі су шығынын және отын тұтынуды төмендетеді. Сонымен қатар төмен температуралы жылумен жабдықтауға көшу үшін техникалық жағдай қалыптастырады. Егер ғимараттардың жылу шығыны жоғары болса, желідегі температураны күрт төмендету тұтынушыларға жеткілікті жылу бермеуі мүмкін. Сондықтан жылу желілерін жаңғырту ғимараттарды терможаңғыртумен, жылу алмастырғыштарды ауыстырумен және ішкі жылыту жүйелерін теңгерумен бірге жүргізілуге тиіс.

Заманауи жүйелерде сұранысты басқару тек жылдық энергия үнемдеуге емес, жүктеменің уақыт бойынша бөлінуіне де бағытталады. Тәуліктік шыңдарды төмендету үшін жылу желілерінің және ғимараттардың жылулық инерциясы, жылу аккумуляторлары, температуралық кестені оңтайландыру және тұтынушылардың икемді жүктемелері қолданылады.

2. Жылу өндірісін декарбонизациялау және энергия көздерін әртараптандыру. Дәстүрлі жылу энергетикасы көбіне көмір, табиғи газ және мұнай өнімдеріне негізделген. Қазіргі даму үрдісі бір ғана отын түріне тәуелді орталықтандырылған жүйеден бірнеше энергия көзін біріктіретін жүйеге көшуді көздейді. Мұндай жүйеде келесі көздер қатар пайдаланылуы мүмкін:

- күн жылу қондырғылары;
- геотермалдық энергия;
- тұрақты түрде өндірілген биомасса мен биогаз;
- өнеркәсіптік және коммуналдық қалдық жылу;
- ірі жылу сорғылары;
- электр қазандықтары;
- жылу электр орталықтары;
- маусымдық және қысқа мерзімді жылу сақтау құрылғылары.

IEA болжамы бойынша, жаңартылатын жылу энергиясын тұтыну 2025–2030 жылдары шамамен 42%-ға артуы мүмкін. Алайда бұл өсім жылуға деген жалпы сұраныстың өсуін толық өтемейді. Қазіргі саясат сақталса, жылу өндіруде қазба отынын тұтыну мен көмірқышқыл газының шығарындылары да өсуі ықтимал [4]. Демек, жаңартылатын көздерді енгізу энергия тиімділігі және сұранысты басқару шараларымен бірге орындалуы керек.

Жылу көздерін әртараптандыру энергетикалық қауіпсіздікті де жоғарылатады. Жергілікті геотермалдық энергияны, биомассаны немесе қалдық жылуды пайдалану импорттық отынға және оның бағасына тәуелділікті төмендетеді. Бірақ әрбір технологияның тиімділігі жергілікті климатқа, ресурстарға, желі температурасына, тұтынушылардың орналасуына және электр мен отын бағаларының арақатынасына байланысты анықталады.

3. Электрлендіру және жылу сорғыларының таралуы. Жылу секторын электрлендіру – қазіргі энергетикалық ауысудың негізгі бағыттарының бірі. Электр энергиясының құрамындағы жаңартылатын көздердің үлесі артқан сайын электр қазандықтары мен жылу сорғыларының көміртектік тиімділігі жоғарылайды. IRENA энергетикалық ауысудың негізгі тетіктері ретінде энергия тиімділігін, түпкілікті тұтынуды электрлендіруді және жаңартылатын электр энергиясын дамытуды атап көрсетеді [7].

Жылу сорғылары қоршаған ауада, топырақта, суда немесе өндірістік ағындарда жинақталған төмен әлеуетті жылуды жоғары температуралық деңгейге көтереді. 2024 жылы олар әлемдік жылу қажеттілігінің шамамен 5%-ын және ғимараттардағы кеңістікті жылыту қажеттілігінің 12%-ын қамтамасыз етті. Қазіргі уақытта жылу сорғылары негізінен ғимараттарда қолданылғанымен, өнеркәсіп пен орталықтандырылған жылу жүйелері олардың келесі негізгі қолданылу салалары болып есептеледі [8].

Технологиялық даму өнеркәсіптік жылу сорғыларының қолданылу температурасын кеңейтуде. Кейбір заманауи қондырғылар температурасы 200 °C-қа дейінгі технологиялық жылу қажеттілігін қамтамасыз ете алады. IEA болжамы бойынша, өнеркәсіптік үдерістерде электр энергиясының үлесі 2024 жылғы 4%-дан 2030 жылы 12%-ға дейін өсуі мүмкін [4].

Сонымен бірге жылу сорғыларын енгізу автоматты түрде энергия үнемдеуге кепілдік бермейді. Олардың тиімділігі төмен температуралы жылу көзінің болуына, желідегі температуралық графикке, электр энергиясының көміртектік құрамына, компрессордың жұмыс режиміне және электр мен газ бағасының арақатынасына байланысты. Сондықтан ірі жылу сорғыларын таңдау алдында термогидравликалық және техникалық-экономикалық модельдеу қажет.

4. Төмен температуралы 4-буын жылу желілеріне көшу. Төртінші буын орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелері – 4GDH – төмен температуралық режиммен, жаңартылатын және қалдық жылу көздерін біріктірумен, энергияны сақтаумен және интеллектуалды басқарумен сипатталады. Бұл тұжырымдамада жылу желісі электр, газ және жылу инфрақұрылымдарынан оқшау қарастырылмайды, керісінше, бірыңғай интеллектуалды энергетикалық жүйенің элементі ретінде қызмет етеді [9].

Желі температурасының төмендеуі:

- құбырлардағы жылу шығынын азайтады;
- жылу сорғыларының түрлендіру коэффициентін жоғарылатады;
- геотермалдық, күн және қалдық жылуды пайдалануды жеңілдетеді;
- кері су температурасын төмендетеді;
- жылу көздерінің пайдалы әсер коэффициентін арттырады.

Дегенмен төмен температуралық режимге көшу тек жылу көзін ауыстырумен шектелмейді. Құбырлар, сорғылар, абоненттік жылу пункттері, ғимараттардың жылыту аспаптары және автоматты реттегіштер бірлесіп жаңғыртылуы қажет. Ғылыми әдебиетте 4GDH үшін температураның бір ғана міндетті мәні белгіленбейді; нақты график климатқа, ғимараттардың сипаттамасына және санитарлық ыстық су талаптарына байланысты таңдалады.

5. Бесінші буын жылумен және салқындатумен жабдықтау жүйелері. Бесінші буын жүйелері 5GDH – бейтарап немесе қоршаған орта температурасына жақын режимде жұмыс істейтін, жылу мен салқындатуды бір желі арқылы қамтамасыз ететін жүйелер ретінде қарастырылады. Мұнда орталық желі дайын жоғары температуралы жылуды ғана жеткізбейді. Әрбір ғимараттағы немесе нысандағы жылу сорғысы желіден алынған жылудың температурасын қажетті деңгейге көтереді немесе артық жылуды қайтадан желіге береді.

5GDH жүйелерінің негізгі ерекшеліктері:

- жылу тасымалдағыш температурасының қоршаған орта температурасына жақын болуы;
- жылу шығындарының азаюы;
- жылудың екі бағытта берілуі;
- жылу мен салқындатуды бір уақытта қамтамасыз ету;
- өндіруші-тұтынушылардың пайда болуы;
- жергілікті қалдық жылуды тікелей пайдалану;
- ғимарат деңгейіндегі жылу сорғылары;
- орталықтандырылған және үлестірілген сақтау құрылғылары.

Еуропадағы қолданыстағы жүйелерге жүргізілген зерттеулер 5GDH желілерінің әртүрлі жергілікті жылу көздерін біріктіруге және тұтынушылар арасындағы жылу алмасуды ұйымдастыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді [10].

Алайда 5GDH барлық қолданыстағы желілер үшін 4GDH-ды міндетті түрде алмастыратын шешім емес. Жоғары температураға есептелген ескі ғимараттары бар қалаларда 4-буынға кезең-кезеңімен көшу тиімді болуы мүмкін. Ал жаңа аудандарда, кампустарда және жылыту мен салқындату сұранысы қатар жүретін нысандарда 5GDH тұжырымдамасының артықшылығы жоғары.

6. Қалдық жылуды және төмен әлеуетті ресурстарды пайдалану. Заманауи жылу энергетикасы «жылуды өндіру» моделінен «қолжетімді жылу ағындарын жинау және қайта пайдалану» моделіне ауысуда. Өнеркәсіп кәсіпорындары, деректерді өңдеу орталықтары, метрополитендер, кәріз сулары, тоңазытқыш қондырғылар және сутегі электролизерлері едәуір мөлшерде төмен температуралы жылу бөледі.

Әлемде температурасы 100 °C-тан төмен қалдық жылудың үлкен көлемі қоршаған ортаға шығарылуда. Төмен температуралы жылу желілері мен жылу сорғылары осы ресурсты тұрғын және қоғамдық ғимараттарды жылыту үшін пайдалануға мүмкіндік береді. IEA бағалауынша, деректерді өңдеу орталықтары тұтынған электр энергиясының басым бөлігі жылуға айналады, ал оның шамамен 70–80%-ын жылу сорғылары арқылы қайта пайдалануға болады [11].

Қалдық жылуды енгізудегі басты мәселе технологияның жоқтығы емес,

жылу көзі мен тұтынушының географиялық арақашықтығы, температуралардың сәйкестігі, маусымдық график және экономикалық жауапкершіліктің бөлінуі болып табылады. Сондықтан жылу ағындарының географиялық картасын әзірлеу және ықтимал көздерді температура, қуат, уақыт және қашықтық бойынша бағалау маңызды.

7. Жылу энергиясын сақтау және энергетикалық секторларды біріктіру. Электр энергиясын ұзақ мерзімге сақтау салыстырмалы түрде қымбат болғандықтан, артық жаңартылатын электр энергиясын жылуға түрлендіріп, жылу аккумуляторларында сақтау перспективалы шешім болып табылады. Жылу энергиясын сақтау жүйелері бірнеше сағаттық, тәуліктік немесе маусымдық режимде жұмыс істей алады.

Қысқа мерзімді аккумуляторлар қазандықтар мен жылу сорғыларының жүктемесін тегістейді және іске қосу санын азайтады. Маусымдық қоймалар жаз мезгілінде алынған күн жылуын немесе арзан электр энергиясынан өндірілген жылуды қысқы кезеңде пайдалануға мүмкіндік береді. IEA жылу сақтау жүйелерін айнымалы жаңартылатын энергияны интеграциялаудың және жылу жүктемесін сағаттар, күндер немесе маусымдар арасында ауыстырудың маңызды құралы ретінде қарастырады [6].

Электр энергетикасы мен жылумен жабдықтауды секторлық біріктіру кезінде жылу желісі электр жүйесіне икемділік қызметін ұсынады. Электр энергиясы артық және бағасы төмен кезеңде электр қазандықтары мен жылу сорғылары жылу өндіреді, ал электр жүктемесі жоғары кезде жылу аккумуляторындағы энергия пайдаланылады. Мұндай басқару жаңартылатын энергияның шектелуін азайтып, электр желісіндегі шыңдық жүктемені төмендетеді.

8. Цифрландыру, автоматтандыру және жасанды интеллект. Цифрландыру әлемдік жылу энергетикасының технологиялық өзгерістерін біріктіретін негізгі фактор болып табылады. Заманауи жылумен жабдықтау жүйесінде температура, қысым, су шығыны, жылу қуаты, сорғылардың жағдайы, клапандардың ашылу дәрежесі және тұтыну профильдері үздіксіз өлшенеді. Бұл деректер SCADA, БЛК, ақылды есептегіштер және өндірістік дерекқорлар арқылы жиналады.

Цифрландырудың негізгі қолданылу бағыттарына мыналар жатады:

- қысқа және орта мерзімді жылу жүктемесін болжау;
- температуралық график пен сорғылардың жұмысын оңтайландыру;
- гидравликалық теңгерімсіздікті анықтау;
- жылу шығынын және ағып кетуді бағалау;
- өлшеу құралдарының ақауларын анықтау;
- жабдықтың техникалық жағдайын болжау;
- тұтыну аномалияларын табу;
- диспетчерлік шешімдерді қолдау;
- отын шығынын минимизациялау.

Ақылды есептегіштер мен автоматты басқару жүйелері нақты уақыттағы ауа райы, тұтыну және электр нарығы туралы деректерді пайдаланып, жылу өндірісі мен сұранысын дәлірек сәйкестендіреді. Цифрлық егіз нақты жүйедегі температура, қысым және шығын мәндерін физикалық немесе деректерге

негізделген модельмен байланыстырып, басқару шешімдерін нақты объектіге жібермей тұрып тексеруге мүмкіндік береді [11].

Цифрлық егіздердің заманауи нұсқалары физикалық және деректерге негізделген модельдерді біріктіреді. Мысалы, гидравликалық кедергілерді нақты пайдалану деректері арқылы сәйкестендіру және нейрондық желі көмегімен жылу жүктемесін болжау есептік модельдің нақты желіге бейімделуін қамтамасыз етеді [12].

Жасанды интеллект модельдері дәстүрлі автоматиканы толықтырады, бірақ қауіпсіздік контурларын алмастырмауы тиіс. Басқару жүйесінде қысым, температура және жабдықтың жұмыс шектері БЛК деңгейіндегі детерминирленген алгоритмдермен қамтамасыз етіледі. Ал жасанды интеллект жүктемені болжау, аномалияларды анықтау және оңтайлы басқару параметрлерін есептеу үшін жоғарғы деңгейде қолданылғаны дұрыс.

Көпқазандықты жылу жүйелерінде машиналық оқытуға негізделген жүктеме болжамын модельдік-болжамдық басқарумен біріктіру отын шығынын және шығарындыларды азайту мүмкіндігін көрсеткен. Канададағы екі объектіде жүргізілген далалық зерттеулерде парниктік газдар шығарындылары тиісінше 1,3% және 2,8%-ға төмендеген [13].

Аймақтық ерекшеліктерге сай әлемдік жылу энергетикасының дамуы барлық аймақта бірдей емес. Солтүстік Еуропада орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелеріне биомасса, қалдық жылу, ірі жылу сорғылары және жылу аккумуляторлары белсенді енгізілуде. Исландияда геотермалдық энергия басым болса, Дания, Швеция және Финляндияда биомасса, қалдықтарды энергетикалық пайдалану және электрлендіру маңызды рөл атқарады.

Қытайда орталықтандырылған жылумен жабдықтау ауқымы өте үлкен және көмірге негізделген инфрақұрылымның үлесі жоғары. Сондықтан негізгі міндеттерге көмірді алмастыру, өнеркәсіптік қалдық жылуды пайдалану, ірі жылу сорғыларын енгізу және қолданыстағы желілерді жаңғырту жатады.

Шығыс Еуропа, Ресей, Орталық Азия және Кавказ елдерінде жоғары температураға есептелген, ұзақ уақыт пайдаланылған желілердің үлесі басым. Бұл аймақтар үшін бірден бесінші буын жүйелеріне өтуге қарағанда құбырларды, сорғыларды, есепке алу жүйелерін және жылу пункттерін кезең-кезеңімен жаңарту басым бағыт болып табылады.

Климаты жылы елдерде салқындатуға сұраныстың артуына байланысты орталықтандырылған салқындату жүйелері дамуда. Бұрын мұндай жүйелер негізінен Таяу Шығыста таралған болса, қазіргі уақытта олар Азия, Еуропа және Солтүстік Американың тығыз қоныстанған қалаларында да енгізіле бастады [6].

Заманауи технологиялардың көпшілігі техникалық жағынан қолжетімді болғанымен, оларды жаппай енгізуге бірқатар факторлар кедергі келтіреді:

1. Бастапқы инвестициялардың жоғары болуы және өтелу мерзімінің ұзақтығы;
2. Қолданыстағы желілердің тозуы және жоғары температуралық режимі;
3. Ғимараттардың энергия тиімділігінің төмендігі;
4. Электр мен қазба отыны бағаларының қолайсыз арақатынасы;
5. Нақты есепке алу және сенімді деректердің жеткіліксіздігі;

6. Жылу желісіне тәуелсіз өндірушілердің қосылу ережелерінің болмауы;
7. Білікті мамандар мен сервистік инфрақұрылымның тапшылығы;
8. Ақпараттық қауіпсіздік пен деректерге меншік мәселелері;
9. Тарифтік саясат пен халықтың төлем қабілеттілігі арасындағы қайшылық.

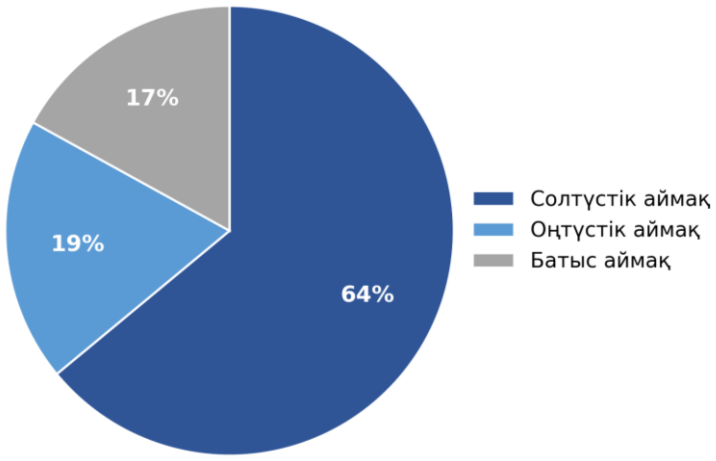
Осыған байланысты жылу энергетикасын жаңғырту жеке технологияларды орнату емес, техникалық, экономикалық, ақпараттық және институционалдық шараларды біріктіретін жүйелік міндет болып табылады.

1.2 Қазақстан жылу энергетикасының қазіргі жағдайы мен даму тенденциялары

Қазақстан аумағында жылу электр орталықтарында жылу және электр энергиясын құрама өндіруге негізделген орталықтандырылған жылумен жабдықтау 1930 жылдардың ортасында дами бастады. 1960-1990 жылдары ол елдің өнеркәсіптік дамыған қалаларындағы негізгі жылумен жабдықтау жүйесіне айналды [14].

Қазақстанның күрт континенттік климаты, жылыту кезеңінің ұзақтығы және қыс мезгіліндегі төмен температура жылу энергиясын өндіру, тасымалдау және тұтыну жүйелерінің сенімділігіне жоғары талап қояды. Сондықтан орталықтандырылған жылумен жабдықтаудың тұрақты жұмыс істеуі энергетикалық және әлеуметтік қауіпсіздікті қамтамасыз етудің маңызды шарты болып табылады.

Орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесіне жылу электр орталықтары, қазандықтар, магистральдық және таратушы жылу желілері, сорғы станциялары, жылу пункттері және тұтынушылардың жылу қабылдау қондырғылары кіреді. ЖЭО-лардың жиынтық жылу қуаты ел аумағында біркелкі орналаспаған (1.1-сурет).



Сурет 1.1 – ЖЭО жиынтық жылу қуатының аймақтар бойынша бөлінуі

Ескертпе: Диаграмма [15] дереккөз негізінде құрылған

Қазақстанның отын-энергетикалық теңгерімінде жылу энергиясы елеулі орын алады. Негізгі көрсеткіштер 1.1-кестеде берілген.

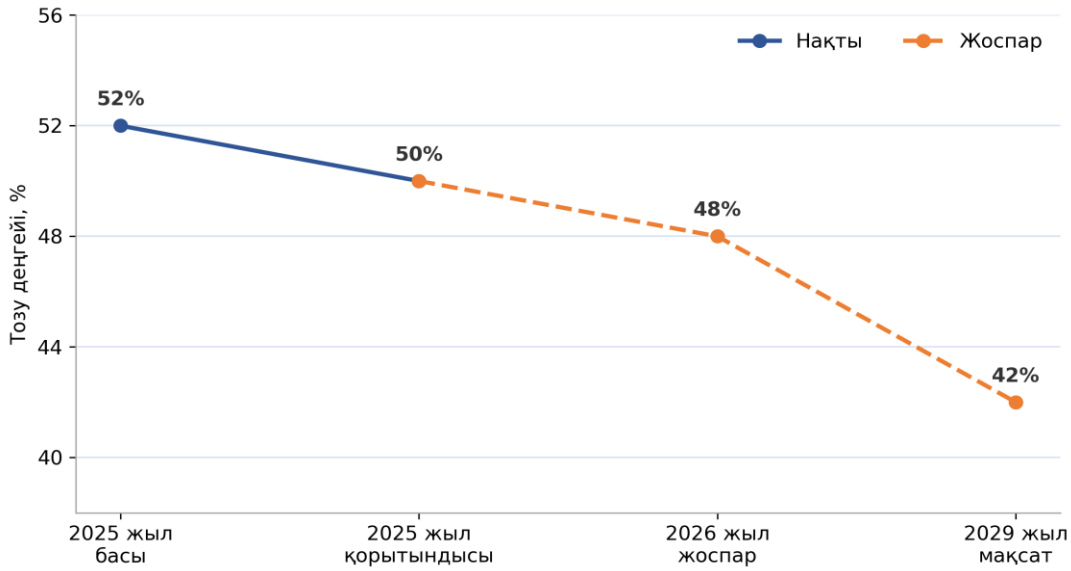
Кесте 1.1 – Қазақстандағы энергияны тұтынудың негізгі көрсеткіштері

№	Көрсеткіш	2024 жылғы мәні
1	Энергияны түпкілікті тұтыну	44 647,3 мың т мұнай эквиваленті
2	2023 жылмен салыстырғандағы өсім	2,9%
3	Тұрғын үй секторының түпкілікті тұтынудағы үлесі	36,5%
4	Жылу энергиясының түпкілікті тұтынудағы үлесі	16,9%
5	Бастапқы энергия тұтынудағы көмірдің үлесі	47,2%
6	Бастапқы энергия тұтынудағы табиғи газдың үлесі	33,1%

Ескертпе: Кесте [16] дереккөз негізінде құрылған.

Кестедегі көрсеткіштер тұрғын үй секторының жылу энергиясына сұранысы жоғары екенін және жылу энергетикасының көмір мен табиғи газға едәуір тәуелділігін көрсетеді.

Орталықтандырылған жылумен жабдықтаудың негізгі проблемаларының бірі - жылу көздері жабдықтары мен құбыр желілерінің физикалық тозуы. Жылу желілерін жөндеу және жаңғырту нәтижесінде олардың орташа тозу деңгейін біртіндеп төмендету көзделген (1.2-сурет).



Сурет 1.2 – Жылу желілерінің орташа тозу деңгейінің өзгеруі

Ескертпе: Диаграмма [17] дереккөз негізінде құрылған.

Жылу желілерін жаңғырту және энергетикалық жабдықтарды жөндеу жөніндегі негізгі көрсеткіштер 1.2-кестеде келтірілген.

Кесте 1.2 – Жылу инфрақұрылымын жөндеу және сенімділігін арттыру көрсеткіштері

№	Көрсеткіш	Мәні
1	Жылу желілерінің жалпы ұзындығы	13,4 мың км
2	2025 жылы жөнделген және реконструкцияланған желілер	323 км
3	2026 жылы жөндеу жоспарланған желілер	377 км
4	2029 жылға дейін жаңартылатын желілер	1,6 мың км
5	Күрделі жөндеуден өткен энергетикалық блоктар	10
6	Күрделі жөндеуден өткен қазандықтар	55
7	Күрделі жөндеуден өткен турбиналар	45
8	Технологиялық бұзушылықтар санының төмендеуі	27%
9	Температуралық кестені сақтамау жағдайларының төмендеуі	67%
10	«Қызыл» аймақтағы ЖЭО саны	19-дан 10-ға дейін төмендеді

Ескертпе: Кесте [17, 18] дереккөздер негізінде құрылған.

Желілердің тозуы құбырлардың зақымдануына, жылу тасымалдағыштың ағып кетуіне, қысымның төмендеуіне және жылу шығындарының артуына алып келеді. Гидравликалық кедергінің өсуі сорғы жабдықтарының электр энергиясын тұтынуын көбейтеді және температуралық кестені сақтау үшін қосымша отын жағуды талап етеді. Сондықтан желілердің техникалық жай-күйі жылумен жабдықтау сенімділігімен қатар отын тұтыну тиімділігіне де тікелей әсер етеді.

Саланы дамытудың құқықтық негізі 2024 жылғы 8 шілдеде қабылданған №120-VIII «Жылу энергетикасы туралы» Қазақстан Республикасының Заңымен күшейтілді [19]. Заң жылу энергиясын өндіру, тасымалдау, өткізу және тұтыну саласындағы қатынастарды реттейді, сондай-ақ объектілердің техникалық жай-күйін бақылауды, энергия тиімділігін арттыруды және мемлекеттік мониторингті күшейтуді қарастырады.

Жылумен жабдықтауды дамыту схемалары елді мекендердің бас жоспарларымен, тұрғын үй құрылысының көлемімен, халық санының өзгеруімен және өнеркәсіптің дамуымен өзара байланыста әзірленуге тиіс. Бұл жылу көздері мен желілерін болашақтағы жылу жүктемесін ескере отырып дамытуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар бірыңғай цифрлық мониторинг платформасын қалыптастыру көзделеді (1.3-кесте) [20].

Кесте 1.3 – Энергетикалық және коммуналдық секторларды жаңғырту ұлттық жобасының көрсеткіштері

№	Көрсеткіш	Жоспарлы мәні
1	Іске асыру кезеңі	2025-2029 жылдар
2	Инвестицияның жалпы көлемі	13 трлн теңге

1.3-кестенің жалғасы

3	Коммуналдық секторға бағытталатын қаражат	6,8 трлн теңге
4	Энергетикалық секторға бағытталатын қаражат	6,2 трлн теңге
5	Жөнделетін және жаңғыртылатын инженерлік желілер	84 мың км
6	Енгізілетін жаңа қуат	7 309 МВт
7	Салынатын және реконструкцияланатын генерациялау объектілері	27 объект
8	Желілік инфрақұрылым тозуының нысаналы деңгейі	40%
9	Апаттылықты төмендетудің нысаналы деңгейі	25%

Ескертпе: Кесте [21] дереккөз негізінде құрылған.

Жылумен жабдықтаудың энергия тиімділігін арттыру үшін ескірген қазандықтар мен турбиналарды ауыстыру, сорғыларда жиіліктік реттеуді қолдану, құбырлардың жылу оқшаулауын жақсарту, жеке жылу пункттерін және ауа райына тәуелді автоматты реттеу жүйелерін енгізу қажет. Мұндай шаралар жылу жүктемесіне сәйкес өндіріс пен тасымалдау режимдерін икемді басқаруға және артық отын шығынын төмендетуге мүмкіндік береді (1.4-кесте).

Кесте 1.4 – Жылу энергиясын есепке алу құралдарымен жабдықталу деңгейі

№	Аумақ немесе көрсеткіш	Жабдықталу деңгейі
1	Республика бойынша, 2024 жыл	74,1%
2	Республика бойынша, 2025 жыл	78,8%
3	Астана қаласы	99,9%
4	Батыс Қазақстан облысы	99,3%
5	Алматы қаласы	98,2%

Ескертпе: Кесте [22] дереккөз негізінде құрылған.

Есепке алу құралдарының санын көбейтумен қатар олардың метрологиялық тексерілуін, деректердің толықтығын және ақпараттың автоматты түрде жиналуын қамтамасыз ету қажет. Цифрландырудың келесі кезеңі SCADA жүйелерін, автоматтандырылған есепке алуды, геоақпараттық жүйелерді және аналитикалық бағдарламаларды бірыңғай ақпараттық ортаға біріктірумен байланысты.

Бұл ортада қалыптасатын температура, қысым, шығын, жылу жүктемесі, отын тұтыну және жабдық күйі туралы деректерді талдау үшін машиналық оқыту мен цифрлық егіз технологияларын қолдануға болады. Нақты өлшеулерді жылу желісінің термогидравликалық моделімен салыстыру датчиктердің дрейфін, жабдық өнімділігінің төмендеуін, гидравликалық кедергінің өзгеруін, жылу шығындарын және байланыс арналарының бұзылуын ерте анықтауға

мүмкіндік береді.

Сонымен бірге отындық құрылымды әртараптандыру үшін газдандыруды, артық өнеркәсіптік жылуды, жылу сорғыларын, биоотын қазандықтарын, жаңартылатын энергия көздерін және жылу жинақтау жүйелерін пайдалану қажет. Мұндай технологияларды орталықтандырылған жүйелерге қосу техникалық және экономикалық орындылық ескеріле отырып жүзеге асырылуы тиіс [19, 20].

Осылайша, Қазақстан Республикасындағы орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесінің қазіргі жай-күйі жылу желілері мен негізгі жабдықтардың жоғары тозуымен, отынға тәуелділікпен, жылу шығындарымен және автоматтандыру деңгейінің өңірлік айырмашылықтарымен сипатталады. Сонымен бірге салалық заңнаманың қалыптасуы, мемлекеттік жаңғырту бағдарламалары, инвестициялық тетіктер және цифрлық технологиялардың дамуы жылумен жабдықтау жүйесін жаңа сапалық деңгейге көшіруге мүмкіндік береді.

Жылумен жабдықтаудың болашақтағы дамуы тек құбырлар мен жабдықтарды ауыстырумен шектелмеуге тиіс. Техникалық жаңғырту автоматтандырылған мониторингпен, деректер сапасын бақылаумен, аномалияларды ерте анықтаумен, режимдерді болжаумен және отын тұтынуды оңтайландырумен бірге жүргізілгенде ғана тұрақты нәтиже береді. Сондықтан үлкен деректердегі ауытқуларды анықтау негізінде аудандық жылумен жабдықтау жүйесінің отын тұтынуын оңтайландыру әдістерін әзірлеу Қазақстанның жылу энергетикасын жаңғыртудың қазіргі міндеттерімен тікелей байланысты өзекті ғылыми бағыт болып табылады.

Жылытудың, желдетудің, ыстық сумен жабдықтаудың автоматты реттеу жүйесін (АРЖ) енгізу жылу энергиясын үнемдеудің негізгі тәсілі болып табылады. Автоматты реттеу жүйесін жеке жылу пунктерінде орнату тұрғын үй секторында 5-10%, ал әкімшілік ғимараттарда 40% жылу тұтынуды төмендетеді. Көктемгі-күзгі жылыту маусымында орталық жылу пунктерінің автоматикасы өзінің қызметтерін толық көлемде орындамайтын кезде тиімді реттеу есебінен ең үлкен әсер алынады. Тәулік ішінде сыртқы температураның төмендеуі айтарлықтай өзгергендегі климаттық жағдайларда жылытудың, желдетудің және ыстық сумен жабдықтаудың автоматты реттеу жүйелерін енгізу анағұрлым өзекті болады (1.5-кесте).

Кесте 1.5 – Орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелерінде автоматты басқару қадамдары

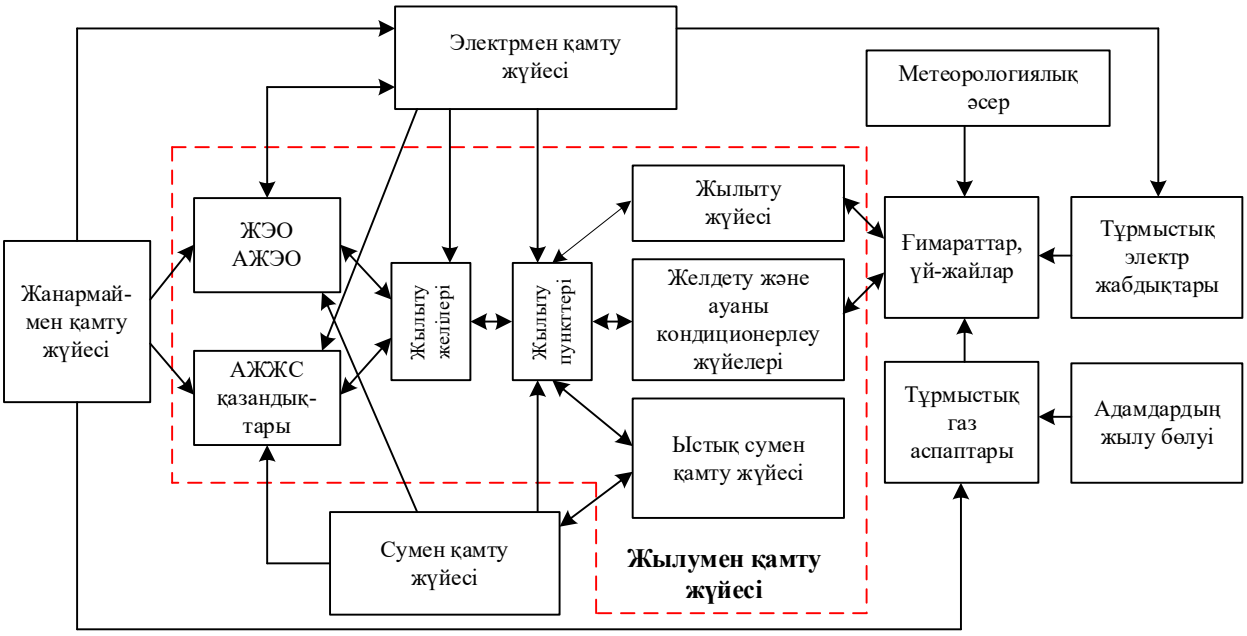
Қадам дар	Басқару қадамдары	Басқарудың орындалу орны	Басқару объектісі
I	Орталықтан дырылған	Қазандық, ЖЭО	Жылумен жабдықтау жүйесі, магистральді жылу желілері
II	Аудандық	Бақылау тарату пункті	Жылумен жабдықтау ауданы, ауданның таратылатын жылу желілері
III	Топтық	Орталық жылу пункті	Ғимараттар тобын жылумен жабдықтау, орамішілік жылу желілері

1.5-кестенің жалғасы

IV	Жергілікті	Дербес жылу пункті	Бір ғимараттың немесе ғимарат бөлімін жылумен жабдықтау жүйесі
V	Аймақтық	Дербес жылу пункті	Жылыту және желдету жүйелерінің дербес тармақтары, ғимараттардың дербес аймақтары
VI	Дербес	Жылыту аспабы	Жеке жылытылатын ғимарат

Бұл кезде өндірістегі және жылу энергиясының таратылған шығындар жылу көздері мен электрнергетикалық жүйесінің арасындағы өзара байланыстарды ескере отырып, сонымен қатар жергілікті орындарды, өндірістік тораптарды, жеке ғимараттарды түрлі инженерлік қамту жүйелерінің арасындағы жоғалулар минимал болуы керек.

Жалпы қалалардың жылумен жабдықталу жүйесінің құрылымы өте күрделі болып келеді, олардың басқа қалалардағы және өндірістік кешендердің инженерлік қамту жүйелерімен сыртқы функционалдық байланысы бар (1.3-сурет).

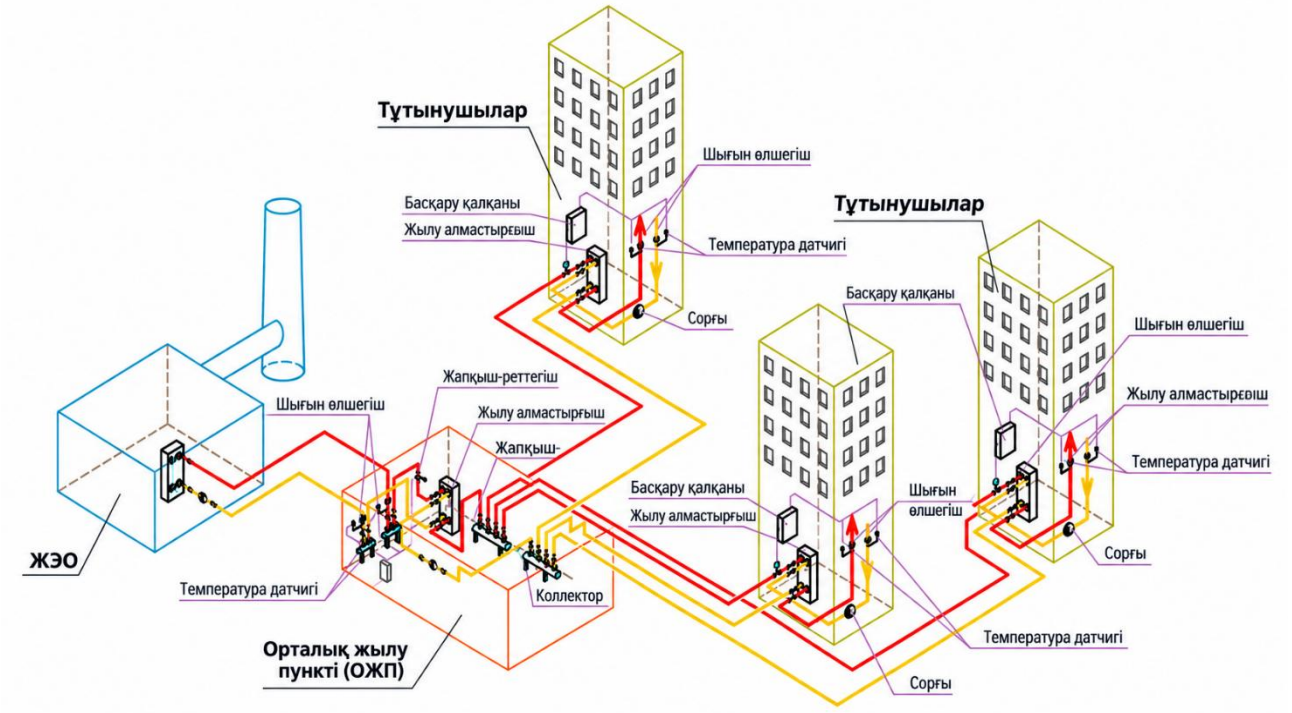


Сурет 1.3 – Қалаларды инженерлік қамтудың басқа жүйесімен жылумен жабдықтау жүйесінің функционалдық байланысы сұлбасы

Суреттен көрініп тұрғандай жылумен жабдықтау жүйесі қаланы тиімді басқару мен жұмыс істеуі үшін бірнеше басқа инженерлік қамту жүйелерімен байланысады. Мұндай құрылым үлкен деректердегі аномалияларды анықтау негізінде ауданның жылумен жабдықтау жүйесінің энергия жоғалуын оңтайландыруға мүмкіндік бермейді.

1.4-суретте температуралық датчиктері жалғанған қаланы жылумен

жабдықтауды ұйымдастырудың жалпы құрылымы көрсетілген. Температура датчиктері жылумен жабдықтау жүйесінің ағындағы температурасын анықтап және реттеуге мүмкіндік береді.

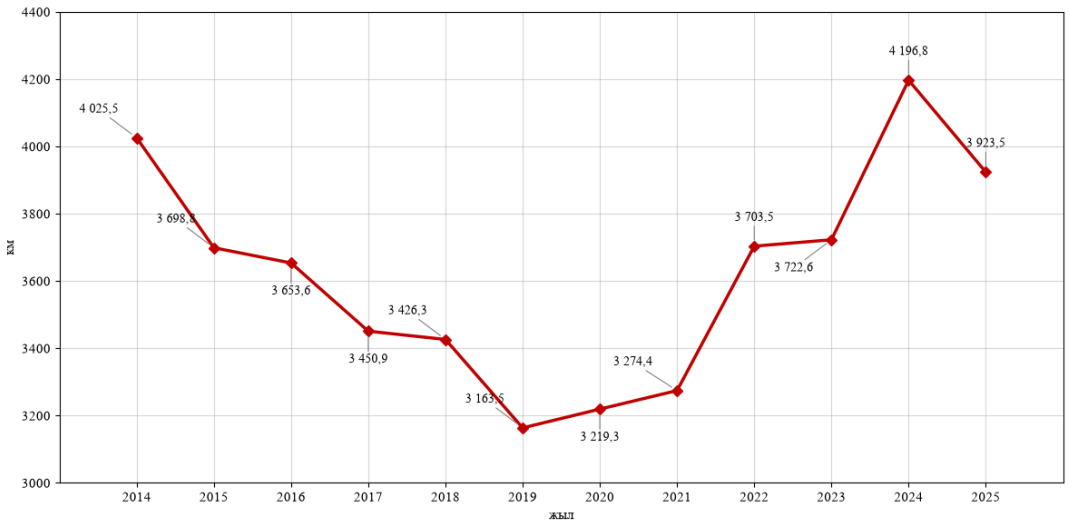


Сурет 1.4 – Жылумен жабдықтау жүйесінің жалпы құрылымы

Жылуландыруды тиімді дамыту көптеген маңызды халық шаруашылық және әлеуметтік мәселелерді шешуге ықпал етеді, мысалы, энергетикалық өндірістің жылулық және жалпы экономикалық тиімділігін арттыру. Мәселен, отынды үнемдеуден басқа, жылуландыру жылумен жабдықтауды жергілікті отынның төмен сортты түрлеріне ауыстыруға, жылу шаруашылығына күрделі және материалдық шығындарды азайтуға, тұрғын-коммуналдық және өнеркәсіптік кешендерді үнемді және сапалы жылумен және электрмен жабдықтауды қамтамасыз етуге, жылу шаруашылығындағы еңбек шығындарын және тұтастай алғанда энергетикалық шаруашылық бойынша пайдалану шығыстарын азайтуға мүмкіндік жасайды.

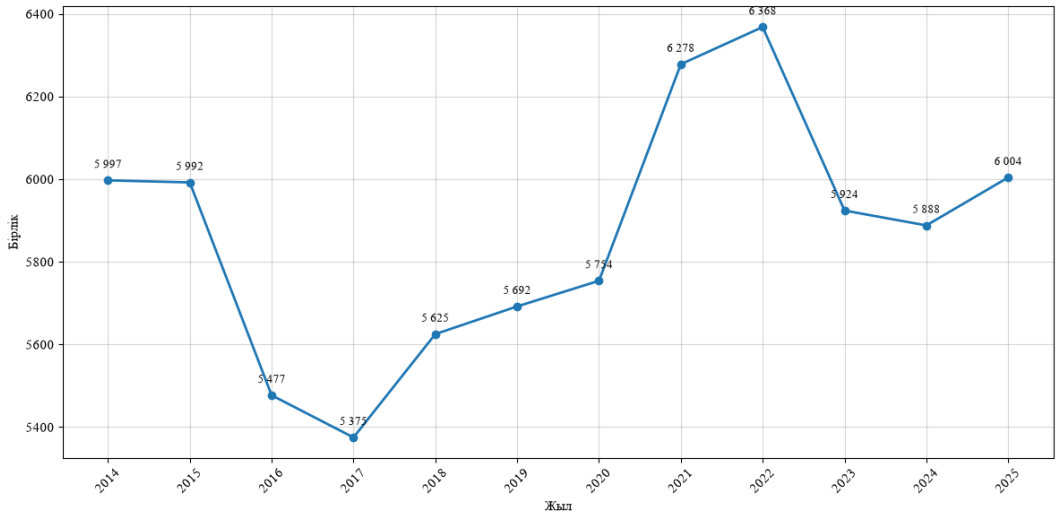
1.3 Жылу энергиясын өндіру, беру және тұтыну көрсеткіштерін статистикалық талдау

Қазақстан Республикасы Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігінің Ұлттық статистика бюросы дереккөздеріне сай [16] еліміздің жылу энергетикасы саласы бойынша статистикалық талдаулар келтірілген. 1.5-суретте ел аумағы бойынша шақырымға шаққандағы жаңалауға мұқтаж жылу және бу желілірінің ұзындығы келтірілген. Диаграмма көрсеткіші соңғы жылдары жылыту құбырларының тозу үрдісі артып келе жатқанын көрсетеді.



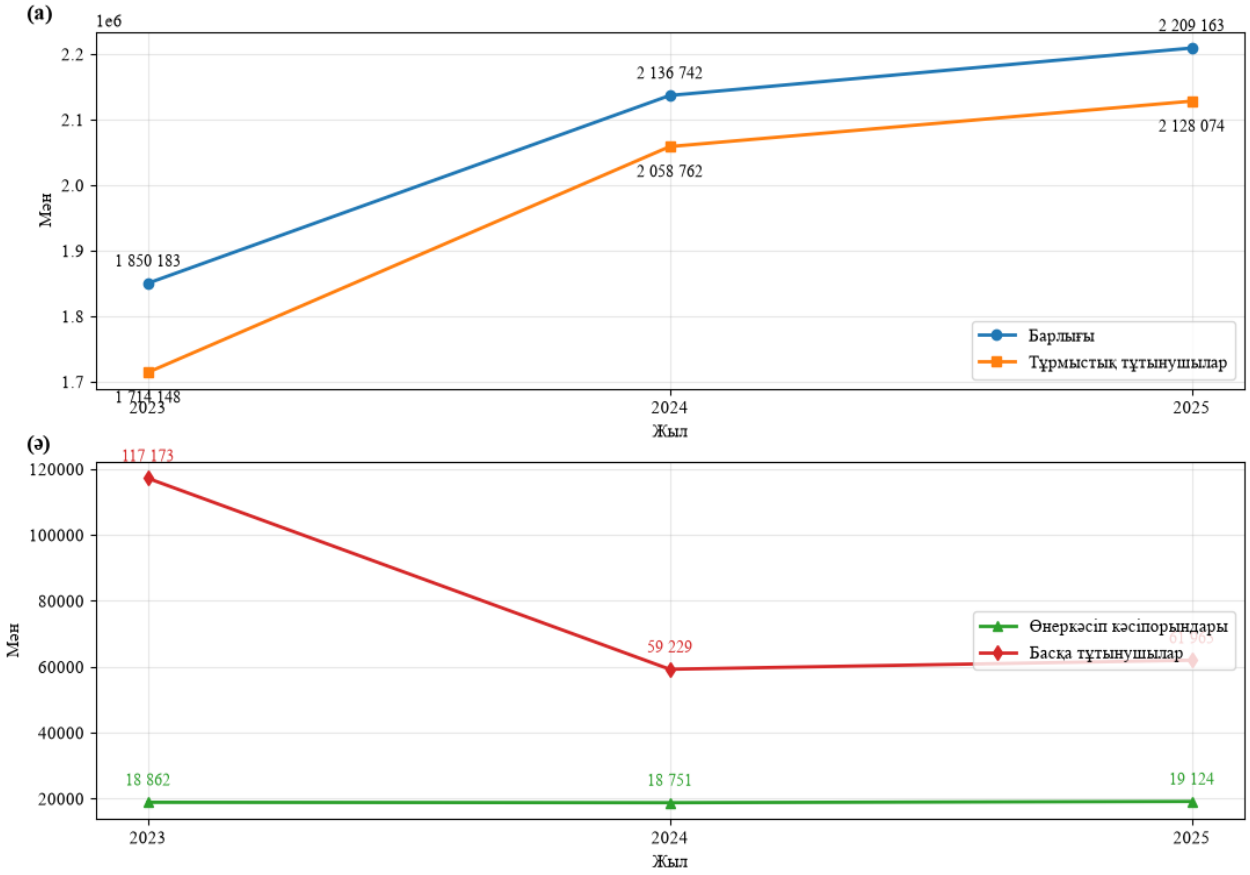
Сурет 1.5 – Жаңалауға мұқтаж жылу және бу желілірінің ұзындығы, км

1.6-суретте республика бойынша 2014 жылдан бері қарай орнатылған қазандықтардың (энергия қондырғылары) саны келтірілген. 2014-2017 жылдары орнатылған қазандықтар саны 5997-ден 5375 бірлікке дейін төмендеген. Кейін көрсеткіш біртіндеп өсіп, 2022 жылы ең жоғары мәнге – 6368 бірлікке жеткен. 2023-2024 жылдардағы төмендеуден кейін 2025 жылы қазандықтар саны 6004 бірлікке дейін қайта өскен, яғни жалпы кезеңде көрсеткіш айтарлықтай өзгермегенімен, оның динамикасы тұрақсыз болған.



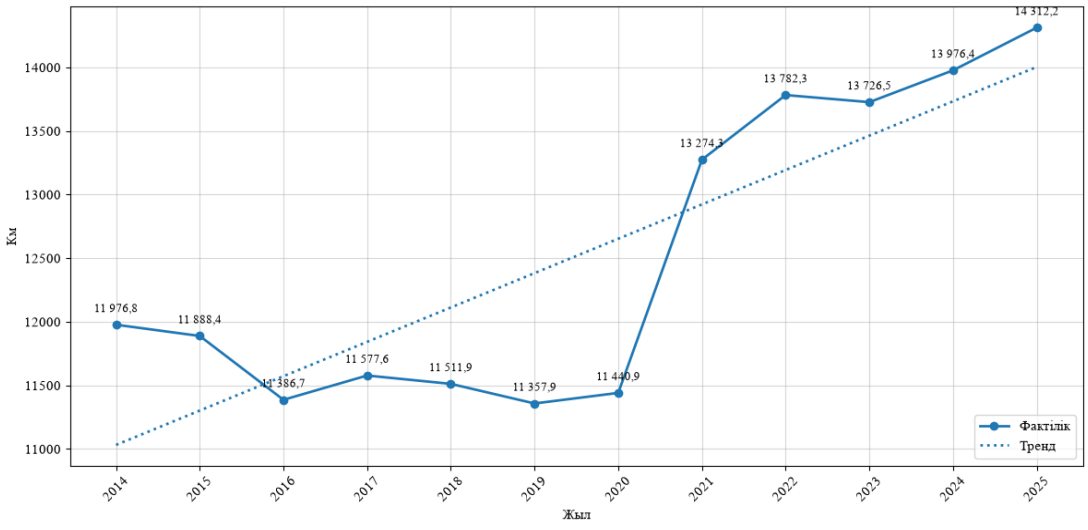
Сурет 1.6 – Орнатылған қазандықтардың (энергия қондырғылары) саны, бірлік

1.7-суретте жылыту желілеріне қосылған абоненттер саны көрсетілген. Жылу желілеріне қосылған абоненттердің жалпы саны 2023 жылғы 1 850 183 бірліктен 2025 жылы 2 209 163 бірлікке дейін, яғни шамамен 19,4%-ға өскен. Өсім негізінен тұрмыстық тұтынушылар санының 1 714 148-ден 2 128 074 бірлікке дейін артуымен қамтамасыз етілген. Өнеркәсіптік кәсіпорындар саны шамамен 19 мың деңгейінде тұрақты болса, басқа тұтынушылар саны 2024 жылы едәуір төмендеп, 2025 жылы 61 965 бірлікке дейін аздап өскен.



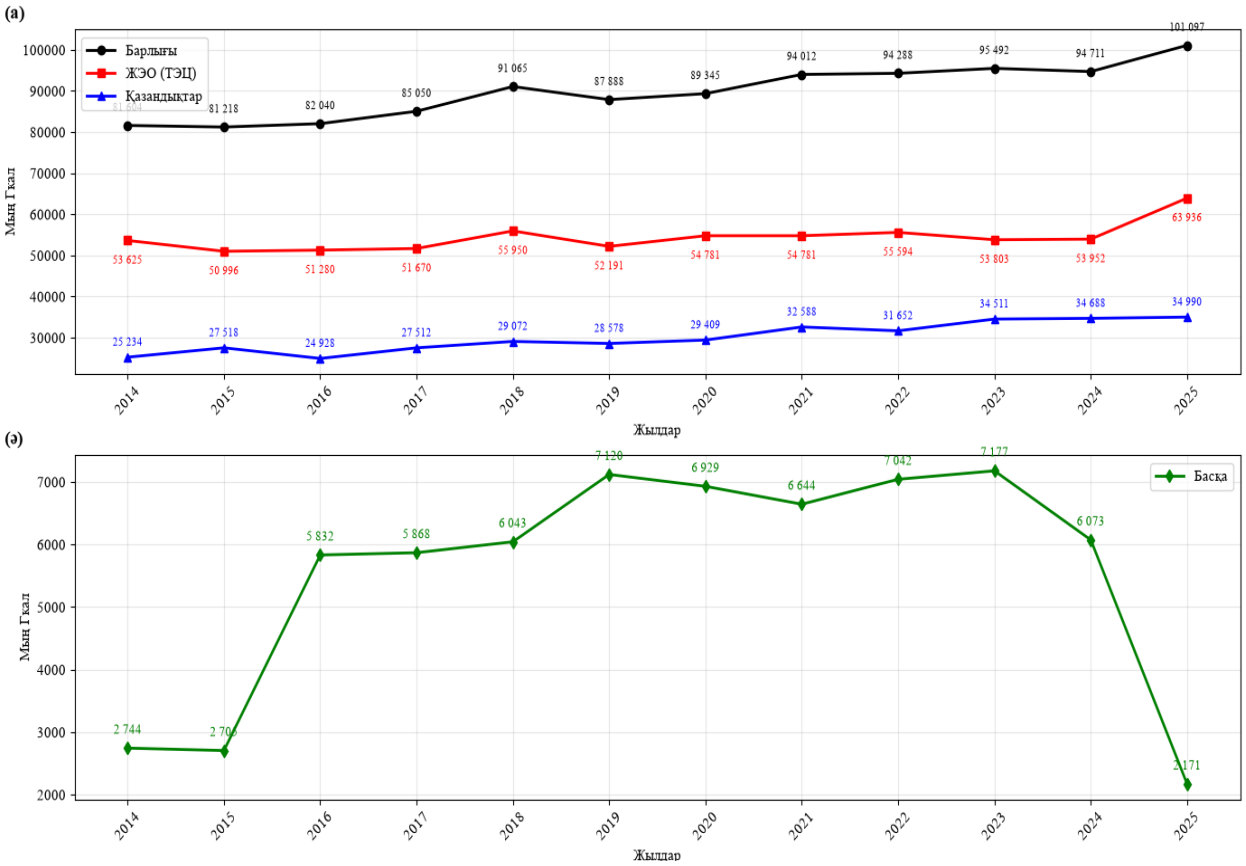
Сурет 1.7 – Жылыту желілеріне қосылған абоненттер саны, бірлік

1.8-суретте жылу және бу желілірінің ұзындығы келтірілген. 2014-2020 жылдары жылу және бу желілерінің ұзындығы 11,4-12,0 мың км аралығында өзгеріп, салыстырмалы түрде тұрақты болған. 2021 жылдан бастап желілер ұзындығы күрт өсіп, 13 274,3 км-ге жеткен және кейінгі жылдары өсу үрдісі сақталған. 2025 жылы көрсеткіш 14 312,2 км құрап, 2014 жылмен салыстырғанда шамамен 19,5%-ға артқан.



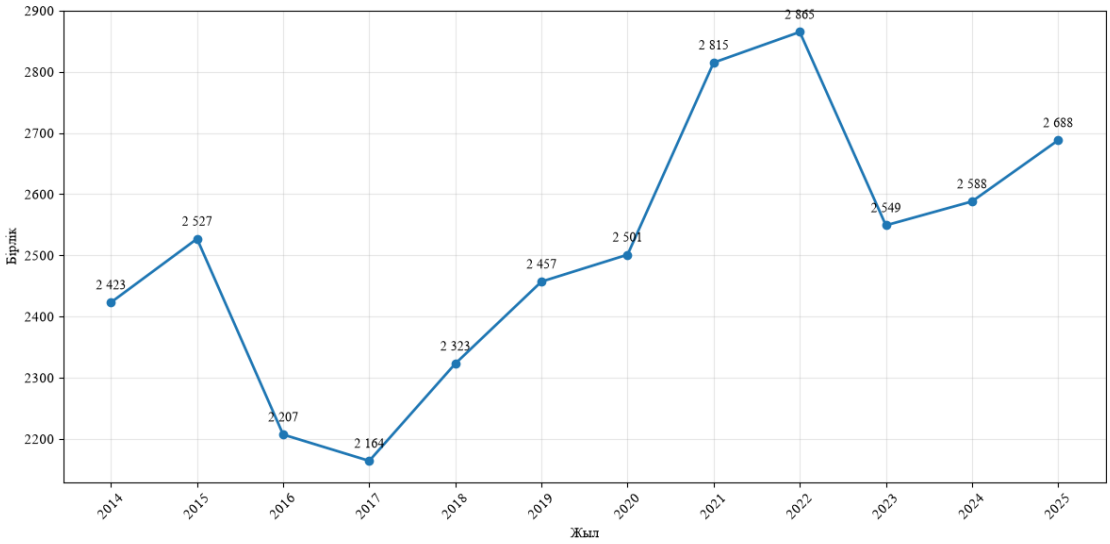
Сурет 1.8 – Жылу және бу желілірінің ұзындығы, км

1.9-суретте жылумен қамту көздерімен бу және ыстық судың жалпы өндірісі шамасы көрсетілген. 2014-2025 жылдары бу мен ыстық су өндірісінің жалпы көлемі ауытқуларға қарамастан өсу бағытын көрсеткен. 2015 жылғы 81 218 мың Гкал-дан өндіріс көлемі 2025 жылы 101 097 мың Гкал-ға дейін артып, қарастырылған кезеңдегі ең жоғары мәнге жеткен. Негізгі үлес ЖЭО-ларға тиесілі: олардың өндірісі 2025 жылы 63 936 мың Гкал-ды құраған, ал қазандықтардағы өндіріс салыстырмалы түрде бірқалыпты өсіп, 34 990 мың Гкал-ға жеткен. Басқа жылу көздерінің үлесі 2025 жылы 2171 мың Гкал-ға дейін айтарлықтай төмендеген.



Сурет 1.9 – Жылумен қамту көздерімен бу және ыстық судың жалпы өндірісі (мың Гкал)

1.10-суретте жылумен жабдықтау көздері туралы диграмма келтірілген. 2014–2017 жылдары жылумен жабдықтау көздерінің саны 2423-тен 2164 бірлікке дейін азайған. 2018 жылдан бастап өсу байқалып, көрсеткіш 2022 жылы ең жоғары деңгейге – 2865 бірлікке жеткен. 2023 жылғы төмендеуден кейін қайта өсу қалыптасып, 2025 жылы жылумен жабдықтау көздерінің саны 2688 бірлікті құраған.



Сурет 1.10 – Жылумен жабдықтау көздері, бірлік

Орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелерінің тиімділігін арттыру қазіргі уақытта жылу энергетикасы, автоматтандыру және басқару салаларындағы өзекті ғылыми бағыттардың бірі болып табылады. Мұндай жүйелердің жұмыс режимі сыртқы ауа температурасына, тұтынушылардың жылу жүктемесіне, ғимараттардың жылу инерциясына, жылу желісіндегі қысым мен температураға, құбырлардың техникалық жағдайына және жылу өндіруші жабдықтың пайдалы әсер коэффициентіне тәуелді. Осы параметрлердің өзара байланысы мен уақыт бойынша өзгеруі жылу жүктемесін дәл болжауды, технологиялық ауытқуларды уақтылы анықтауды және отын шығынын оңтайлы басқаруды күрделі көппараметрлі міндетке айналдырады.

Халықаралық тәжірибеде жылумен жабдықтау жүйелерін цифрландыру датчиктерді, интеллектуалды есепке алу аспаптарын, SCADA жүйелерін, цифрлық егіздерді, машиналық оқыту алгоритмдерін және болжамдық басқару әдістерін бір ортада біріктіруге негізделеді. Халықаралық энергетикалық агенттіктің аудандық жылыту және салқындату жүйелерін цифрландыру жөніндегі нұсқаулығында деректерді үздіксіз жинау, жылу жүктемесін болжау, жұмыс режимдерін автоматты түрде түзету және ақауларды ерте анықтау желінің тиімділігі мен сенімділігін арттырудың негізгі құралдары ретінде қарастырылады [23]. Сонымен қатар, цифрландыру нәтижесі өлшеу деректерінің сапасына, әртүрлі ақпараттық жүйелердің өзара үйлесімділігіне және математикалық модельдердің нақты объектіге сәйкестігіне тәуелді екені көрсетілген.

Қазақстанда бұл мәселенің өзектілігі жылу желілерінің тозуы, энергия шығындарының жоғары болуы, есепке алу жүйелерінің жеткіліксіздігі және технологиялық деректердің әртүрлі ақпараттық платформаларда бытыраңқы сақталуымен байланысты. Қазақстан Республикасының энергетикалық және коммуналдық секторларын жаңғырту жөніндегі ұлттық жобада жылу энергиясын есепке алуды автоматтандыру, температура мен қысымды нақты уақыт режимінде бақылау, телеметриялық деректерді бірыңғай ақпараттық

ортада біріктіру және Big Data негізінде ресурстарды тұтынуды болжау міндеттері белгіленген [24]. Құжатта деректерді жеткіліксіз интеграциялау энергия мен қаржы шығындарының артуына және технологиялық режимдерді жедел басқару мүмкіндігінің төмендеуіне әкелетіні атап көрсетіледі.

Қазақстан Республикасының «Жылу энергетикасы туралы» Заңында жылу энергетикасы объектілерінің деректерін жинау, өңдеу, мониторингтеу және талдауға арналған бірыңғай мемлекеттік цифрлық жүйе қарастырылған. Сондай-ақ жылу энергиясын ұтымды пайдалану, жылу шығындарын азайту, нақты көрсеткіштерді бақылау және белгіленген технологиялық режимдерден ауытқуларды анықтау саланы басқарудың негізгі қағидаттарына жатқызылған [25]. Осы талаптар жылумен жабдықтау жүйелерінде үлкен деректерді талдау, ауытқуларды анықтау және басқарушы әсерлерді қалыптастыру әдістерін әзірлеудің практикалық қажеттілігін дәлелдейді.

Жылу желісінің жұмысын бағалау үшін физикалық және деректерге негізделген модельдерді біріктіретін цифрлық егіз технологиялары кеңінен қолданылуда. Мысалы, жылу жүктемесін болжау және гидравликалық кедергіні сәйкестендіру негізінде әзірленген цифрлық егіз моделінде адаптивті бөлшектер тобы алгоритмі мен нейрондық желі қолданылған. Нәтижесінде зерттелген жылу пункттерінің шамамен 80%-ында дәстүрлі механикалық модельмен салыстырғанда модельдеу қателігі төмендеген [26]. Бұл нәтижелер физикалық заңдылықтарға негізделген модельді тарихи және ағымдағы деректер бойынша бейімдеу нақты желідегі гидравликалық және жылулық режимдерді дәлірек сипаттауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Ауытқуларды анықтаудың модельдік тәсілдерінде нақты өлшенген параметрлер мен қалыпты режим үшін есептелген мәндердің айырмасы, яғни қалдық сигнал қолданылады. Осы қағида бойынша құбырлардағы жылу шығынының ұлғаюын, қысымның қалыптан тыс төмендеуін және жылу тасымалдағыштың ағып кетуін анықтайтын диагностикалық әдістер әзірленген [27]. Деректерге негізделген тәсілдердің бірінде қалыпты жұмыс режимін сипаттау үшін сыртқы кірістері бар сызықтық емес авторегрессиялық нейрондық желі – NARX қолданылған. Модель нақты және болжамды температура, қысым және массалық шығын арасындағы айырманы талдау арқылы жеке және бір мезгілде пайда болатын бірнеше ақауды анықтауға мүмкіндік берген [28].

Цифрлық егіз негізіндегі басқа зерттеуде тарихи өлшеулер мен модель нәтижелерінің қалдықтары бойынша қалыпты жұмыс шекаралары белгіленіп, анықталған ақаулар олардың маңыздылығы бойынша реттелген [29]. Мұндай тәсіл бір ғана шекті мәннен асып кетуді тіркеумен шектелмей, ауытқудың пайда болу ықтималдығын және жүйеге ықпалын бағалауға мүмкіндік береді. Дегенмен, әдістің дәлдігі цифрлық егіздің сапасына, датчиктердің орналасуына және қарастырылатын режимдердің толықтығына тікелей тәуелді.

Жылумен жабдықтау жүйелеріндегі машиналық оқытуды практикалық қолдануды шектейтін негізгі мәселелердің бірі – нақты ақаулар туралы таңбаланған деректердің аздығы. Даниядағы тұрғын ғимараттардың жылу пункттері бойынша жүргізілген зерттеуде 158 ақау туралы есеп пен интеллектуалды жылу есептегіштерінің деректері біріктірілген. Нәтижелер

ақауларды уақтылы анықтау тұтынушылардың энергия тұтынуын орта есеппен 14%-ға дейін төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті [30]. Жылу пункттерінің сервистік деректеріне негізделген кейінгі зерттеулерде машиналық оқыту модельдері ақаулардың белгілі бір бөлігін тұтынушы хабарлағанға дейін бірнеше күн бұрын анықтай алатыны көрсетілген [31]. Бұл болжамдық техникалық қызмет көрсету әдістерінің әлеуетін дәлелдейді, алайда әртүрлі өндірушілердің жабдықтары, деректер құрылымдары және пайдалану жағдайлары модельдерді бір объектіден екіншісіне тікелей көшіруді қиындатады.

Жылу жүктемесі маусымдық және тәуліктік сипатқа ие болғандықтан, қалыпты жұмыс режимінің өзі тұрақты болмайды. Сыртқы температураның төмендеуі, тұтыну кестесінің өзгеруі немесе желінің жаңа режимге ауысуы параметрлердің заңды түрде өзгеруіне әкеледі. Егер ауытқуларды анықтау алгоритмі осы факторларды есепке алмаса, қалыпты өтпелі режим технологиялық ақау ретінде қате жіктелуі мүмкін. Сонымен қатар, датчиктің ығысуы, сигналдың қатып қалуы, байланыстың үзілуі және өлшеу шуы технологиялық жабдықтағы нақты ақаудан ажыратылуы тиіс. Сондықтан температура, қысым, шығын, жылу қуаты және отын шығыны бойынша көпөлшемді уақыттық қатарларды бірлесіп талдайтын, физикалық шектеулерді және режимдік контексті ескеретін гибридті әдісті қолдану орынды.

Ауытқуды анықтау өздігінен отын үнемдеуді қамтамасыз етпейді. Диагностикалық нәтиже басқару жүйесінде нақты шешімге – жылу көзінің қуатын, беру құбырындағы температураны, дифференциалдық қысымды, сорғының айналу жиілігін немесе жылу жүктемесінің көздер арасында бөлінуін өзгертуге түрлендірілуі тиіс. Модельдік-болжамдық басқару әдістерінде болашақ жылу жүктемесі мен технологиялық шектеулер ескеріліп, жылу ағындары мен желідегі массалық шығындар оңтайландырылады [32]. Просьюмерлері, жинақтау құрылғылары және екі бағытты ағындары бар желі үшін жүргізілген сандық зерттеуде экономикалық модельдік-болжамдық басқару ережелік реттеумен салыстырғанда пайдалану шығындарын 9%-ға дейін азайтқан [33]. Бұл нәтиже болжамдық модельдерді оңтайландыру алгоритмдерімен біріктірудің тиімділігін көрсетеді, бірақ нақты жылумен жабдықтау объектісінде қауіпсіздік шектеулерін, байланыс кідірістерін және өлшеу қателіктерін қосымша ескеру қажет.

Осылайша, қазіргі зерттеулерде цифрлық егіздер, машиналық оқыту және болжамдық басқару әдістері жеке-жеке жеткілікті деңгейде дамығанымен, нақты жылу желісінің деректерін, автоматтандырылған басқару жүйесін, термогидравликалық модельді, ауытқуларды анықтау алгоритмін және отын тұтынуды оңтайландыру модулін бірыңғай бағдарламалық контурда біріктіру мәселесі толық шешілмеген. Әсіресе анықталған ауытқудың түрі мен маңыздылығын басқарушы әсерді есептеу кезінде пайдалану, жалған дабылдарды азайту және ұсынылған шешімдерді нақты жабдыққа жібермей тұрып қауіпсіз бағдарламалық ортада тексеру маңызды.

2. ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУДЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІ ЖӘНЕ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗ АРХИТЕКТУРАСЫН ӨҢДЕУ

2.1 Басқару жүйесінің Software-in-the-Loop концепциясын өңдеу

Жылумен жабдықтау қалалық инфрақұрылымның маңызды компоненті болып табылады. Ғимараттар энергия тұтынудың әлемдік үлесі бойынша 30-45 % құрайды, бұл көлемнің 50-70 % жылтуға жұмсалады [1].

Статистикалық деректерге сәйкес гидравликалық және тарату желілеріндегі жылу теңгерімсіздігінен туындаған шығындар жылу энергиясының жалпы көлемінің 20 % дейін жетуі мүмкін. Ол жылу энергиясы орталықтандырылған жылуменжабдықтау жүйелерінде өңделеді [2]. Бұл жылуменжабдықтауды басқарудың ұлттық жүйелерінің жылудың тең емес таратылуы, жоғары энергошығындар, сонымен қатар пайдалану ақаулықтарын анықтау мен жою күрделілігі есепке алғанда басқа да бірқатар мәселелері бар екендігімен түсіндіріледі. Сол себепті интеллектуалды басқару жүйесін енгізу м.мкіндігін қарастыру қажет [3].

«Қазақстан Республикасының 2023-2029 жылдарға арналған жылу-энергетикалық кешенінің даму концепциясында» жылумен жабдықтау саласының негізгі мәселелері белгіленген [4]. Ал 2.1-кестеде Қазақстанның жылу генерациялаушы қуат күйін сипаттайтын негізгі көрсеткіштері келтірілген [5].

Кесте 2.1 – Жылу генерациялаушы қуат күйін сипаттайтын негізгі көрсеткіштері

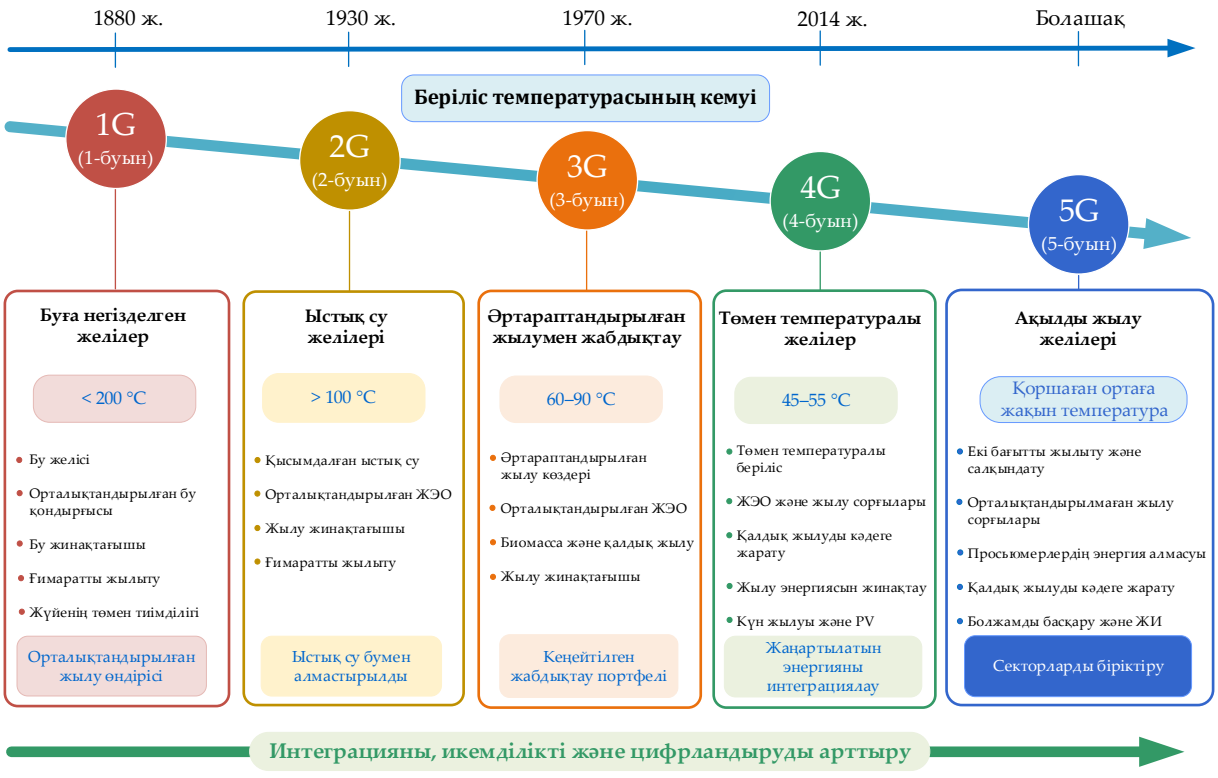
№	Көрсеткіш	Мәні
1	Аралас өндіріс станцияларындағы жылу мен электр энергиясының жалпы саны	37
2	Қазандықтардың саны	6004
3	Желілердің жалпы ұзындығындағы алмастыруды талап ететін желі үлесі	27,4 %
4	Екі құбырлы есептеу кезіндегі жылу және бу желілерінің ұзындығы	14 312,2 км
5	Құрылғының оташа тозуы	61 %
6	Жасы 50 жылдан асқан ЖЭС үлесі	76 %
7	Жасы 30 жылдан асқан ЖЭС үлесі	24 %
8	ЖЭС орташа жасы	61 жыл

Энергетикалық қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін модернизация, қайта жаңғырту, физикалық тұрғыдан тозған және технологиялық ескірген құрылғылар өзекті мәселе болмақ. Мысалы, 2029 жылға дейінгі кезеңге арналған «Цифрлық Қазақстан» жасанды интеллект технологияларын кең ауқымды цифрландыру мен жанжақты енгізудің ұлттық стратегиясына сәйкес [6] тұрғын үй коммуналдық шаруашылық саласында жүйелік инфрақұрылымдық мәселелер сақталынады: коммуналдық желіліердің едәуір бөлігі тозған күйде (кейбір аудандарда орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесі мен сумен

жабдықтау жүйесінің тозған желісі 50–60 %) асады), істен шығулар саны жоғары, ал объектілерді басқару қолмен басқару режимінде жүзеге асады. Зияткерлік есеп пен болжамды мониторингтың болмауы жылуды тиімсіз пайдалануға, пайдалану шығындарының артуы мен халыққа көрсетілетін қызмет сапасының төмендеуіне алып келеді.

Осыған байланысты жылу энергетикасының секторы Қазақстан экономикасының маңызды стратегиялық салаларының бірі болып табылады. Оны тиімділігі мен тұрақтылығы тек қана экономикалық өсу жағынан емес, сонымен қатар энергетикалық қауіпсіздік пен экологиялық тұрақтылыққа әсер етеді. Сондықтан өндірісті оңтайландыру және жылу энергиясын тұтыну, жасанды интеллекті және электрмен жабдықтау мақсатындағы цифрлық технологияны енгізу мен қолдану, сондай-ақ, инфрақұрылымды жаңарту еліміз үшін өзекті мәселе болып қалады.

2.1-суретке сәйкес жылумен жабдықтау жүйелерінің дамуы бірнеше сатыдан тұрады [7]. Қазақстанда екнші және үшінші даму сатыларына сәйкес келетін орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелері кеңінен таралған. Энерготиімділік пен экологиялық көрсеткіштер тұрғысынан қарағанда бұл жүйелер орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелеріне қойылатын заманауи талаптарға сәйкес келмейді.



Сурет 2.1 – 5G концепциясын ескере отырып энергетикалық желілердің даму сатылары

Ескертпе: сурет автормен өңделген.

Көптеген Еуроодақ елдерінде жылумен жабдықтаудың бесінші даму

сатысын жүзеге асыру бойынша жұмыстар жүргізілуде. Бұл даму сатысы орталықтандырылған электрмен жабдықтау жүйесінің төмен температуралық желілерінен, қайта қалпына келетін энергия көздерін кеңінен қолданудан, басқарудың цифрлық жүйелері мен тұтынуды интеллектуалды реттеуден тұрады. Энерго тиімділіктің артуынан басқа мұндай әрекеттер қоршаған ортаға әсерді төмендетуге мүмкіндік береді [5-8].

Берілген мәселе Қазақстан үшін де өте өзекті болуда. Оны соңғы жылдары осы сала бойынша жүргізілген ғылыми зерттеулер мен жобалардың санының артуынан байқауға болады [9]. Ол, өз кезегінде, Қазақстанның жылуэнергетикалық секторын модернизациялауға жаңа маңызды қадам және заманауи халықаралық стандарттарға жақындау ретінде қарастырылады.

ОЖЖ модельдеуге арналған мамандандырылған бағдарламалық құралдардың тізімі 2.2-кестеде келтірілген.

Кесте 2.2 – ОЖЖ модельдеуге арналған құралдар тізімі

№	БҚ атауы	Әзірлеуші	Әзірлеуші сайты	Лицензия түрлері
1	Fluidit Heat	Fluidit Oy	https://fluidit.com	Коммерциялық және оқу
2	Leanheat Network	Danfoss A/S	https://www.danfoss.com	Коммерциялық және оқу
3	Dymola	Dassault Systemes	https://www.3ds.com	Коммерциялық және оқу
4	SIR 3S	3Sconsult	https://www.3sconsult.de/en	Коммерциялық
5	STANET	Fischer-Uhrig Engineering GmbH	https://www.stafu.de/en	Коммерциялық және оқу
6	AD Net Heat	Fraunhofer-Institut für Techno-und Wirtschaftsmathematik ITWM Kaiserslautern	https://www.itwm.fraunhofer	Коммерциялық және оқу
7	Pandapipes	Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology (IEE), Kassel	https://www.pandapipes.org	Ашық кодты
8	TRNSYS	Solar Energy Laboratory (SEL), University of Wisconsin	https://www.trnsys.com	Коммерциялық және оқу
9	Polysun	Vela Solaris AG	https://www.velasolaris.com	Коммерциялық және оқу
10	nPro	nPro Energy	https://www.npro.energy	Коммерциялық және академиялық
11	ROKA^3	RZVN Wehr GmbH	https://www.roka3.de	Коммерциялық және оқу
12	SimScape	The MathWorks, Inc.	https://www.mathworks.com	Коммерциялық және оқу

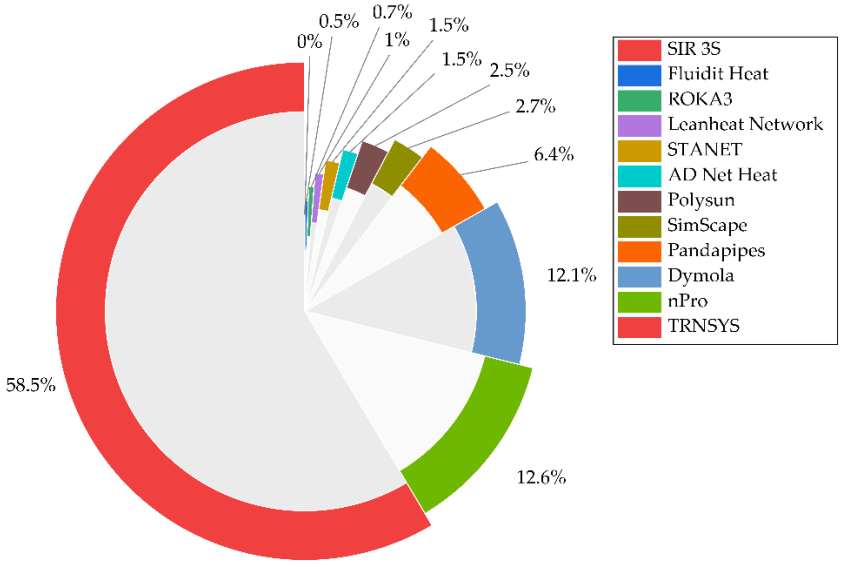
Ескертпе: Кесте зерттелген мәліметтерге сай автормен өңделген.

Жылумен жабдықтау жүйесі үшін [10] жұмыстың авторлары бағдарламалық қамтамасыздандыруды жан-жақты зерттеу негізінде бар бағдарламалық құралдарды олардық қызметі мен қолдану аймағына қарай екі негізгі категорияға жіктеді.

1. Бірінші категория орталықтандырылған жылуменжабдықтау жүйесіне арналған арнайы бағдарламалық қамтудан (DHS) тұрады. Бұл категорияға Fluidit Heat, Leanheat, ROKA^3, SIR3S және ADNet Heat сияқты құралдарды жатқызуға болады. Бұл бағдарламалар орталықтандырылған жылуменжабдықтау желілерін моделдеу үшін (DHN), гидравликалық және жылу есептеулерін орындау үшін, сонымен қатар жүйелердің пайдалану шарттарына талдау жасауға бейімделген. Сәйкесінше, олар нақты инженерлік тапсырмаларды шешу барысында жоғарғы дәлділік пен тиімділікті қамтамасыз етеді.

2. Екінші категорияға жалпы модельдеу құралдары жатады, олар: Dymola, TRNSYS, Polysun және Simscape. Бұл бағдарламалық пакеттер түрлі физикалық жүйелерді, соның ішінде жылу және энерготасымалдау процесстрін де қамтиды. Бірақ, олардың негізгі ерекшеліктері пәнаралық сипатта болғандықтан, олар арнайы жобалар мен орталықтандырылған жылуменжабдықтау жүйелерінің пайдалану сипатына толық бейімделмеген. Сол себепті мұндай құралдарды пайдалану қосымша баптау мен бейімделуді талап етеді.

2.2-суретте Scopus деректер қорынан жарияланған ғылыми мақалалар туралы статистикалық деректер көрсетілген. Ол мақалалар орталықтандырылған жылуменжабдықтау жүйесін модельдеу үшін қолданған бағдарламалық өнімдерді зерттеуге арналған. «District heating» іздеу терминінің көмегімен талдау жүргізілді.



Сурет 2.2 – Scopus деректер қорының негізіндегі орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесін модельдеу үшін қолданылған бағдарламалық өнімнің статистикасы

Төртінші және бесінші даму сатысының орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесіне өту үшін қажет болатын шарттардың бірі

орталықтандырылған жылуменжабдықтау жүйелерінің цифрлануы болып табылады. Таратылған энергия көздерінің артып келе жатқан саны, энергия жинақтау, жылу сорғылары мен тұтынушыларды басқару жүйесі желінің пайдалануын күрделендірді және оның жылулық және гидравликалық күйін күрделендіреді. Мұндай цифрлануға өтуді жүзеге асыру жылу жүктемесін болжауды, пайдалану деректерін өңдеуді, ақаулықтарды анықтауды, жұмыс режимдерін оңтайландыруды, бұл цифрлық егізді құру негізінде оның есептеулерін көрсететін физикалық желінің интеграциясын талап етеді [11].

Цифрлық егіз – модельдеу, мониторингтеу, талдау және жедел шешім қабылдауды қамтамасыз ететін физикалық объектінің, жүйенің немесе процестің деректермен байланысты виртуалды көрінісі. Оның виртуалды деңгейі геометриялық, математикалық және имитациялық модельдерді біріктіре алады және альтернативті жобалау нүсқаларын, жүйенің күүін болжауды, ауытқуларды анықтауды, пайдалану шарттарын зерттеу мен процестерді оңтайландыру үшін қолданыла алады. Қазіргі заманғы өндірістік цифрландыру контекстінде физикалық инфрақұрылым мен аналитикалық әдістердің арасындағы байланыстырушы буын болып цифрлық егіздер қызмет етеді [12-16].

Цифрлық егіз имитациялық модельден ерекшеленеді. Физикалық жүйемен байланыспаған термогидравликалық модель цифрлық модель болып табылады. Пайдаланушы деректер автоматты түрде және бір бағытт физикалық жүйеден модельге берілгенде тек цифрлық шағылысу қалыптасады. Толыққанды цифрлық егіз физикалық жүйеден және мониторинг пен басқаруды қамтамасыз ету үшін есептеулер нәтижесі бойынша кері байланыстағы деректерді қолдана отырып күнделікті жаңартуды талап етеді [17].

Орталықтандырылған жылуменжабдықтау жүйелерінің цифрлық егіздерінің негізінде физика заңдылықтарына негізделген термогидравликалық модельдер жатыр. Олар қысымды, жылу тасымалдағыштың шығыны мен жылдамдығын, берілу және кері ағын температурасын, жылудың жоғалуын, сонымен қатар тұтынушылардың сұранысын қанағаттандыру дәрежесін анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеу [18] құбырлардың гидравликалық кедергісі мен жылу жүктемесін болжау анықтамаларының бірігіп орталықтандырылған жылуменжабдықтау желісінің цифрлық егізіз өңдеуге арналған. Бұл зерттеу барысында гидравликалық параметрлерді адаптивті нақтылау пайдалану деректерін қолдана отырып зерттелген жылу таратқыш подстанциялардың 80% үшін ақаулықтарды азайтуға мүмкіндік берді. Кіріс деректері мен шекаралық шарттарды калибрлеу орталықтандырылған жылуменжабдықтау жүйесінің цифрлық егізін дайындау барысында маңызды болып табылатынын мақұлдайды.

Динамикалық басқарудың контурға динамикалық термогидравликалықмоделін қосу көр уәдеберерлік бағыт болып табылады. Бөлшектік модельдеуді және басқаруға бағытталған төмендетілген реттегі модельдерді пайдалану температура динамикасын, құбырлардың жылу инерциясын және орталықтандырылған жылумен жабдықтаудың ауқымды желісінің пайдалану бойынша шектеулерін ескеруге мүмкіндік береді [19].

Сонымен қатар цифрлық егіздер орталықтандырылған жылумен

жабдықтаудың инфрақұрылымының техникалық күйін диагностикалау үшін қолданылады. [20] жұмыстың авторлары желінің гидравликалық моделінің гидравликалық және жылу ақаулықтарының анықтау мен идентификациялау үшін оңтайландыру алгоритмімен үйлесетін тәсіл ойлап тапты. Берілген тәсіл жылутасымалдағыштың ағып кетуін, аномальды қысым шығындарын және жылу шығындарының артуын, сонымен қатар сәйкес ауытқулардың ауқымдығын бағалауға мүмкіндік береді.

Сондай-ақ, басқару жүйесін, цифрлық егіз бен мультиэнергетикалық жүйе үшін бірге модельдейтін ортаны біріктіретін архитектураны қарастыру ұсынылды [21]. Бұл архитектурада цифрлық егіз өлшенген деректерді оңтайландырылған параметрлерді есептейтін және оларды цифрлық егізге қайтаратын басқару жүйесіне беріп отырды. Мұндай функцияларды тарату жүйенің есептеу моделіне және деректерді өңдеу мен басқару бойынша шешімдерді қалыптастыратын сыртқы бағдарламалық қабатқа бөлінуін растайды.

Стандартты деректер алмасу цифрлық модельдердің өндірістік интеграциясы үшін ерекше мәнге ие. Агрерирленген микрожелілер үшін OPC UA үш деңгейлң архитектура әр түрлі инфрақұрылымы «шекаралық» және «бұлтты» деңгейлердің гетерогенді құрылғылары, сонымен қатаржоғарғы деңгейлі электр тұтынуын басқару қызметтерінің арасындааукымбы өзара әсерді қалыптастырады [22]. Python тілінде әзірленген OPC UA басқа энергетикалық жүйесі мен шлюзде бар заманауи SCADA жүйелерін интеграциялау үшін MODBUS ескі қондырғысы қолданылды және зерттеулер сенімді және деректер мен нақты уақыт режиміндегі басқарудың ауқымды алмасуын растады [23].

Орталықтандырылған электрмен жабдықтау жүйесінің цифрлық егізінің көп уәде берерлік бағытының дамуы физикалық модельдер, нейрондық желілер мен жобалауды басқарудың интеграциясы болып табылады [24].

Python бағдарламалау тілі модельдеуде және орталықтандырылған электрмен жабдықтау желілерін цифрландыруда оның сандық есептеулерге арналған, уақыттық қатарларды өңдеуге, машиналық оқытуға, визуализация мен өндірістік деректермен алмасуға арналған кітапханалардың арқасында кеңінен қолданылады. Python бағдарламасын автономды есептеу құралы ретінде де, SCADA, БЛК, деректер базасы мен арнайы термогидравликалық симулятор арасындағы интеграциялық деігей ретінде қолдануға болады [23, 25-27].

Орталықтандырылған электрмен жабдықтау желісінің құрылымын, күрделі топологияларды модельдеу, гидравликалық және жылу есептеулерін орындау, сонымен қатар енгізу шығару операцияларының автоматтандырылуын сақтау үшін ашық шығыс PyDHN кодты Python кітапханасы өңделіп шығарылған [25]. Күрделі топологиялы желілерде кітапхананы тексеру оның термогидравликалық есептер нәтижесін қайталау мүмкіндігіг растады және орталықтандырылған электрмен жабдықтау жүйесін талдау үшін ашық шығыс кодты бағдарламалық жасақтаманың қолдынысын көрсетті. Берілген шешімнің ерекшелігі деректерді талдау мен оңтайландыру алгротитмімен есептеу моделін тікелей интеграциялау мүмкіндігі болып табылады.

Құбыр желілерінде стационарлы және квазистационарлы модельдер үшін

арналған Python pandapipes пакеті тағы бір мысал ретінде қолданыла алады [26]. Ол қысымды, шығындарды, жылдамдық пен температураны есептеуге, сонымен қатар уақыттық қатарларды және қолданушы реттегіштеірн құруға мүмкіндік береді. pandapipes және pandapower пакеттерін бірге пайдалану өзара байланысқан жылу, газ және электрлік желілерді модельдеуге мүмкіндік береді. Python бірегей жүйесін пайдалану есептеу сараптамасының автоматтандырылуын, нәтижелерді өңдеуді және қосымша кітапханаларды интеграциялауды жеңілдетеді.

Сондай-ақ, біріккен модельдеу архитектурасының қолданылуы да сипатталған. Онда орталықтандырылған электрмен жабдықтаудың динамикалық моделі TRNSYS ортасында әзірленген, ал Python жобалық есептерде, оңтайландыруда, әсерлерді талдауда және басқару бойынша шешімдерді қалыптастыруда қолданылды [27]. Python тілінің деңгейі арнайы симуляторды оңтайландыру алгоритмі мен деректерді өңдеуге жалғауға мүмкіндік берді.

Есептеу уақытын қысқарту мақсатында гибридты модельдерді зерттеу жүргізілуде. Коэффициенті $R^2 = 0,9997$ болатын жоғары нүктелі физиикалық модельдің 98,64 % динамикасын өндіретін LPV модификациялық құрылымына негізделген орталықтандырылған жылумен жабдықтау желісінің моделі дайындалды. Есептеу уақыты шамамен 52 рет азайды [28].

[29] зертеуге сәйкес гибридті тәсілде жылудың ішкі станцияларындағы жеке топтар машиналық оқыту модельдерімен алмастырылады, ал желінің қалған бөлігі физикалық симулятор көмегімен есептеледі.

Кеңістіктік редукцияның жоғары дәрежесі бар конфигурацияда физикалық тораптар саны 123-тен 5-ке дейін қысқартылды, ал есептеу уақыты 91%-ға қысқартылды. Бұл кезде жылу өндірісінің жалпы көлемін есептеудегі ауытқу 45,24 МВт/сағ немесе желідегі жылу шығындарының қатынасы 26,37 % құрды.

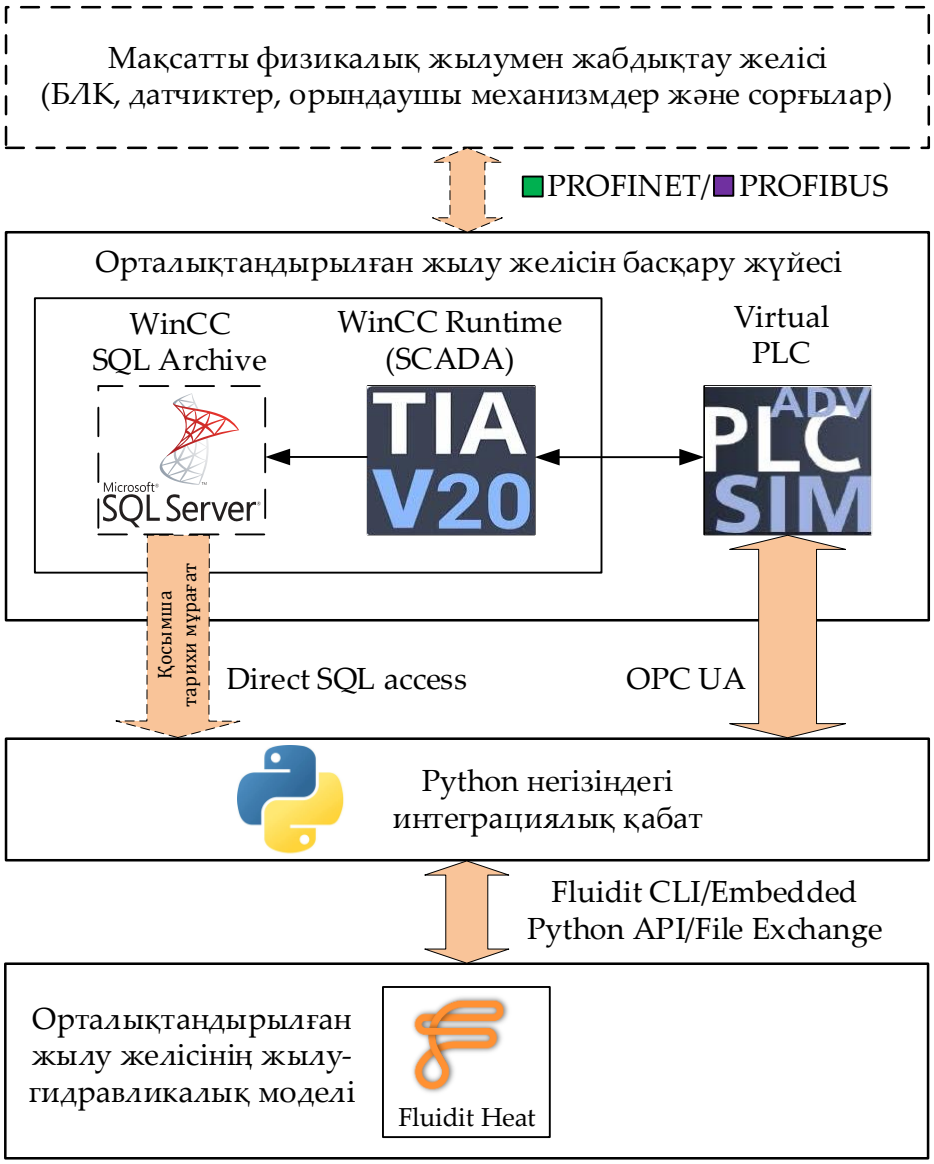
Демек, әдебиеттерге шолу қарастырылатын зерттеулердің негізінен цифрлық егіздің жеке жұмысына, жүетемні жобалауға, параметрлерді идентификациялауға, температуралық режимді оңтайландыруға, ақаулықтарды диагностикалау мен есептеу уақыттарын қысқартуға арналғанын көрсетеді.

2.2 Аудандық жылыту желілеріне арналған цифрлық егіз архитектурасын әзірлеу

2.3-суретте ұсынылатын орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесінің «цифрлық егізінің» функионалдық архитектурасы ұсынылған. Ол нақты физикалық процестен, автоматтандыру жүйесі мен диспетчерлік басқарудан, Python тіліндегі интеграциялы-аналитикалық деңгейден, сонымен қатар Fluidit Heat бағдарламасында жүзеге асқан жылу-гидравликалық модельден тұрады.

Орталықтандырылған жылуменжабдықтаудың нақты жүйесі мақсатты физикалық объектіні ұсынады және құбыр желісінен, датчиктерден, атқарушы механизмдер мен өдірістік БЛК құралады. Бұл физикалық контур концепцияда қарастырылған, бірақ, сараптамаға қатыспады. Физикалық БЛК мен диспетчерлік бақылау және деректер жинағы (SCADA) жүйесі арасындағы

деректер алмасу нақты реализция кезінде PROFINET немесе PROFIBUS өндірістік желілері арқылы жүзеге асырыла алады.



Сурет 2.3 – «Цифрлық егіз» технологиясы мен Simatic S7 аппаратты-бағдарламалық кешеннің негізінде құрылған орталықтандырылған жылумен жабдықтау (DHS) жүйесінің имитациялық моделінің функционалдық сұлбасы

Ескертпе: сурет автормен өңделген.

Сараптамалық конфигурацияда өндірістік контроллер функциялары виртуалды БЛК арқылы орындалды, олар PLCSIM Advanced бағдарламалық қамтамасыздандыру көмегімен жүзеге асты [30]. Виртуалды БЛКда аппаратты конфигурация, контроллер бағдарламалары, технологиялық айнымалылардан тұратын деректер блогы, сонымен қоса OPC UA серверінің активациясы мен іске қосылуы жүзеге асты. 2.2-кестеде жүйенің әр компонентінің жеке тағйындалуы ұсынылған.

«Цифрлық егіз» сараптамалық архитектурасын жзеге асыру үшін

орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелері (ОЖЖ) контроллердің келесідей конфигурациясын, байланыс технологиясын және бағдарламалық құралдары қолданылды:

- 2.9 прошивкалы нұсқасымен CPU 1513F-1 ретінде конфигурацияланған SIMATIC S7-1500 контроллері [31];
- БЛК және SCADA жүйесінің арасындағы байланыс үшін PROFINET/Industrial Ethernet;
- БЛК конфигурациялау мен бағдарламалау үшін инженерлік орта ретінде TIA Portal V20 [32];
- SCADA визуализациясы, диспетчерлік мониторинг пен деректерді архивтеу үшін SIMATIC WinCC Runtime Advanced V20 [32];
- S7-1500 контроллерінің баптауларын виртуалды орындау үшін S7-PLCSIM Advanced V7.0 [33];
- OPC UA хаттамасы, деректерді өңдеу және модельдеу координациясы арқылы байланысу үшін *asyncua* және *opcua* кітапханалары орнатылған Python 3.14 бағдарламалау тілі [34];
- жылу-гидравликалық модельдеу мен сценарийлерді талдау үшін Fluidit Heat 2.8 ортасы [35].

Кесте 2.3 – Жүйе компоненттерінің тағайындалуы мен рөлі

№	Компонент	Тағайындалуы
1	БЛК	Сорғыларды, клапандарды және задвижкаларды жергілікті басқару, ПИД-реттеуіш, блоктау және апаттық қорғаныс
2	SQL Server	Оқу, трендтер мен калибрлеуді (сараптамада опциялы) талдау үшін өлшемдерді тарихи деректері
3	WinCC	Визуализация, деректерді басқару және беру
4	OPC UA	БЛК-дағы ағындық мәндер оқу мен рұқсат етілген қондырғыларды беру
5	Python	БЛК деректерін оқу және жазу, Fluidit Heat бағдарламасын іске қосу және сценарийлерін жазу және бағдарламадан деректерді оқу және деректер сапасын бақылау
6	Fluidit Heat	Орталықтандырылған жылуменжабдықтау желісінің гидравликалық және жылулық модельдеуі
7	PLCSIM Advanced	Виртуалды БЛК

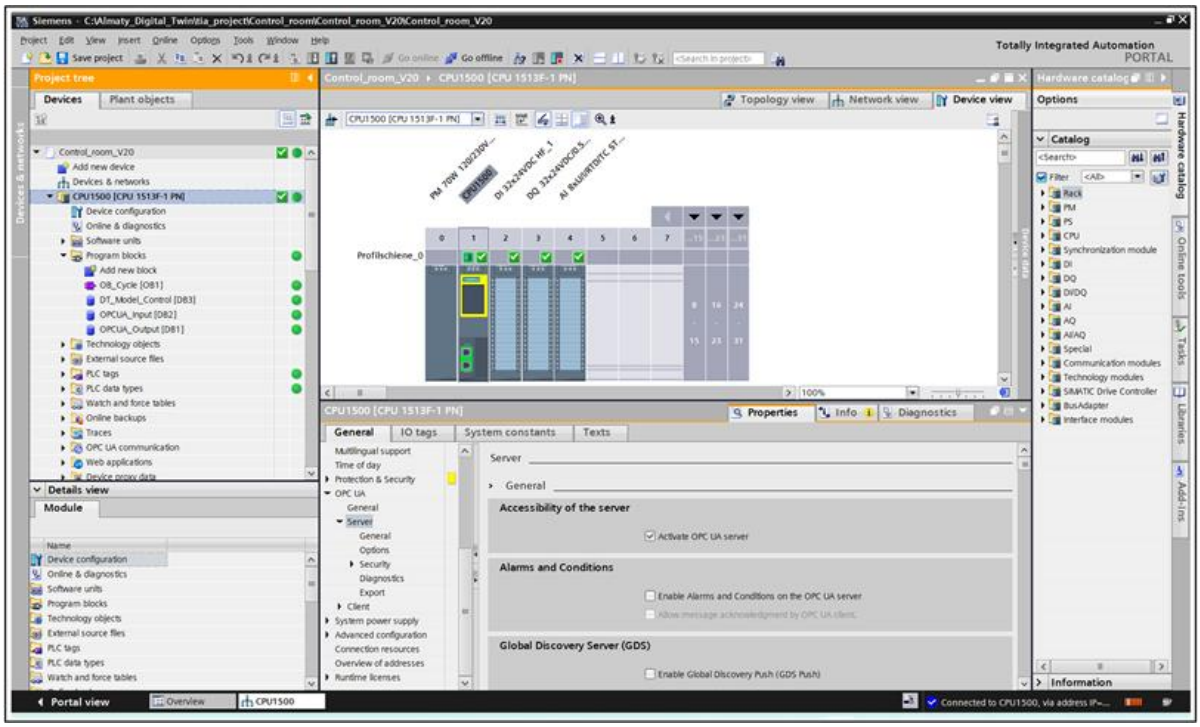
Цифрлық егіздің сараптамалық архитектурасында қолданылған БЛК жобасының конфигурациясы 2.4-суретте ұсынылған. БЛК деректер блогында сақталатын стандартты айнымалыларға Python базасында интеграциялық деігейді қамтамасыз ету үшін енгізілген OPC UA сервері TIA Portal V20 бағдарламасында активтендірілді.

Процестің ағындық параметрлері БЛК деректер блогына беріледі. Нақты жүйеде бұл мәндер өлшеуіш датчиктердің сигналдары негізінде қалыптасады.

WinCC контроллермен деректер алмасады, процес параметрлерін визуализациялайды және SQL Server-ді қолдана отырып оларды архивке жібереді [36].

SQL Server деректер қоры бірінші кезекте өлшеу нәтижелерін ұзақмерзімді сақтауға, тарихи трендтерді қалыптастыруға, статистикалық талдауларға, термогидравликалық модельдерді калибровкалауға және аномалияларды анықтау алгоритмінің кейіннен оқыту үшін арналған.

Нақты уақыт режиміндегі негізгі деректер алмасуы БЛК мен Python арасында OPC UA хаттамасы арқылы орындалады. Python процес параметрлерінің мәндерін БЛК деректер блогынан оқиды және олардың толықтығын, деректер типін, өлшем бірліктерін, рұқсат етілген диапазондарын тексереді.

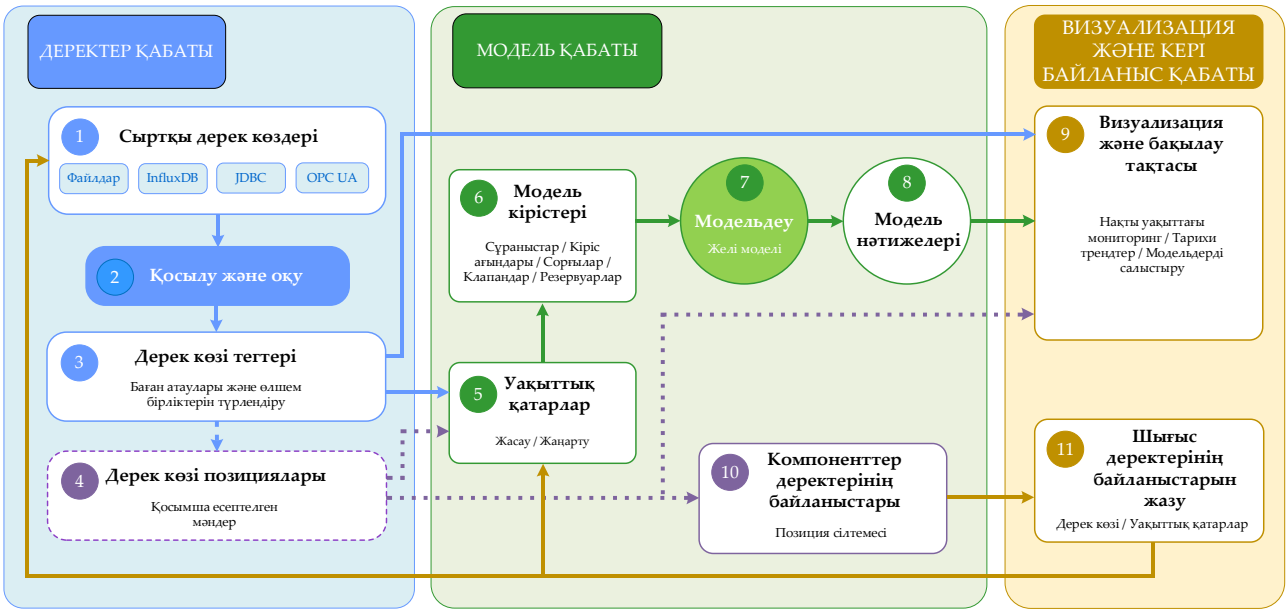


Сурет 2.4 – Siemens TIA Portal V20 бағдарламасында OPC UA серверін активтеуі және БЛК жобасын баптау

Fluidit Heat моделі гидравликалық/гидрологиялық есептеулері бар сыртқы көздерден (мысалы, Excel, CSV) уақыттық өлшенген деректер қатарын біріктіреді. Бұл дерек көздері модльдерге бірнеше файлдарға қол жеткізуге рұқсат бере отырып, мысалы, бір каталогтағы барлық CSV-файлдарға – бір объект арқылы динамикалық сілтемелер ретінде әсер етеді. Деректер көзі енгізілген деректер емес сілтемелер ретінде қолданылатындықтан, олар модельдің өлшеміне аса көп әсер етпейді және үнемі файлдың ең актуалды нұсқаларына қол жеткізуді қамтамасыз етеді. Әр деректер көзінен модель автоматты түрде атауларын генерациялайды, олар ары қарай «деректер көзінің тегтері» және «деректер көзінің позициялары» ретінде классификацияланады [35]. 2.5-суретте Fluidit Heat бағдарламасындағы деректер көзі көрсетілген.

OPC UA деректер көзі OPC UA Historical Access спецификасын пайдалану арқылы Fluidit ортасында тарихи деректерді оқу және жазу үшін OPC UA серверіне қосылуды қамтамасыз етеді [37].

Тексеруден кейін Fluidit Heat термогидравликалық модель үшін Python алынған деректерді кіріс параметрлер тізіміне түрлендіреді. Қолжетімді интерфейске байланысты өзара әрекет енгізілген API Python немесе файлдар алмасуы Fluidit бағдарламасының командалық жолдан іске қосылуының негізінде жүзеге аса алады.



Сурет 2.5 – Fluidit Heat бағдарламасындағы деректер көзі

Ескертпе: сурет автормен өңделген.

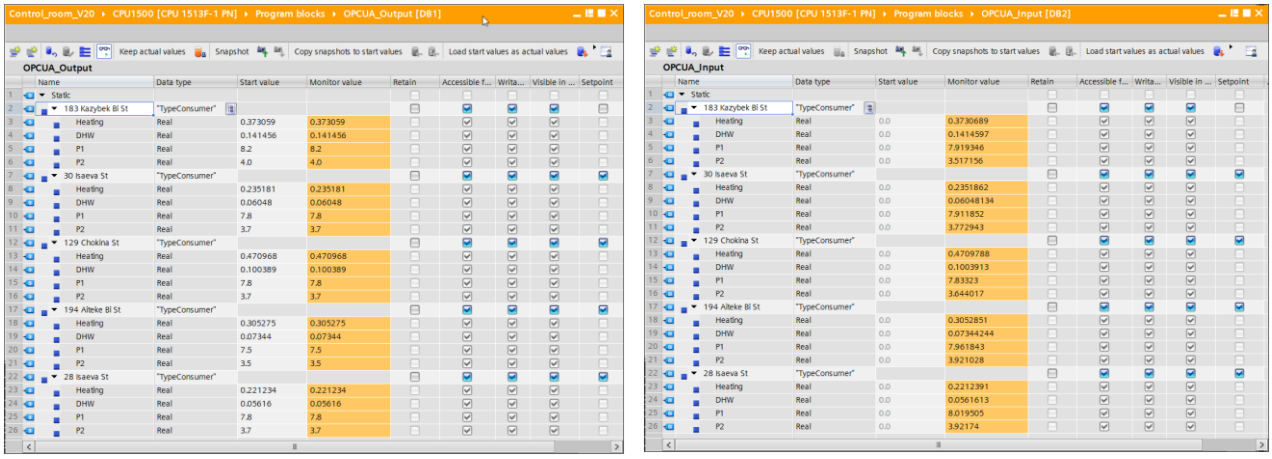
2.4-кестеде жасанды интеллект моделі мен машиналық оқытуды оқу үшін SQL және OPC UA серверіне тікелей қол жеткізу әдістерін қысқаша салыстыру келтірілген. Кестеде көрсетілгендей әрбір тәсілдің өзінің кемшілктері мен ерекшеліктері де бар. Мысалы, OPC UA онлайн-оқыту үшін ыңғайлы, сонда SQL серверіне тікелей қол жеткізу ұзақ тарихи кезеңдерді қолдана отырып офлайн-оқыту үшін мақсаты айқын. Берілген зерттеуде OPC UA серверінің негізделген тәсілге артықшылық берілді.

Fluidit Heat жүйенің физика математикалық есептеу ядросы ретінде әрекет етеді. Алынған шекаралық шарттар негізінде модель желінің гидравликалық және жылулық күйін есептейді. Бір есептеу циклінің шегінде бір бірінен беріліс температурасы, қолжетімді қысымның төмендеуі, жылу жүктемесі немесе басқа пайдалану параметрлері бойынша ерекшеленетін бірнеше сценарийлерді модельдеуге болады. Сонымен қатар Fluidit Heat берілген әр сценарийді есептейді, ал Python алынған нәтижелерді салыстырып, оларды пайдалану шектеулерне сәйкес тексереді және оңтайлы жұмыс режимін таңдайды. Модельдеу аяқталғаннан кейін есептелген мәндер Python интеграциялаушы модулімен OPC UA арқылы БЛК деректер блогына беріледі.

Кесте 2.4 – ЖИ/МО модельдерін оқыту үшін SQL және OPC UA тікелей қол жетімдігін салыстыру

№	Критерий	OPC UA	Direct SQL Access (WinCC Archive)
1	Деректер форматы	Уақыт белгісі мен сапа мәртебесі бар тег мәндері	WinCC қысылған/сегменттелген бинарлық архивтері
2	Оқыту режимі	Онлайн/стримингтік ML және болжамды аналитика үшін оңтайлы	Үлкен тарихи деректер жинақтарында топтамалық оқыту үшін оңтайлы
3	SCADA жүйесіне жүктеме	Ең аз (оқиғаға негізделген/асинхронды тасымалдау)	Жұмыс уақытындағы ДБ-ге ауыр SELECT сұраныстары кезінде жоғары
4	Әмбебаптылық	WinCC нұсқасы мен ДБ түрінен толық тәуелсіз	Белгілі бір SCADA нұсқасының MS SQL Server құрылымына байланған

БЛК мен Python базасындағы интеграциялық деңгейдің арасындағы деректер алмасуды құрылымды ұйымдастыру 2.6-суретте көрсетілген. OPC UA_Input деректер блогы БЛК-ға қайтаратын модельдеудің сәйкес нәтижелерін қабылдағанда, OPC UA_Output деректер блогы жұмыс параметрлерін сақтайды. Жаңа берілген мәндерді атқарушы механизмдерге бергенде ақпараттық-басқарушы контур тұйықталады және орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесінің жұмыс режимін оңтайландыруға мүмкіндік береді.



(а) **(ә)**

Сурет 2.6 – OPC UA хаттамасы арқылы екібағытты деректер алмасу үшін қолданылатын БЛК деректер блогы

Мұнда, Python негізінде БЛК-дан интеграциялық деңгейге берілетін жұмыс параметрлерін қамтитын (а) OPC UA_Output (DB1) және БЛКға қайтатын Fluidit Heat модельдеу нәтижелерінен құралатын OPC UA_Input (DB2) (ә).

Демек, ұсынылатын концепциядағы «Цифрлық егіз» Fluidit Heat моделінен құралатын және Python тіліндегі қосымшадан құралатын интегрирленген орта болып табылады. БЛК деректерді жинау мен қауіпсіз басқаруды қамтамасыз

етеді: WinCC және SQL Server – диспетчерлік басқару мен деректерді архивтеу; Python – деректер қорын, есептеу циклі мен сценарийді таңдауды ұйымдастырады; Fluidit Heat – физикалық тұрғыдан интерпретацияланатын термогидравликалық модельдеу.

2.3 Цифрлық егізге негізделген жұмыс үрдісінің математикалық тұжырымдамасы және эксперименттің сандық қойылымы

Ұсынылатын цифрлық модельдеу жүйесінің жұмысы басқару жүйесінен келіп түсетін технологиялық деректердің тізбектелген түрленуінің негізінде көрсетіледі. Деректер көзі ретінде БЛК деректер блогы (DB) қолданылады.

Жылумен жабдықтау жүйелеріндегі цифрлық модельдеудің әмбебап сұлбасының математикалық сипаты

Ұсынылған сұлба жылу жүйесінің цифрлық басқару, бағдарламалық интегралды қабаты мен цифрлық модель арасында деректер алмасу үшін арналған әмбебап бағдарламалық-техникалық кешенді ұсынады. Алгоритмдерді сынақтан өткізу кезінде пайдаланылатын нақты жобаланатын логикалық контроллер мен виртуалды БЛК ретінде де қолданыла алады.

Уақыт өте келе k басқару ж.йесі шығыс деректер векторын қалыптастырады:

$$\text{у}_k = [p_k, T_k, q_k, Q_k, S_k]^T \tag{2.1}$$

мұндағы p_k – бақылау нүктелеріндегі қысым, T_k – жылу тасымалдағыш температурасы, q_k – шығындар, Q_k – тұтынушылардың жылу жүктемесі, S_k – қондырғының күйі және басқарушы сигналдар.

Деректер бағдарламалық интеграциялық қабатқа өндірістік алмасу хаттамасы арқылы БЛК-дан беріледі, мысалы, OPC UA. Қолдану алдында сапасы тексеріледі, фильтрлеу, сонымен қатар өлшем бірліктерін түрлендіру жүзеге асырылады:

$$Z_k = C_{in}\, P(y_k) \tag{2.2}$$

мұндағы $P(y_k)$ – деректерді алдын ала өңдеу функциясы, C_{in} – түрлендіру матрицасы және цифрлық модельдің кіріс параметрлерімен БЛК тегтерін салыстыру, Z_k – шектік шарттардың дайын болған векторы.

R_k сигналы арқылы есептің іске қосылуы анықталады:

$$R_k \in= \{0, 1\} \tag{2.3}$$

мұндағы $R_k = 1$ модельдеуге берілген команлданың бар болуын білдіреді. Ол команда SCADA интерфейсі арқылы автоматты түрде берілген уақыт интервалы арқылы немесе технологиялық параметрлердің өзгерісін анықтаған кезде операторменқалыптасуы мүмкін. Төмендегі теңдеуде сызықтық емес гидравликалық және жылу теңдеулері жүйесімен цифрлық модельдің күйі

анықталады:

$$F(X_k, Z_k, U_k, \theta) = 0 \tag{2.4}$$

мұндағы X_k – желінің есептеу күйінің векторы, U_k – басқарушы және режимді параметрлер векторы, θ – құбырлардың геометриялық сипатынан, гидравликалық кедергілер коэффициентінен, оқшаулауды жылу өткізгіштігінен және қондырғы сипатынан тұратын модель параметрлерінің жиынтығы. Желі тораптарындағы шығындар балансы жалпы түрде келеідей жазылады:

$$A_{qk} + d_k = 0 \tag{2.5}$$

мұндағы А – желі элементтерінің бірігу матрицасы, q_k – құбырлар бойынша шығындар векторы, d_k – тұтынушылардың жылу тасымалдауышты таңдау векторы.

Қысымның жоғалуы құбыр учаскесінде келесі өрнекпен көрсетілуі мүмкін:

$$\Delta p_i = \lambda_i(L_i/D_i)\ (\rho v_i^2/2) + \Sigma\zeta_i(\rho v_i^2/2), \tag{2.6}$$

мұндағы λ_i – гидравликалық үйкеліс коэффициенті, L_i және D_i – құбырдың ішкі диаметрі мен ұзындығы, ρ – жылу тасымалдағыштың тығыздығы, v_i – ағын жылдамдығы; ζ_i – жерглікті кедергілер коэффициенті.

Тұтынушыға берілетін жылу қуаты келесі формуламен анықталады:

$$Q_i = \acute{m}_i c_p \left(T_{s,i} - T_{r,i}\right) \tag{2.7}$$

мұндағы $\acute{m}_i$ – жаппай тұтыну, c_p – жылу тасымалдағыштың меншікті жылу сыйымдылығы, $T_{s,i}$ және $T_{r,i}$ – берілетін және кері қайтатын құбырлардағы температуралар.

Жылу тасымалдағыш температурасының өзгеруі желі учаскесіндегі жылу шығындарының салдарынан шамамен келесі өрнекпен сипатталуы мүмкін:

$$T_{i,out} - T_{env} = \left(T_{i,in} - T_{env}\right) exp\left[-U_i L_i / \left(m_i c_p\right)\right] \tag{2.8}$$

мұндағы U_i – жылу берілгіштің сызықтық коэффициенті, T_{env} – қоршаған ортаның температурасы.

Теңдеу жүйесін шешкеннен кейін цифрлық модель нәтижелерді есептеу векторын қалыптастырады:

$$\hat{y}_k = G\left(X_{k,} Z_{k,} U_{k,} \theta\right) \tag{2.9}$$

Оған есептік қысымдар, температуралар, шығындар, жылудың жоғалуы, жеткізілген жылу қуаты мен жылумен жабдықтаудың жетіспеушілігі кіреді

Нәтижелерді БЛКға жіберер алдында есептеудің дұрыстығын бақылау

жүзеге асады:

$$A_k = \mathrm{C}_{\mathrm{conv}} \wedge C_{data} \wedge \mathrm{C}_{\mathrm{limits}} \quad (2.10)$$

мұндағы $\mathrm{C}_{\mathrm{conv}}$ – модельдің сәтті сәйкестенуінің белгісі, C_{data} – кіріс және шығыс деректердің толыққанды болуының белгісі; $\mathrm{C}_{\mathrm{limits}}$ – орнатылған технологиялық шектерулерге нәтижелердің сәйкестігі.

R_k= 1 және A_k = 1 шарттарының орындалуы кезінде БЛК тегтерінің құрылыма түрленеді:

$$y_{k,out}\text{^PLC} = C_{out}\hat{y}_k \quad (2.11)$$

мұндағы C_{out} – шығыс айнымалы БЛК бар цифрлық модельдің нәтижелерді салыстыру матрицасы. Дұрыстық шарттарының бұзылуы кезінде нәтижелер жазбасы блокқа түседі, ал басқару жүйесіне қателік коды беріледі.

Демек, цифрлық модельдеудің толық циклін үлкейтілген түрде ұсынуға болады:

$$y_{k,out}\text{^PLC} = C_{out}M\theta(C_{in}P(y_k\text{^}PLC), u_k)\hat{y}_k \text{ при } R_k = 1 \text{ и } A_k = 1 \quad (2.12)$$

мұндағы $M\theta$ – жылу желісінің цифрлық моделінің операторы.

Нақты және виртуалды өндірілетін процесске цифрлық модельдің сәйкестігін бағалау үшін сәйкессіздік векторы анықталады:

$$e_k = y_k\text{^PLC} - \hat{y}_k \quad (2.13)$$

Сәйкессіздіктің тізбектелуі негізінде MAE мен $RMSE$ көрсеткіштері есептеледі:

$$MAE = (1/n)\sum|e_k| \quad (2.14)$$

$$RMSE = \sqrt{[(1/n)\sum e_k^2]} \quad (2.15)$$

Ұсынылған математикалық сипат жылу желісінің нақты учаскесіне, тұтынушылар санына, датчиктер құрамы мен БЛК типіне байланысты емес. Сынақтық тексеру барысында нақты контроллер виртуалды БЛКмен алмастырылады және оның ақпараттық алмасуының жалпы құрылымы өзгеріссіз қалады. Нақты объектіге өту үшін тек қана контроллер адрестерін баптау, технологиялық тегтерді сәйкестендіру және сәйкес цифрлық модельдердің параметрлері қажет болады.

S операциялық сценарийді білдірсін, *t* – есеп беру сәті, *i* = 1, ..., N_d – сұраныс бойынша модельденген қосылыс (N_d = 8) және ℓ = 1, ..., N_p арнасы (N_p = 18). Тәуелсіз айнымалыларға әр сұраныс бойынша қосылуға тағайындалған үй-жайларды жылыту және ыстық сумен жабдықтау жүктемесі, қондырғыға берілген температураның мәні, көздегі қысымның төмендеуін реттеу, қоршаған орта мен топырақ температурасы кіреді. Негізгі тәуелді айнымалылар-жылу

қуаты мен жабдықты тұтыну, тұтынушыға беру және қайтару қысымы мен температурасы, жеткізілетін жылу, жылу тапшылығы және құбырлардағы жылу шығыны. Параметрлер жиынтығы θ желі топологиясын қамтиды; құбырлардың ұзындығы, диаметрі және кедір-бұдырлығы; жылу беру параметрлері; компоненттердің параметрлері; және бекітілген шекаралық шарттар

$$\dot{Q}_{req,i,s}(t) = \alpha_{H,s}\dot{Q}_{H,i}(t) + \alpha_{DHW,s}\dot{Q}_{DHW,i}(t) \qquad 2.16$$

S сценарийінде *i* талап бойынша қосылған кезде қажетті жылу мөлшері келесідей анықталды, мұнда $\dot{Q}_{H,i}$ және $\dot{Q}_{DHW,i}$ сәйкесінше үй-жайларды жылытуға және ыстық сумен жабдықтауға арналған компоненттер болып табылады. Коэффициенттер ($\alpha_{H,s}$, $\alpha_{DHW,s}$) үй-жайларды жылыту үшін (1, 0), ыстық сумен жабдықтау үшін (0, 1), біріктірілген базалық деңгей үшін (1, 1) және шекаралары азайтылған екі жағдай үшін және (1.2, 1.2) Жоғары сұраныс-120%.

Сценарийдің кіріс векторы:

$$x_s(t) = [\dot{Q}_{req,1,s}, \dots, \dot{Q}_{req,N_d,s}, T_{S,set,s}, \Delta p_{set,s}, T_a, T_g]^T \qquad 2.17$$

мұндағы $T_{S,set,s}$ – қондырғының берілетін су температурасының тапсырмалық мәні; $\Delta p_{set,s}$ – дифференциалды қысым көзінің параметрі; T_a және T_g сәйкесінше қоршаған орта мен жердің температурасы болып табылады.

Әрбір модельдеудің алдында Python интеграциялық қабаты PLC тегінің идентификаторларын сәйкес Fluidit Heat кіріс айнымалыларымен салыстырып, алынған кіріс векторына бекітілген тексеру ретін қолданды. Тексеру ережелері, бірліктерді салыстыру және рұқсат етілген инженерлік диапазондар осы зерттеу үшін Python конфигурациясында априори ретінде көрсетілген және әрбір сценарий орындалғанға дейін автоматты түрде және дәйекті түрде қолданылған. Жүргізілген тексерулер барлық міндетті айнымалылардың болуын, деректер түрінің үйлесімділігін, өлшем бірліктерін сәтті түрлендіруді, теңшелген техникалық диапазондарға сәйкестікті, сондай-ақ UA OPC сапа/күй өрістерінің сенімділігін және уақыт белгісін растады. Кез-келген міндетті тексерудің сәтсіздігі сценарийдің орындалуына кедергі келтірді, сондықтан нәтижелердің кері жазбасын бұғаттады; қате коды мен диагностикалық күй WinCC-ге қайтарылды.

Сәтті тексеруден кейін Fluidit Heat моделі тексерілген кіріс векторын x және модель параметрінің векторын θ термогидравликалық шығыс векторына *y* бейнелейді:

$$y_s(t) = \mathcal{M}_\theta\big(x_s(t)\big) = [p_{S,i}, p_{R,i}, T_{S,i}, T_{R,i}, \dot{V}_\ell, v_\ell, \dot{Q}_{del,i}, \dot{Q}_{loss,\ell}]^T \qquad 2.18$$

мұндағы $p_{S,i}$ және $p_{R,i}$ сәйкесінше жеткізу және қайтару қысымдары; $T_{S,i}$

және $T_{R,i}$ сәйкес температуралар; $\dot{V}_\ell$ және v_ℓ сәйкесінше құбыр көлемінің ағыны мен жылдамдығы; $\dot{Q}_{del,i}$ – жеткізілетін жылу; және $\dot{Q}_{loss,\ell}$ - құбырдың жылу шығыны.

Жүйе деңгейінде сұралған жылу, жеткізілген жылу және жылу тапшылығы бағаланды

$$\dot{Q}_{req,s} = \sum_i \dot{Q}_{req,i,s}\,, \qquad \dot{Q}_{del,s} = \sum_i \dot{Q}_{del,i,s},$$
$$\dot{Q}_{def,s} = \sum_i max\left(0, \dot{Q}_{req,i,s} - \dot{Q}_{del,i,s}\right), \tag{2.19}$$

2.5-кестеде келтірілген тапшылық сұраныстың барлық қосылымдары бойынша Fluidit Heat тапшылығы нәтижесінің қосындысы.

Кесте 2.5 – Алты операциялық сценарийдің сандық нәтижелері

Сценарий	Сұралған сұраныс, кВт	Жеткізілген жылу, кВт	Қондырғы шығыс қуаты, кВт	Қондырғы шығыны, л/с	Тұтынушының ең аз қысым айырмасы (Δp), бар	Берілетін судың ең аз температурасы, °C	Жылу шығыны, кВт	Қуат тапшылығы, кВт
Кеңістікті жылыту	1867,45	1867,51	1875,01	9,692	4,000	94,57	7,503	0
Тұрмыстық ыстық су	502,33	502,39	510,09	2,637	4,000	93,24	7,697	0
Жылыту және DHW	2369,78	2369,84	2377,14	12,288	4,000	94,65	7,298	0
Төмен жеткізу жемпературасы 90 °C	2369,78	2369,83	2376,65	13,664	4,000	89,71	6,820	0
Төмен дифференциалды қысым 3 бар	2369,78	2369,82	2377,12	12,288	3,000	94,65	7,298	0
Жоғары сұраныс 120%	2843,73	2843,79	2850,80	14,737	4,000	94,71	6,996	0

Гидравликалық қызмет көрсету индикаторы тұтынушының дифференциалды қысымы және оның желісінің минимумы болды:

$$\Delta p_{i,s}(t) = p_{S,i,s}(t) - p_{R,i,s}(t),$$
$$\Delta p_{min,s}(t) = \min_i\{\Delta p_{i,s}(t)\} \tag{2.20}$$

Сценарий зерттеуде $\Delta p_{min,s} \geq \Delta p_{lim}$, Δp_{lim} = 3.5 бар болғанда қабылданған гидравликалық критерийді қанағаттандырады.

Желінің жылу шығыны және сәйкес энергия балансының қалдығы

есептелді:

$$\dot{Q}_{loss,s} = \sum_{l} \left(\dot{Q}_{loss,S,\ell,s} + \dot{Q}_{loss,R,\ell,s} \right), \qquad \varepsilon_{E,s} = \dot{Q}_{plant,s} - \dot{Q}_{del,s} - \dot{Q}_{loss,s} \tag{2.21}$$

мұндағы $\dot{Q}_{loss,S,\ell,s}$ және $\dot{Q}_{loss,R,\ell,s}$ сәйкесінше жеткізу және қайтару құбырларының жылу шығыны болып табылады. Хабарланған алты сценарий үшін $|\varepsilon_{E,s}|$ 0,009 кВт-тан төмен болды, бұл алынған жиынтықтардың сандық сәйкестігін растады.

Физикалық интерпретация үшін зауыттың жылу шығынын келесі түрде жазуға болады

$$\dot{Q}_{plant,s} = \rho(\bar{T}_s) c_p(\bar{T}_s) \dot{V}_{plant,s} \left(T_{S,plant,s} - T_{R,plant,s} \right) \tag{2.22}$$

мұндағы ρ және c_p – сәйкесінше судың температураға тәуелді тығыздығы және меншікті жылу сыйымдылығы. 2.5-кестеде симулятор хабарлаған негізгі қондырғының қуат мәні пайдаланылады; теңдеу (2.22) оның термодинамикалық интерпретациясын анықтайды және консистенцияны тәуелсіз тексеру ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Жоба Дарси-Вайсбах үйкеліс моделін [41] пайдалануға конфигурацияланды. ℓ құбырының қысым жоғалтуы келесі түрде өрнектеледі:

$$\Delta p_\ell = \left(f_\ell \frac{L_\ell}{D_\ell} + \sum_j \zeta_{j,l} \right) \frac{\rho v_\ell^2}{2}, \quad \Delta p_{unit,\ell} = \frac{\Delta p_\ell}{L_\ell} \tag{2.23}$$

мұндағы f_ℓ – Дарси бойынша үйкеліс коэффициенті; L_ℓ және D_ℓ – сәйкесінше құбырдың ұзындығы мен ішкі диаметрі; $\zeta_{j,l}$ жергілікті шығын коэффициенттерін білдіреді; ρ – сұйықтықтың тығыздығы; және v_ℓ – орташа жылдамдық. Параметрлеуде 0,1 мм кедір-бұдырлық және Fluidit Heat жобасында сақталған құбыр өлшемдері мен жылу беру қасиеттері пайдаланылды [38].

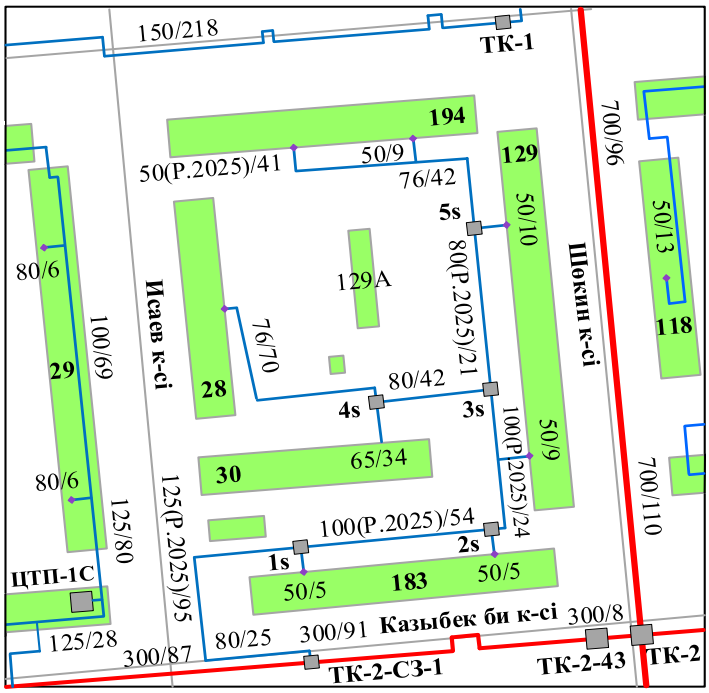
Соңында, SIL циклінің аяқталу ұзақтығы келесідей анықталады:

$$t_{cycle} = t_{read} + t_{map} + t_{sim} + t_{post} + t_{write} \tag{2.24}$$

мұндағы t_{read} – OPC UA кірісін алу уақыты, t_{map} – Python тексеру және салыстыру уақыты, t_{sim} – Fluidit жылуды орындау уақыты, t_{post} – өңдеуден кейінгі нәтиже уақыты, ал t_{write} – PLC кері жазу және кері оқу тексеру уақыты. Әрбір компонент және циклдің аяқталу ұзақтығы бірдей сынақ жағдайларында 10-нан астам қайталанатын жүгірістегі монотонды жоғары ажыратымдылықтағы таймер арқылы өлшенді.

2.4 Зерттелетін телімнің жылу-гидравликалық моделін әзірлеу

Fluidit Heat бағдарламасында модельдеу үшін «Алматы жылу желілері» ЖШС ұсынылған Алматы қаласының орталықтандырылған жылумен жабдықтау желісіндегі зерттелетін телім сұлбасы ұсынылған (2.7-сурет). Компания үйлерге жылу және тұрмысқа қажетті ыстық судың (ЫСЖ) берілуі мен жеткізілуіне және қаланы ұйымдастыру бойынша өндіріске жауап береді. Сұлбада инфрақұрылым, жылу желісіндегі құбырлардың диаметрі мен ұзындығы көрсетілген, ал модельде ТК-2-СЗ-1 құжатынан алынған деректер қолданылды.



Сурет 2.7 – Fluidit Heat бағдарламасында модельдеу үшін орталықтандырылған жылумен жабдықтау желісіндегі телім сұлбасы

2.6-кестеде SCADA «Алматы Жылу желілері» ЖШС жүйесінің тарихи деректері архивтен келтірілген. Бұл деректер TIA Portal жобасында өлшеу аспаптары мен датчикерден кіріс деректер ретінде пайдаланлды. TIA Portal жобасында бұл деректер DB1 «кіріс деректер» деректер блогына енгізілген (2.6, а-сурет).

Кесте 2.6 – ТК 2-СЗ-1 телімі үшін SCADA тарихи деректері

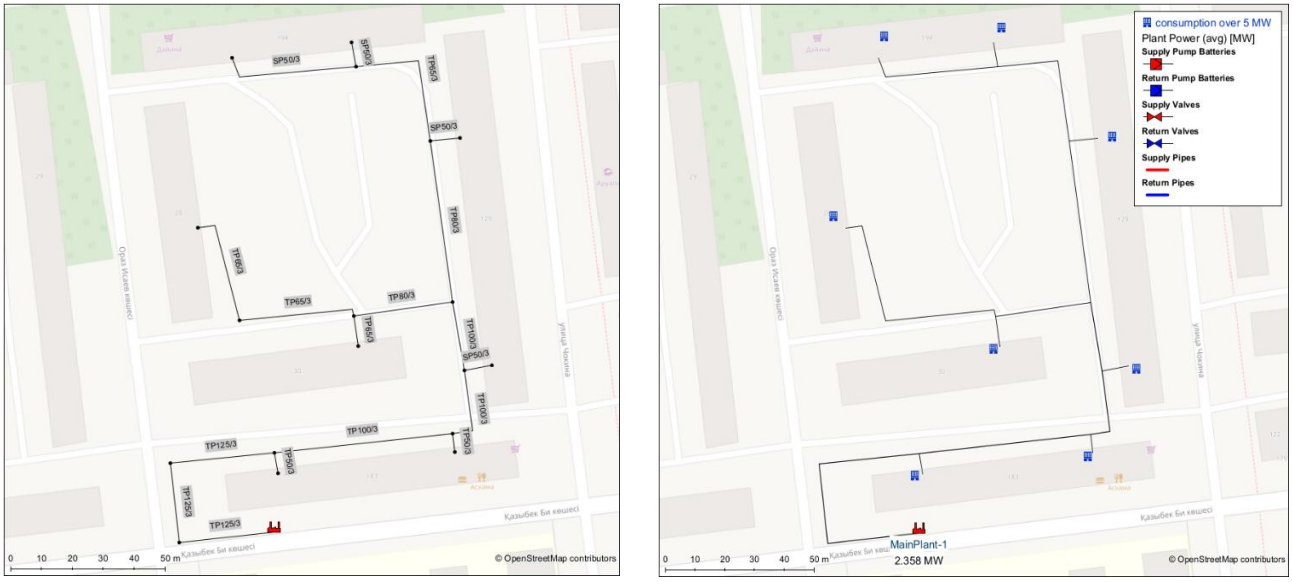
№	Мекен-жайы	Жылумен жабдықтау, Гкал	Ыстық сумен жабдықтау, Гкал	Электрлік тораптағы қысым
1	Қазыбек би көшесі, 183 үй	0,373059	0,141456	Р1 – 8,2; Р2 – 4,0
2	Исаев көшесі, 30 үй	0,235181	0,06048	Р1 – 7,8; Р2 – 3,7
3	Шөкин көшесі, 129 үй	0,470968	0,100389	Р1 – 7,8; Р2 – 3,7
4	Әйтке би көшесі, 194 үй	0,305275	0,07344	Р1 – 7,5; Р2 – 3,5
5	Исаев көшесі, 28 үй	0,221234	0,05616	Р1 – 7,8; Р2 – 3,7

2.7-кестеде таңдалған ауданға сәйкес Fluidit Heat бағдарламасында модельдеу үшін қолдануға арналған климаттық және температуралық параметрлер келтірілген (сурет 8).

Кесте 2.7 – Модельдеуге арналған жылу желісінің климаттық және температуралық параметрлері

№	Параметрлер	Мәні
1	Құбырларды төсеу жылы	2025
2	Берілетін судың температурасы	+95 °C
3	Тұтынушы жағынан кері қайтарылатын судың температрасы	+47 °C
4	Алматы қаласының топырақ температурасы	+10 °C
5	Сыртқы ауаның есептік температурасы	-20,1 °C

2.8-суретте Fluidit Heat бағдарламасында екі қарау режимі көрсетілген. «Құбыр материалы» қарау режимінде құбырлардың типтері мен номиналды диаметрлері, ал «Желі» қарау режимінде желі топологиясы және негізгі гидраликалық компоненттер бейнеленген.

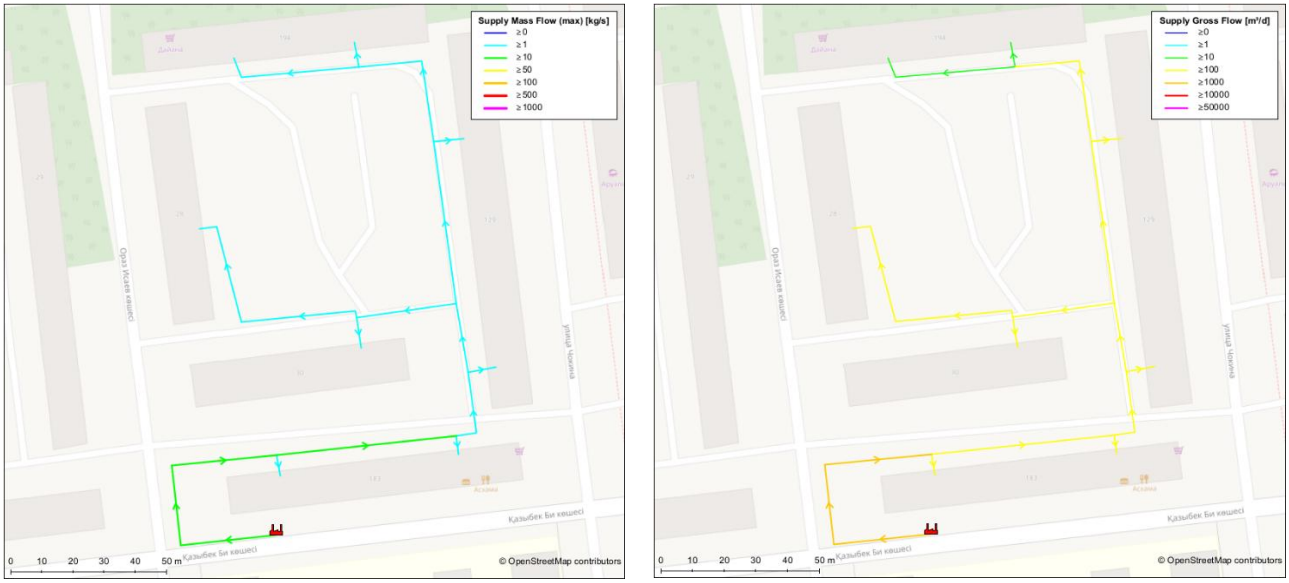


(а) **(ә)**

Сурет 2.8 – Fluidit Heat бағдарламасында орталықтандырылған жылумен жабдықтаудың модельденген желі сызбаларының түрі

Мұнда құбыр түрлері және номиналды диамтрлері, «Pipe Material» терезесіндегі сипаты (а), сонымен қоса «Network» терезесінде бейнеленген негізгі компоненттер (ә) көрсетілген.

2.9-суретте жылу тасымалдағыш ағынының бағыты мен кеңістікте таратылуын визуализациялау үшін Fluidit Heat бағдарламасындағы сызбаның екі күйі көрсетілген. «Supply Mass Flow» терезесінде максималды салмақтық шығын, «Supply Gross Flow» терезесінде тиісті тәуліктік көлемдік шығын бейнеленеді.



(**а**) (**ә**)

Сурет 2.9 – Fluidit Heat бағдарламасында жобаланатын желінің күйі: «Supply Mass Flow»терезесінде (а) бейнеленген кг/с максималды салмақ шығыны және «Supply Gross Flow» терезесінде (ә) көрсетілген $м^3$/тәулікке берудің тәуліктік жалпы шығыны берілген

2.10-суретте Fluidit Heat моделінің екі қосымша күйі ұсынылған. «Available Free Power Capacity» (қолжетімді бос қуат) күйі желі бойынша орташа еркін қуаттың кеңістікте таратылуын көрсетеді, «Scenario changes» (Сценарийді өзгерту) күйі өзгермеген, жаңадан қосылған және модификацияланатын тораптар мен құбырларды ерекшелейді.



(**а**) (**ә**)

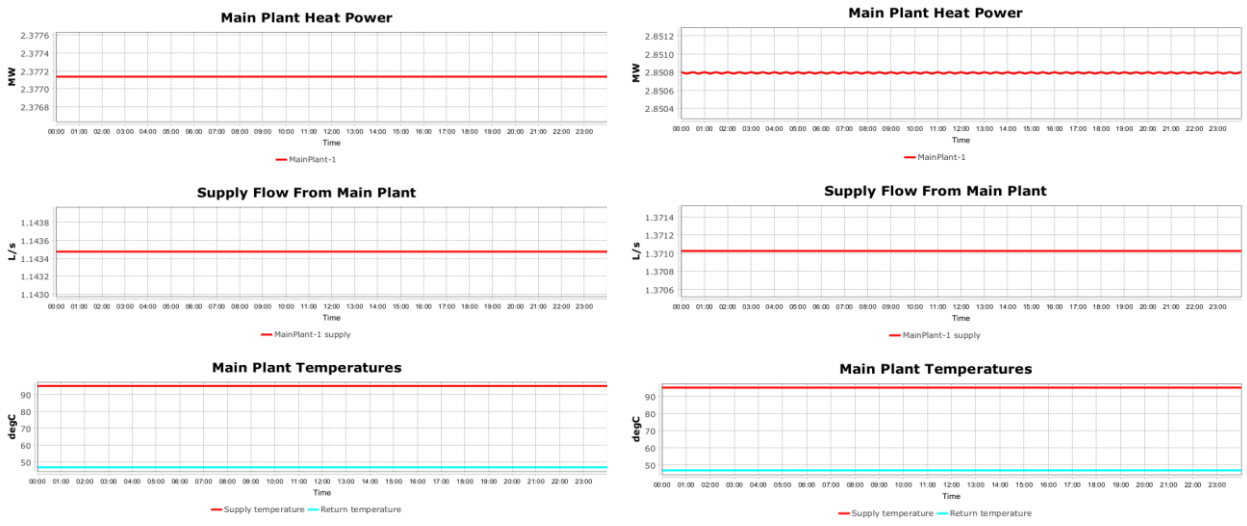
Сурет 2.10 – Fluidit Heat бағдарламасының сызбасында орталықтандырылған жылумен жабқтаудың моделденетін желісінің күйі: «Available Free Power Capacity» (а) терезесінде бейнеленетін орташа еркін қуат және «Scenario changes» (ә) терезесінде бейнеленетін тораптар мен құбырлардың күйі

Fluidit Heat бағдарламасында жүйенің термогидравликалық күйін зерттеу үшін алты пайдалану сценарийлері құрылды:

- «Ғимаратты жылыту»;
- «Ыстық сумен қамту»;
- «Жылыту және ыстық сумен жабдықтау»;
- «90 °С төмен беру температурасы»;
- «Төмен қысым көрсеткіші 3 бар»;
- «Жоғары сұраныс 120 %».

Бастапқы екі сценарий ғимараттарды жылытуға және ыстықсумен жабдықтауға жүктеменің жеке құны үшін арналған. «Жылыту және ыстық сумен жабдықтау» сценариі олардың біріккен жұмысын модельдейді және стандартты базалық режим ретінде қабылданған. «90 °С төмен беру температурасы» сценариі жылу режимі мен жылудың жоғалуына берілетін температураның төмендеуіне әсер етуді бағалау үшін, ал «Төмен қысым көрсеткіші 3 бар» сценариі қолжетімді төмендетілген қысым кезіндегі желі жұмысын талдау үшін қолданылады. «Жоғары сұраныс 120 %» сценариі ғимаратты жылыту мен ыстық сумен жабдықтаудың шығыс жүктемесі 20 % арттандағы жүктемелік сынақты көрсетеді.

2.11-суретте жылу жүктемесінің 20-пайызға үлкейтілгендегі негізгі жұмыс параметрлерінің өзгеруі ұсынылған. Қондырғының жылу қуаты және берілетін жылу тасымалдағыштың шығыны пропорционалды түрде артып отырады, сонда беру және кері ағын температурасы аса өзгермеген болып қалады.

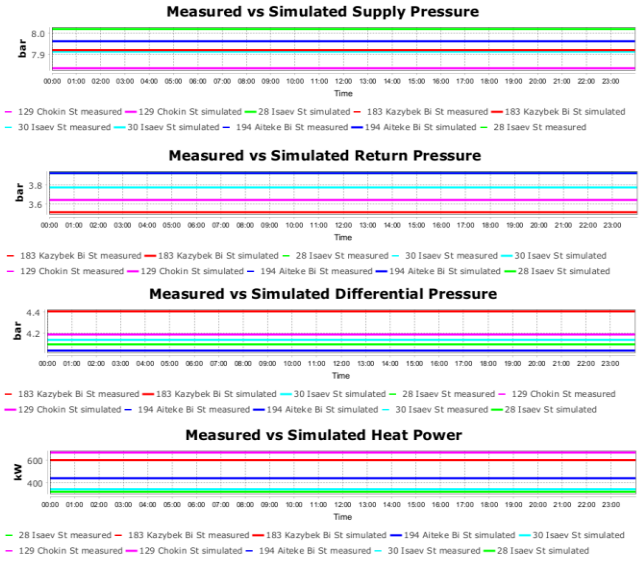


(а) (ә)

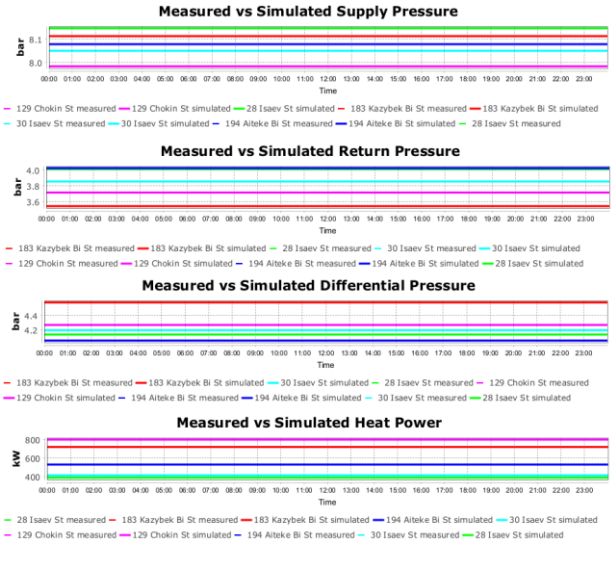
Сурет 2.11 – Қалыпты жұмыс сценарийі (а) және 120% жылу сұранысы сценарийі (ә) үшін негізгі қондырғының жылу шығысының, жабдықтау ағынының жылдамдығының және жеткізу және қайтару температурасының уақыт профильдері

Қалыпты жұмыс сценарийі үшін анықтамалық мәндер орталықтандырылған жылу желісінің нақты жұмыс деректерінен алынды (2.4-кесте) және БЛК-ге жүктелді. 2.12-суретте осы өрістен алынған анықтамалық мәндер сұйықтықтың жылуын модельдеудің сәйкес нәтижелерімен

салыстырылады.



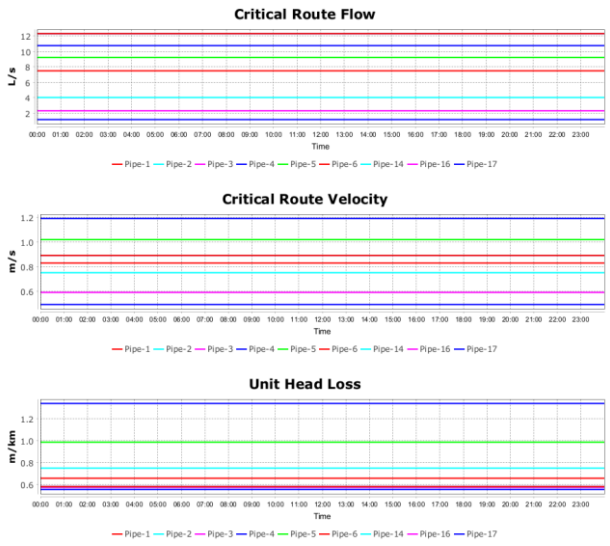
(**а**)



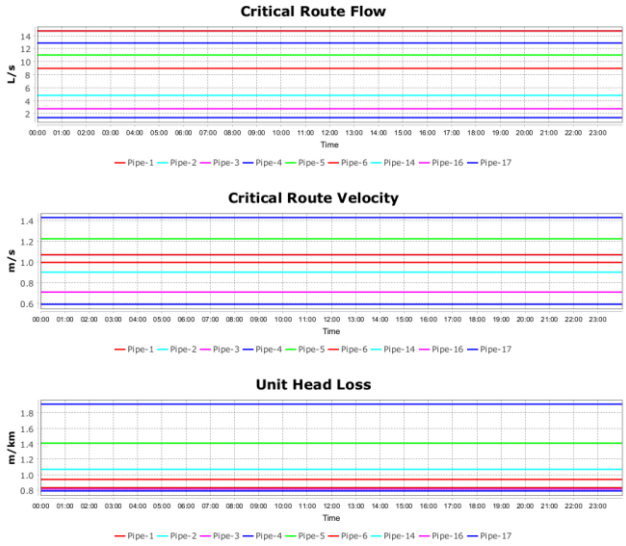
(**ә**)

Сурет 2.12 – Далалық мәліметтерден алынған анықтамалық мәндерді және Fluidit Heat бағдарламасында беру қысымы, кері ағын қысымы, қысымның түсуі мен қалыпты жұмыс режиміндегі (а) жылу қуатын және сценарийді есептеу шарттарында 120-пайыздық жылу жүктемесінің артуы бағдарламасында (ә) модельдеу нәтижелерін эталондық мәндермен салыстыру

2.13-суретте таңдалған бағыттың жылу жүктемесіне гидравликалық әсері көрсетілген. Жылу жүктемесі 120 % болған сценарий кезінде шығын мен ағын жылдамдығы артады, ал максималды қысымның меншікті айырмашылығы шамамен 1,3 бардан 1,9 бар/км дейін өседі.



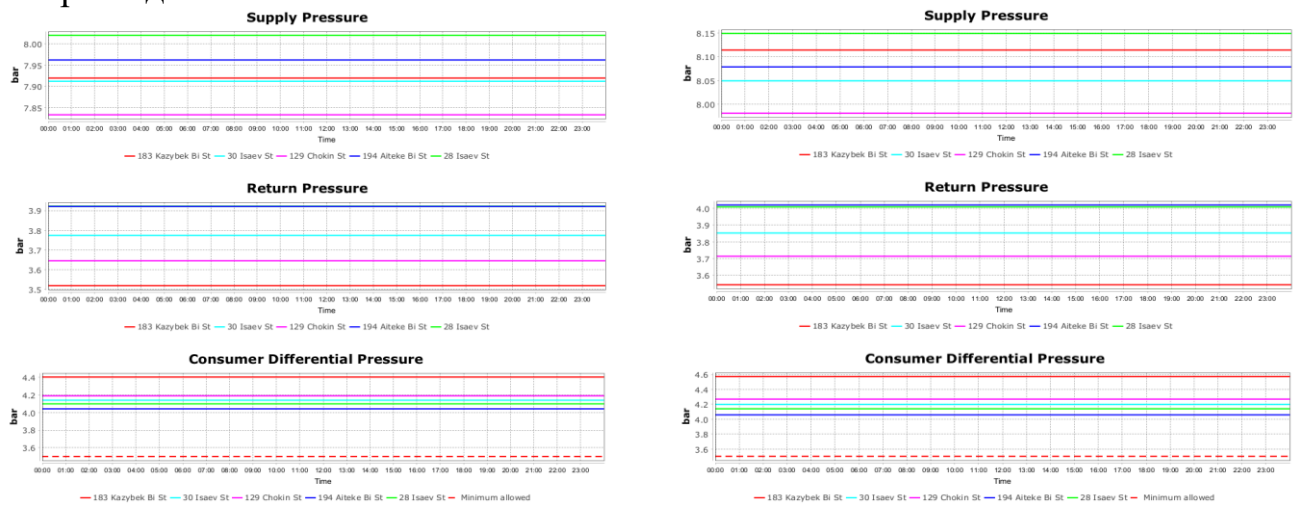
(**а**)



(**ә**)

Сурет 2.13 – Қалыпты жұмыс сценарийі (а) және 120% жылу жүктемесі сценарийі (ә) үшін критикалық маршрут бойындағы құбырлардағы ағынның жылдамдығы, ағын жылдамдығы және меншікті қысым айырмашылығының уақытша профильдері

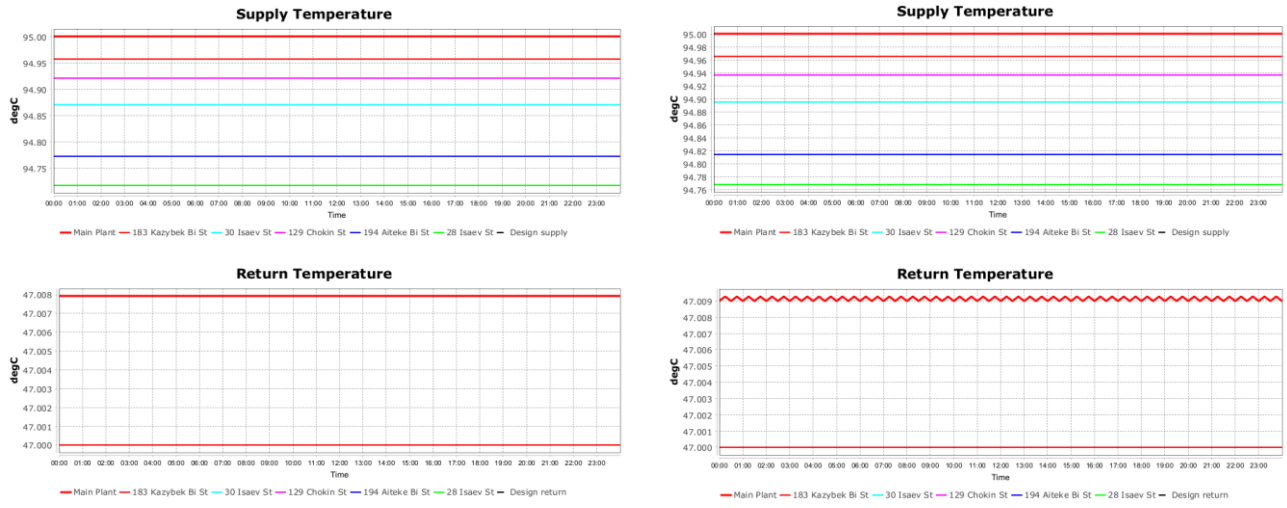
2.14-суретте бақыланатын торап-тұтынушылардығы қысымның таратылуын салыстыру келтірілген. Гидравликалық жүктеменің артуына қарамастан барлық тораптардағы қысымның төмендеуі екі сценарийде де қабылданған минимал 3,5 бар шектеуден жоғары болып қалады, ол модельденетін талаптардың қысымға қатысты талаптардың қадағалнатынын көрсетеді.



(**а**) (**ә**)

Сурет 2.14 – Жеткізу және қайтару желілеріндегі уақытша қысым профильдері, сонымен қатар қалыпты пайдалану сценариі үшін бақыланатын торап-тұтынушылардығы қысымның төмендеуі (а) және жылу жүктемесі 120 % болатын сценарий (ә). Үзік сызық қысымның минимал рұқсат етілген төмендеуін білдіреді

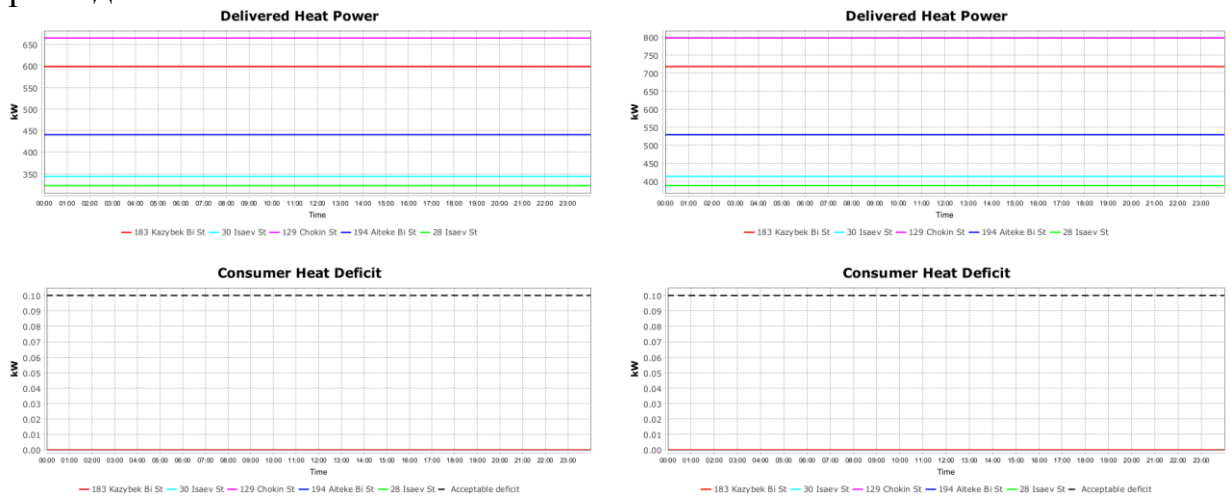
2.15-суретте беру және кері ағын температурасы жалпы барлық модельдеу периодында тұрақты екені көрініп тұр. Басты станция мен тұтынушы тораптарының арасындағы шамалы ауытқулар беру температурасының берілген мәнінің өзгеру есебінен емес, 120 % деңгейдегі жылуға сұраныс негізінен шығынды арттыру кезінде қанағаттанарлық екенін көрсетеді.



(**а**) (**ә**)

Сурет 2.15 – Басты станция мен тұтынушы тораптарда беру температурасы мен кері ағынның уақыттық профильдері

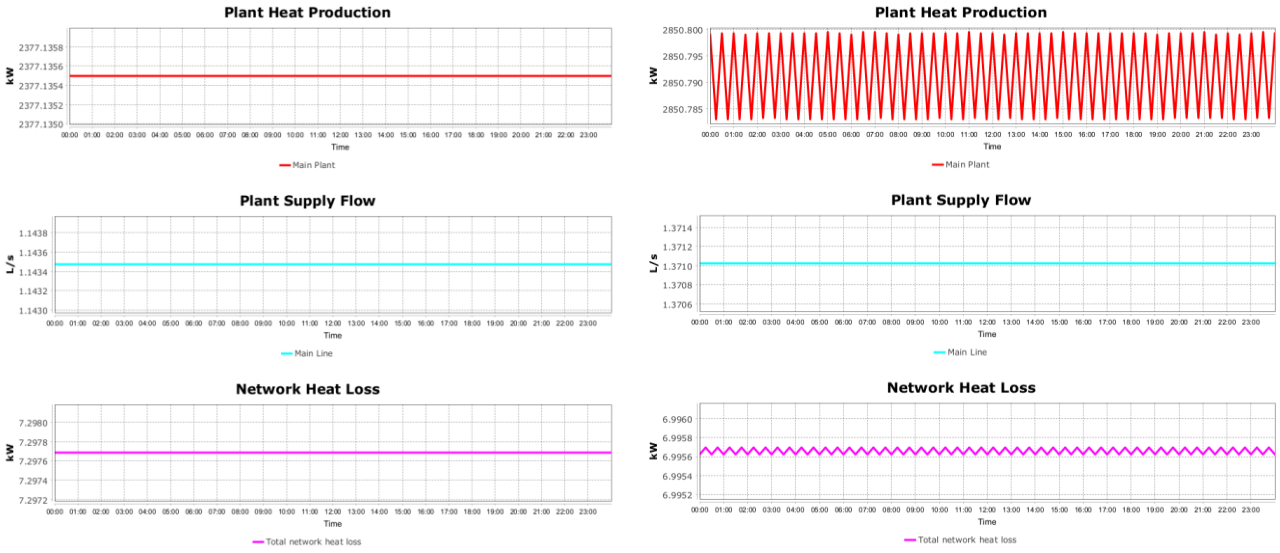
Жеткізілетін жылу қуаты мен тұтынушылардағы жылудың жетіспеушілігі 2.16-суретте көрсетілген. Жылу сұранысының 120 % дейін артуы барлық тұтынушы тораптарындағы жеткізілетін қуаттың пропорциоанлды артуына алып келеді, ол кезде жылу жетіспеушілігінің есебі екі сценарий бойынша да нолге тең болып қалады. Үзік сызық жылу жетіспеушілігінің рұқсат етілген шегін көрсетеді.



(**а**) (**ә**)

Сурет 2.16 – Берілетін жылу қуатының және қалыпты пайдалану сценариі үшін бақыланатын торап-тұтынушылардығы қысымның төмендеуі (а) және жылу жүктемесі 120 % болатын сценарий (ә) үшін жылу жетіспеушілігінің уақыттық профильдері

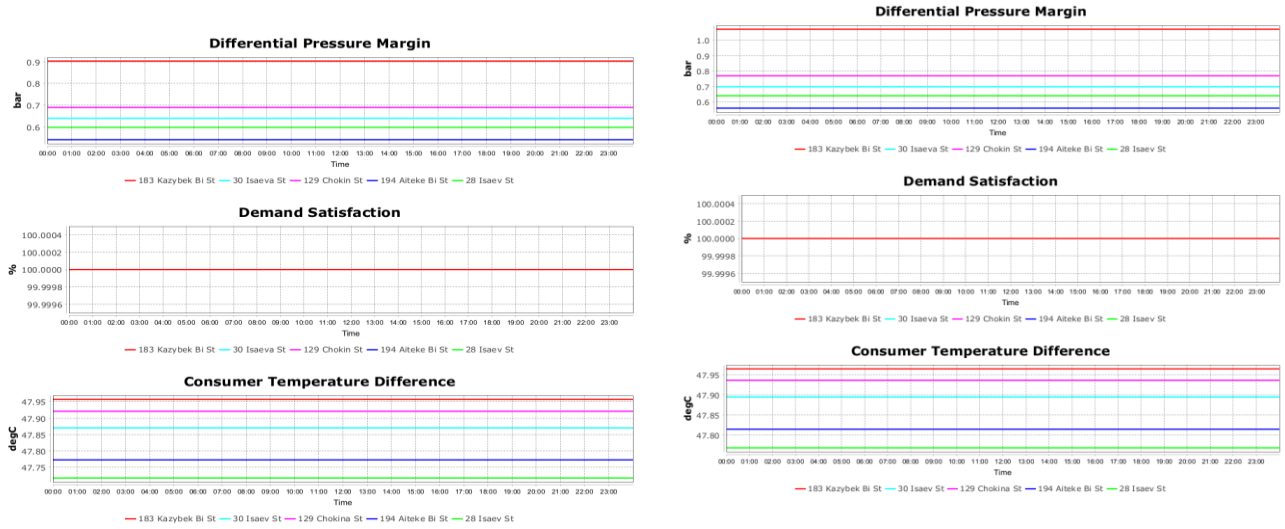
2.17-суретте электртұтынудың өзгеруіне жүйеніңреакциясы туралы жиынтық ақпарат келтірілген. Станцияның жылу қуаты шамамаен 2,38 ден 2,85 МВт дейін артады, ол жалпы жылудың жоғалуы желіде шамамен 7 кВт болатын берілген сұраныстың 20 % артуына сәйкес келеді.



(**а**) (**ә**)

Сурет 2.17 – Станцияның жылу қуатының, берілетін жылу тасымылдағыштың шығыны қалыпты пайдалану сценариі (а) және желідегі жылу жүктемесі 120 % болатын сценарий (ә) үшін жылу жетіспеушілігінің уақыттық профильдері

2.18-суретте тұтынушыларға қызмет көрсету сапасының салыстырмалы көрсеткіштері келтірілген. Барлық бақыланатын тораптарда екі пайданалу сценариінде де қысымның төмендеуінің оң қорлары, 100 %-дық сұранысты қанағаттандыру мен беру және кері ағынның тұрақты әр түрлі температуралары сақталады.

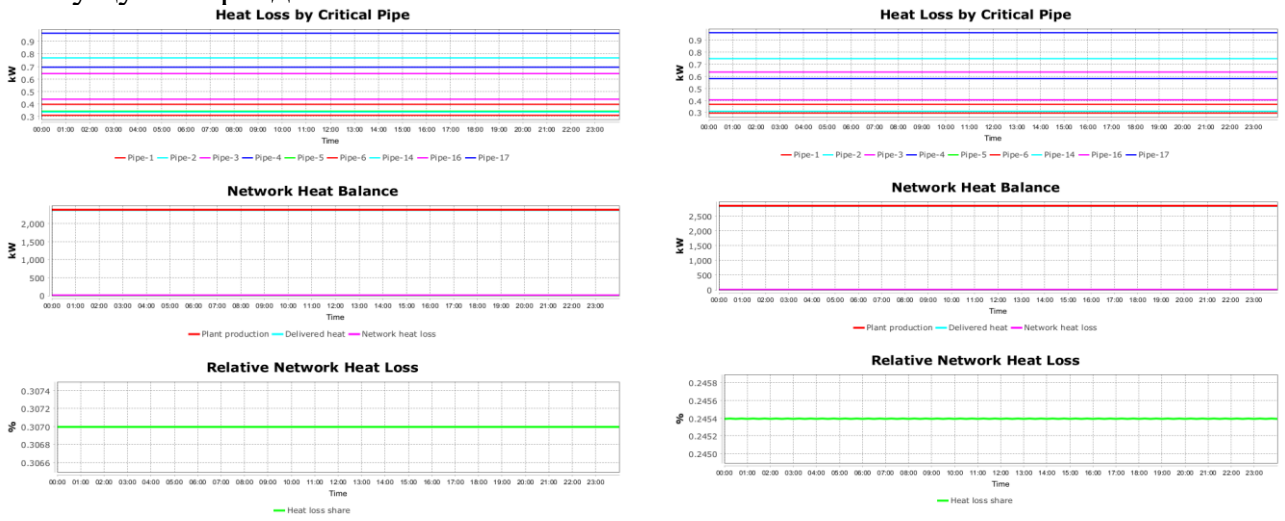


(**а**) (**ә**)

Сурет 2.18 – Тұтынушыларға қызмет көрсету сапасының уақыттық профильдері

Мұнда қысымның төмендеуінің оң қорлары, жылуға деген сұраныстың қанағаттандыру дәрежесі және бақыланатын торап тұтынушылардағы қалыпты пайдалану сценарии (а) және желідегі жылу жүктемесі 120 % болатын сценарий (ә) үшін беру және кері ағын температурасының түрлілігі көрсетілген.

2.19-суретте критикалық бағдар мен желінің жалпы жылу балансындағы жылудың жоғалуының бөлінуі көрсетілген. Желідегі жылудың жоғалуы іс жүзінде тұрақты болып қалатындықтан, олардың салыстырмалы үлесі 0,307 % дан 0,245 % дейін төмендейді, себебі, 120 % сұраныс сценарии кезінде берілетін жылу қуаты артады.



(**а**) (**ә**)

Сурет 2.19 – Критикалық бағыт бойымен құбырлардағы жылу жоғалуының

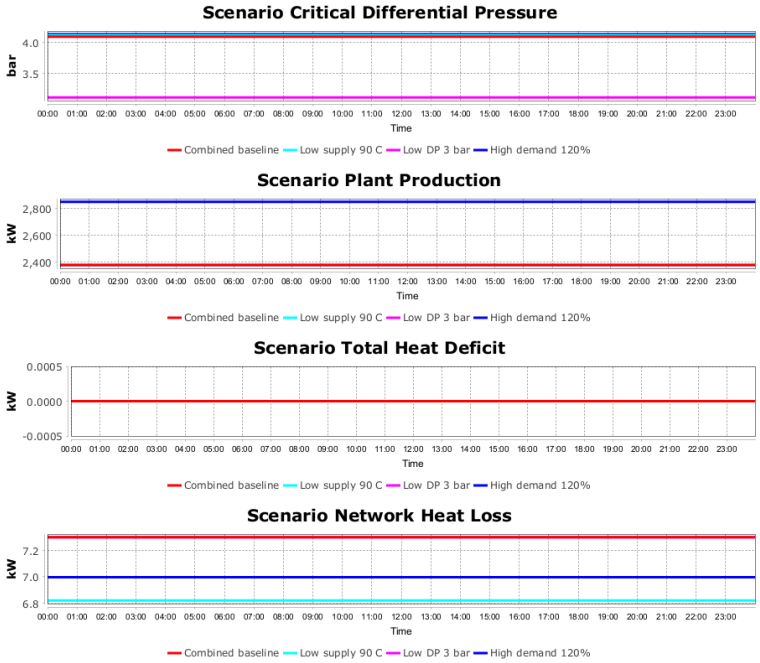
уақыттық профилі, желінің жалпы жылу қоры және қалыпты пайдалану сценарии (а) және желідегі жылу жүктемесі 120 % болатын сценарий (ә) үшін желінің салыстырмалы жылудың жоғалуы

2.20-суретте қалыпты және жоғары жылу тұтыну шарттарындағы кеңістіктік гидравликалық таратулар салыстырылады. Жылу шығынының 120% дейін артуы қысымның минимал төмендеуі кезінде қабылданған шектік мәннен жоғары болатын жоғары жылдамдықты диапазонда бірнеше құбырлар учаскесіне және қысымның жоғары меншікті шығынана өтуіне алып келеді.



Сурет 2.20 – Орталықтандырылған жылумен жабдықтау желісінің гидравликалық күйін қалыпты пайдалану сценарии (а) және желідегі жылу сұранысы 120 % болатын сценарий (ә) үшін салыстыру: минималды қысым айырмашылығының кеңістіктік таралуы, қысымның максималды меншікті құлауы мен берілетін желідегі сызық максимал ағын жылдамдығы, сонымен қатар критикалық бағыт бойымен жеткізу және қайтару желілеріндегі қысым профильдері

Аралас сценарийлердің салыстырылуы 2.21-суретте көрсетілген. Төмендетілген температуралы беру сценариі желідегі ең аз жылудың жоғалуын қамтамасыз етеді, 3 бар қысымның төмендеуі сценарийі қол жетімді гидравликалық қорды азайтады, 120 %-дық сұранысы бар сценарий станцияның максимал жылу қуатын талап етеді. Зерттелген сценарийлердің ешқайсысында жылу тапшылығы байқалмайды.



Сурет 2.21 – Негізгі сценарий үшін қысымның критикалық дифференциалын, станцияның жылу қуатын, жалпы жылу тапшылығын және желідегі жылудың жоғалуын төмен беру температурасы (90 °C), төмен қысым дифференциалы (3 бар) және жоғары жылу сұранысы (120%) сценарийлерін салыстыру

Қалыпты жүктеме және жоғарғы сұраныс кезінегі жұмыс сценарийлері үшін алынған негізгі термогидравликалық көрсеткіштер 2.8-кестеде ұсынылған.

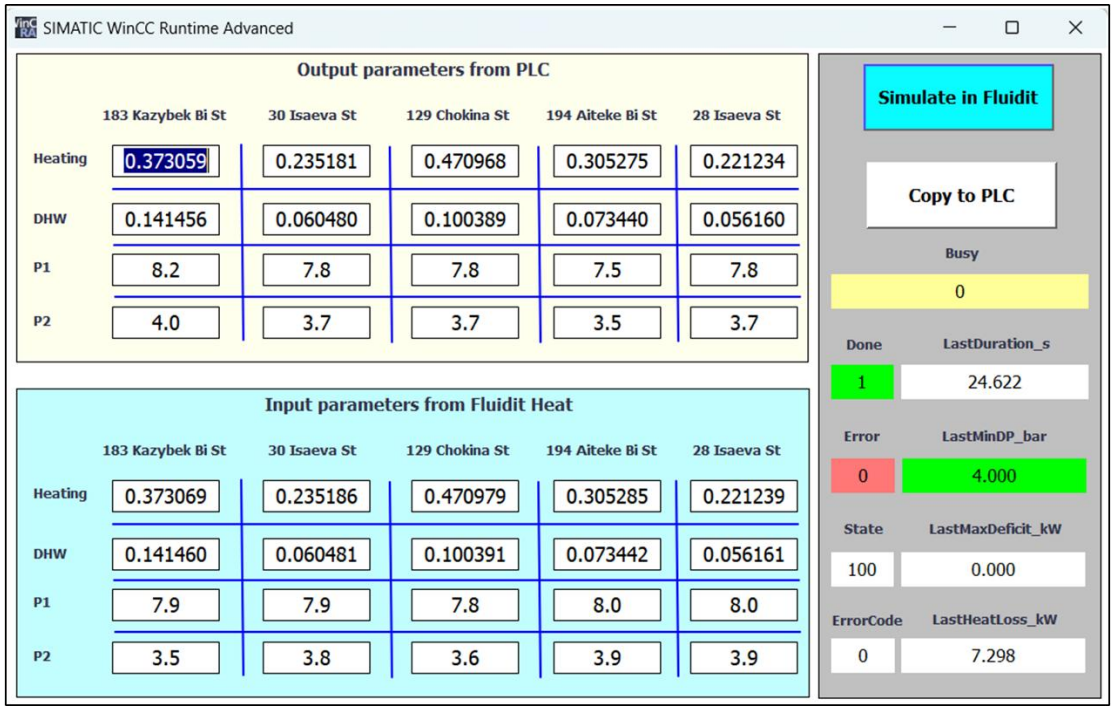
Кесте 2.8 – «Жылыту және ыстық сумен жабдықтау» және «Жоғары сұраныс 120%» сценарийлеріндегі кілттік термогидравликалық көрсеткіштерді салыстыру

№	Параметрлер	Қалыпты жүктеме, 100%	Жүктеменің артуы, 120%	Өзгеруі
1	Тұтынушыларға жеткізілетін жалпы жылу, кВт	2369.8	2843.7	+20.0%
2	Зауыттың жылу өндірісі, кВт	2,377.14	2,850.79	+19.93%
3	Таңдалған сыни бағыт бойынша ағынның максималды жылдамдығы, л/с	12.5	15.0	+20.0%
4	Таңдалған критикалық бағыт бойынша ағынның максималды жылдамдығы, м/с	1.20	1.43	+19.2%
5	Бірлік қысымының максималды жоғалуы, бар/км	1.35	1.91	+41.5%

2.8-кестенің жалғасы

6	Тұтынушының ең төменгі дифференциалды қысымы, бар	4.03	4.05	+0.02
7	Тұтынушының максималды дифференциалды қысымы, бар	4.40	4.58	+4.1%
8	Зауыттың қоректену температурасы, °C	95.0	95.0	0
9	Тұтынушылармен жабдықтаудың минималды температурасы, °C	94.72	94.77	+0.05 °C
10	Қайтару-судың температурасы, °C	47.0	47.0	өзгермейді
11	Желілік жылу шығыны, кВт	7.298	6.996	−4.14%
12	Салыстырмалы желілік жылу шығыны, %	0.307	0.245	−0.062%
13	Тұтынушылардың ең жоғары жылу тапшылығы, кВт	0	0	өзгермейді

2.22-суретте цифрлық егізді қолдана отырып, сараптамалы модельдеу циклін үйлестіру және мониторингі үшін өңделген WinCC Runtime интерфейсі көрсетілген. Панельдің жоғарғы жағында объектіде алынған және БЛК-да сақталған тірек параметрлері, ал төменгі панельде Fluidit Heat бағдарламасымен есептелген сәйкес мәндер бейнеленеді. Интерфейс модельдеуді іске қосу үшін және БЛК-ға қайта есептелген мәндерді беру үшін басқару элементтерінен, сондай-ақ, орындалу мәртебесінің индикаторларынан, уақыттық есептеулерден, қысымның минимал төмендеуінен жылудың максимал тапшылығынан және желілік жылу жоғалуларынан тұрады.



Сурет 2.22 – «БЛК – цифрлық егіз» сараптамалы модельдік циклін бақылау үшін WinCC Runtime нтерфейсі: БЛК-дан оқылатын тірек параметрлері, Fluidit Heat-ке қайтарылатын модельдеу нәтижелері, орындалатын басқару элементтері және диагностикалық индикаторлар

SIL циклінің ұзақтығын статистикалық сипаттау үшін сол SCADA арқылы іске қосылған сценарий модель, бағдарламалық қамтамасыз ету, байланыс және аппараттық конфигурациялар бірдей жағдайда 10 рет орындалды. Таймер Python қызметі қабылданған SCADA сұранысын өңдеуді бастағанда іске қосылып, Fluidit Heat нәтижелері БЛК-ға жазылып, сәтті кері оқылғаннан кейін тоқтатылды. Құрамдас бөліктердің уақыттары (2.24) теңдеуіне сәйкес өлшенді. Нәтижелер 2.9-кестеде келтірілген.

Кесте 2.10 – 10 рет қайталап орындау барысындағы SIL циклінің құрамдас бөліктері бойынша орындалу уақыттары

Орындаулар саны	t_read, s	t_map, s	t_sim, s	t_post, s	t_write, s	t_cycle, s
1	0.074	0.210	24.178	0.000073	0.145	24.608
2	0.066	0.147	23.241	0.000032	0.141	23.596
3	0.062	0.139	22.613	0.000037	0.139	22.954
4	0.066	0.123	23.465	0.000033	0.138	23.792
5	0.066	0.138	23.603	0.000025	0.145	23.951
6	0.067	0.145	22.092	0.000023	0.136	22.440
7	0.064	0.199	23.946	0.000032	0.139	24.348
8	0.063	0.151	22.128	0.000038	0.142	22.484
9	0.066	0.147	21.945	0.000031	0.138	22.296
10	0.064	0.139	24.274	0.000052	0.145	24.622
Mean ± SD	0.066 ± 0.003	0.154 ± 0.028	23.148 ± 0.893	0.000038 ± 0.000015	0.141 ± 0.003	23.509 ± 0.907

Нәтижелер қайталап орындаулар барысында SIL циклінің тұрақты орындалатынын көрсетеді. Fluidit симуляциясы жалпы ұзақтықтың шамамен 98,5%-ын құрады, сондықтан есептеу бөлігінің басым компоненті болды. OPC UA байланысы, деректерді валидациялау және сәйкестендіру, өңдеуден кейінгі өңдеу және БЛК-ға тексерілген кері жазу бірге цикл ұзақтығының тек шамамен 1,5%-ын ғана құрады. Осылайша, орындау өнімділігін одан әрі жақсарту байланыс және деректерді өңдеу кезеңдеріне емес, ең алдымен модельді жүктеуге және Fluidit симуляциясына бағытталуы керек.

2.5 SIL концепциясына негізделген жылумен жабдықтауды зияткерлік басқару жүйесі моделінің формалды верификациясы

SIL концепциясына негізделген жылумен жабдықтау жүйесінің цифрлық егіз компоненттерінің арасында өзара әрекеттесу алгоритмдерінің дұрыстығын тексеру үшін UPPAAL ортасында модель жасалды. Жылумен жабдықтаудың виртуалды объектісін біріктіретін, логикалық контроллерді, SCADA-жүйесін, технологиялық деректер архивін, интеграциялық модульді және термогидравликалық Fluidit Heat цифрлық егізді Python тілінде бағдарламалайтын модель дискретті-оқиғалық және автоматтандырылған басқару жүйесінің уақыттық логикасын зерттеу үшін арналған.

Уақыттық автоматтар желісі. Цифрлық егіздің архитектурасы ортақ айнымалылар мен синхрондау арналары арқылы байланысатын параллель уақыттық автоматтар желісімен беріледі [2].

$$\mathcal{N}(\Theta) = \|_{i \in \mathcal{J}} \ \mathcal{A}_i(\Theta) \tag{2.25}$$

Мұндағы $\mathcal{J}$ жиынына Scenario, Plant, PLC, HMI, Archive, Integration, Twin және Observer компоненттері кіреді; Θ – уақыттық параметрлер жиыны. Әр компонент келесі құрылыммен сипатталады.

$$\mathcal{A}_i \ = \ (L_i, {l_i}^0, X_i, V_i, \Sigma_i, E_i, I_i, K_i) \tag{2.26}$$

мұндағы L_i – күйлер жиыны, ${l_i}^0$ – бастапқы күй, X_i – сағаттар, V_i – айнымалылар, Σ_i – синхрондау оқиғалары, E_i – ауысулар, I_i – инварианттар, K_i – committed күйлері. Компоненттердің бастапқы күйлері тиісінше Warmup, Operating, Idle, Waiting, Available, Idle, Idle және Idle, ал бастапқы сағат мәндері нөлге тең. Желінің жалпы күйі компоненттердің ағымдағы күйлерімен, сағат мәндерімен және дискретті айнымалылармен анықталады. Уақыт өткенде белсенді сағаттар бірдей өседі, инварианттар орындалуы тиіс, ал committed күйінде уақыт ілгерілемейді. Синхрондау жіберуші мен қабылдаушының сәйкес ауысуларын бір мезгілде орындайды [2, 3].

Бастапқы модельде PLC.PublishOPC, Integration.RequestSQL, Evaluate, AlarmRaised, SendSafe және Optimise күйлері committed ретінде берілген. Сондықтан бұл күйлерде уақыт өтпейді және келесі рұқсат етілген ауысу дереу орындалуы тиіс. Оларға қосымша күту уақытын енгізу формалды модельдің логикасын өзгертеді.

Модельдегі логикалық белгілер мен олардың UPPAAL айнымалыларының сәйкестігі 2.11-кестеде берілген.

Кесте 2.11 – Математикалық белгілердің UPPAAL айнымалыларымен сәйкестігі

Белгі	UPPAAL айнымалысы	Мағынасы
A	anomaly_active	Сценарийде енгізілген ақаудың белсенді белгісі
V	data_valid	Өлшемдердің сенімділігі
O	opc_online	OPC UA арнасының қолжетімділігі
S	sql_online	SQL сервисінің қолжетімділігі
F	fluidit_online	Fluidit сервисінің қолжетімділігі
A_T	twin_anomaly	Twin нәтижесіндегі аномалия белгісі
H	archive_valid	Архивтік деректің бар болуы
λ	alarm_active	Дабылдың белсенді белгісі
M	safe_mode	Қауіпсіз режим белгісі
C	command_applied	Команданың қолданылғанын растау
U	optimised_command	Оңтайландыру командасының қолданылған белгісі
Z	unsafe_command	Рұқсат етілмеген команда немесе күту шегінің асуы
B	response_deadline_missed	Жауап беру шегінің бұзылу белгісі

А айнымалысын сценарий генераторы орнатады; Integration және Twin оны ортақ белгі ретінде оқиды. Сондықтан модель аномалияны анықтау алгоритмінің дәлдігін бағаламайды. H архивтік деректің бар екенін ғана көрсетеді және оның жасын не ағымдағы циклге сәйкестігін тексермейді. S бастапқы сценарийлерде false мәніне ауыстырылмайды; SQL-дің жеке істен шығу сценарийі енгізілмеген.

Сандық мәндердің орнына қолданылатын символдық уақыт параметрлері 2.12-кестеде көрсетілген.

Кесте 2.12 – Сандық мәндердің орнына қолданылатын символдық параметрлер

Белгі	UPPAAL тұрақтысы	Қызметі
T_s	SAMPLE_PERIOD	Operating күйінде өлшемді жіберуге дейінгі уақыт
T_{inj}	FAULT_INJECTION_TIME	Warmup күйінде сценарийді таңдау мезеті
T_r	PLC_READ_MAX	PLC оқу операциясының жоғарғы шегі
T_c	PLC_COMMAND_MAX	PLC команда дайындауының жоғарғы шегі
T_w	SQL_WRITE_MAX	Архивке жазудың жоғарғы шегі
T_h	SQL_READ_MAX	Архивтен оқудың жоғарғы шегі
T_y	PYTHON_PROCESS_MAX	Python өңдеуінің жоғарғы шегі
T_f^-	FLUIDIT_RUN_MIN	Twin есептеуінің төменгі шегі
T_f^+	FLUIDIT_RUN_MAX	Twin есептеуінің жоғарғы шегі
T_a	ACTUATION_MAX	Команданы қолданудың жоғарғы шегі
D_c	COMMAND_DEADLINE	Объектінің команданы күту шегі
D_r	RESPONSE_DEADLINE	Ақауға жауап берудің шегі
T_{reset}	RESET_DELAY	Растаудан кейінгі қалпына келтіру кідірісі
δ	Қысқа операциялардағы ортақ бірлік кідіріс	Модельдегі ортақ төменгі уақыт шегінің символдық атауы

Қысқа операциялардың ұзақтығы төменгі δ шегі мен тиісті жоғарғы T_j шегі аралығында болады:

$$\delta \leq t_j \leq T_j, \quad j \in \{r, c, w, h, y, a\} \tag{2.27}$$

Twin есептеу уақыты T_f^- және T_f^+ аралығымен шектеледі. Барлық жоғарғы шектер теріс емес және тиісті төменгі шектен кем болмауы тиіс. Бұл параметрлер өлшенген секундтық уақыт емес, UPPAAL моделіндегі уақыттық шектеулердің символдық белгілері.

Сценарий және деректер маршруты. Scenario автоматы Warmup күйінен кейін штаттық немесе ақаулық тармақты іске қосады. Сценарий T_inj мезетінде таңдалады; Plant Operating күйінде өлшем field_data оқиғасымен әр циклдің T_s мезетінде жіберіледі, ал reset_all оқиғасы Resetting күйінде T_reset кідірісінен кейін Plant пен Observer автоматтарын бастапқы жұмыс режиміне қайтарады. SENSOR_FAULT кезінде V=false, OPC_FAULT кезінде O=false, FLUIDIT_FAULT кезінде F=false орнатылады; PROCESS_FAULT ақау белгісін белсендіреді. Процестік ақау физикалық теңдеудегі сандық өзгеріспен

берілмейді. load_mode тек жүктеме сценарийінің белгісі болып табылады және бастапқы модельдегі шешім ережесі мен уақыттық шектерді өзгертпейді.

PLC деректер бағытын O белгісіне сәйкес таңдайды:

$$R = \begin{cases} \text{OPC UA} & O = true \\ \text{SQL} & O = false \end{cases} \quad (2.28)$$

$O = true$ болса OPC UA негізгі бағыты, $O = false$ болса SQL резервтік бағыты таңдалады. OPC ақауы транзакция басталғаннан кейін енгізілсе, ағымдағы алмасу негізгі маршрутпен аяқталуы мүмкін. Резервтік сұрау Archive.Available күйінде ғана қабылданады. SQL жауабының сәттілік шарты:

$$SQL_{ok} = S \wedge H \quad (2.29)$$

Мұндағы S – SQL қолжетімділігі, H – архивтік жазбаның бар болуы. Шарт орындалмаса, sql_fail оқиғасы Integration.AlarmRaised күйіне ауыстырады. Бастапқы модель архивте жаңа жазбаның пайда болуын міндетті түрде күтпейді және қалпына келтіру функциясы H белгісін тазартпайды.

Аномалия және басқару командасы. Twin Running күйінің инварианты $f \leq T_f^+$, ал ResultsReady немесе Failed тармағына өтуі $f \geq T_f^-$ болғанда мүмкін. F=false болса twin_fail беріледі; нәтиже сәтті дайындалғанда A_t белгісі A немесе ¬V шарттарының кемінде бірі орындалса белсенді болады. Басқару шешімінің біріктірілген шарты төмендегідей:

$$D = A \vee A_T \vee \neg V \quad (2.30)$$

Мұндағы A – сценарий ақауы, A_T – Twin аномалиясы, V – деректің жарамдылығы. Команда таңдау ережесі:

$$u_{Evaluate} = \begin{cases} u_{safe} & D = true \\ u_{opt} & D = false \end{cases} \quad (2.31)$$

$D = true$ болса дабыл іске қосылып, қауіпсіз команда беріледі; $D = false$ болса оңтайландырылған команда беріледі. sql_fail, twin_fail және Twin жауабының күту шегінен асуы да қауіпсіз тармаққа әкеледі. Қауіпсіз команда қолданылғаннан кейін Plant.SafeHold күйі мен M=true белгісі орнатылады. Оңтайландырылған команда тек A=false және V=true болғанда рұқсат етіледі; осы шарт бұзылған кезде сол команданы қабылдау Plant.Unsafe күйіне әкеледі. Бұл логика үйретілген аномалия детекторы емес, UPPAAL моделінде берілген дискретті шешім ережесі.

Дедлайндар және уақыттық бағалау. Plant командасын D_c шегінде алуы, Observer растауды D_r шегінде тіркеуі, ал Twin есептеуі T_f^+ шегінен аспауы тиіс. Plant.AwaitCommand күйінде $p \leq D_c+\delta$ инварианты қолданылады және $p>D_c$ болса Plant.Unsafe күйіне өтеді. Observer.Timing күйінде $r \leq D_r+\delta$, ал $r>D_r$ болса Observer.DeadlineMissed күйіне өтеді. Integration.WaitTwin күйінде y

≤ T_f⁺+2δ және y>T_f⁺+δ болғанда Integration.AlarmRaised күйі іске қосылады. Ақау енгізілген сәттен Plant растауына дейінгі жауап беру уақыты:

$$T_{response} = t_{ack} - t_{inject} \quad (2.32)$$

Негізгі талап: $T_{response}$≤ D_r. Өлшем жіберілген сәттен команда алынғанға дейінгі талап:

$$T_{command} = t_{receive} - t_{field} \leq D_c \quad (2.33)$$

Observer.Timing → Satisfied ауысуы plant_ack оқиғасымен орындалады және бастапқы модельде r ≤ D_r шартымен тікелей шектелмеген. Сондықтан Verifier сұрауының дәл мағынасы – Observer.DeadlineMissed күйінің жетімсіздігі. Satisfied күйінде r сағаты қалпына келтіруге дейін өсе береді; осы күйдегі кейінгі r мәнін нақты жауап беру уақыты деп түсіндіруге болмайды.

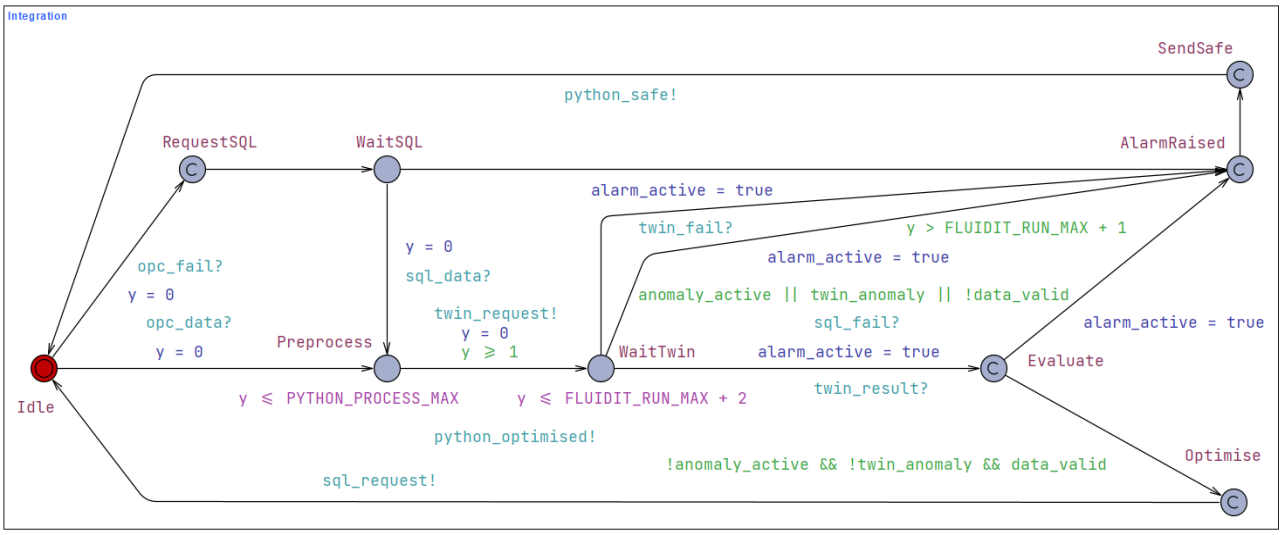
Консервативті уақыт бюджетінде OPC UA бағыты Δ_s қалдық кідірісін, PLC оқуын T_r, Python өңдеуін T_y, Fluidit есептеуінің жоғарғы шегін T_f⁺, PLC командасын T_c және орындауды T_a қамтиды. SQL бағытына бұларға қоса архивтен оқу T_h уақыты кіреді. Жалпы жобалық шарт:

$$max(B_{OPC}, B_{SQL}) \leq D_r \quad (2.34)$$

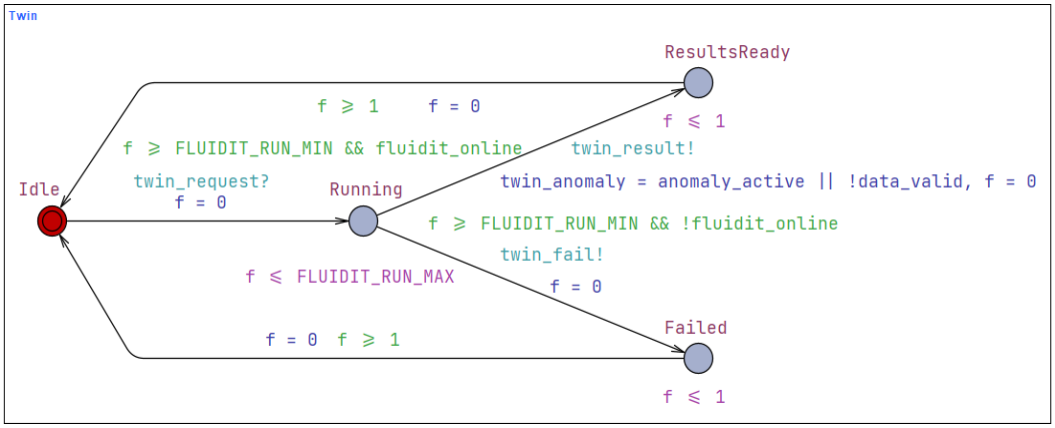
Бұл теңсіздік уақыт бюджетінің жобалық бағасы ғана және автоматтар желісін Verifier арқылы толық тексеруді алмастырмайды. Δ_s сценарий мен ақау енгізілген мезетке тәуелді. Plant пен Warmup бір мезгілде басталатын бірінші немесе қауіпсіз режимнен кейінгі циклде T_s ≥ T_inj болса, Δ_s=T_s−T_inj; бұл қатынас барлық ақау мезеттеріне автоматты түрде қолданылмайды. SQL бюджеті тек Archive.Available күйінен алынатын сәтті архивтік жауапқа қатысты.

Модельде келесідей жергілікті сағаттар пайдаланылған (2.23-2.26-суреттер):

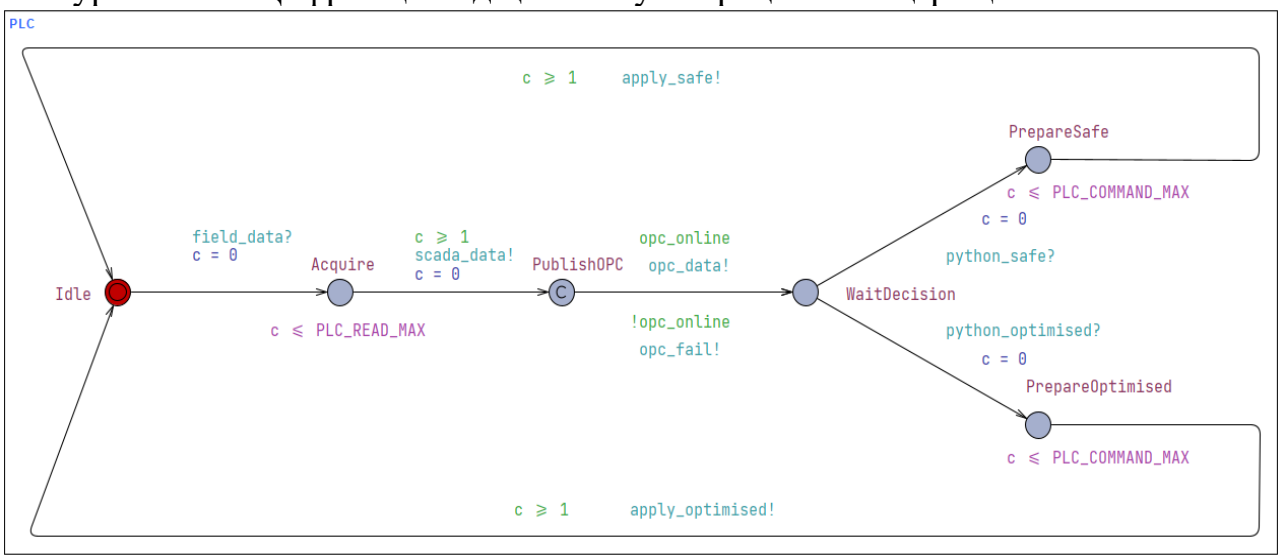
- Scenario.s – сценарийді орындау және мақұлдауды күту уақыты;
- Plant.p – басқару объектісінің күйінің өзгеру уақыты;
- PLC.c – контроллермен операция жасау уақыты;
- HMI.w – операторлық интерфейстің жаңартылу уақыты;
- Archive.a – архивпен операцияорындау уақыты;
- Integration.y – интеграциялы модульмен деректерді талдау уақыты;
- Twin.f – цифрлық егіздің есептеу операциясының ұзақтығы;
- Observer.r – енгізілген аномалияға жүйенің әсер ету уақыты.



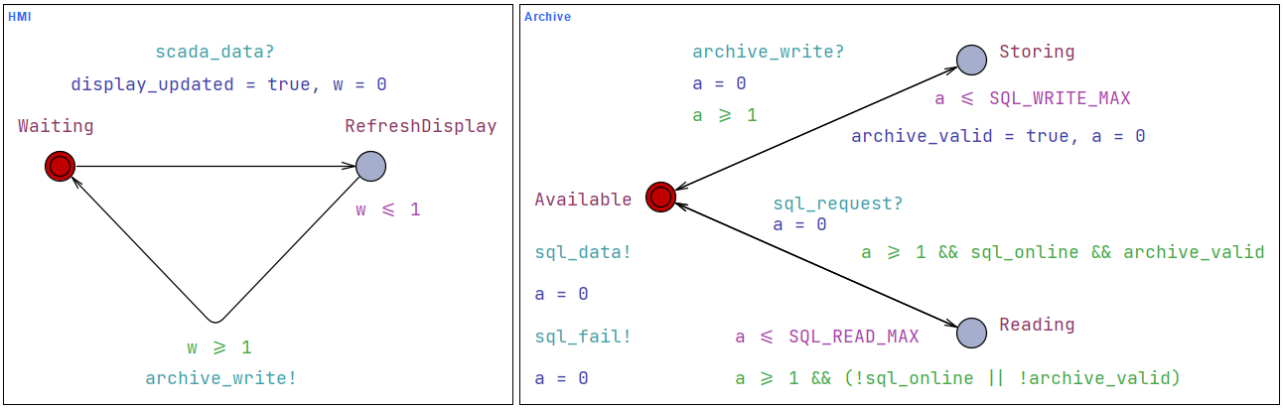
Сурет 2.23 – Интеграциялы модульмен деректерді талдау уақыт автоматы



Сурет 2.24 – Цифрлық егіздің есептеу операциясының ұзақтығы автоматы

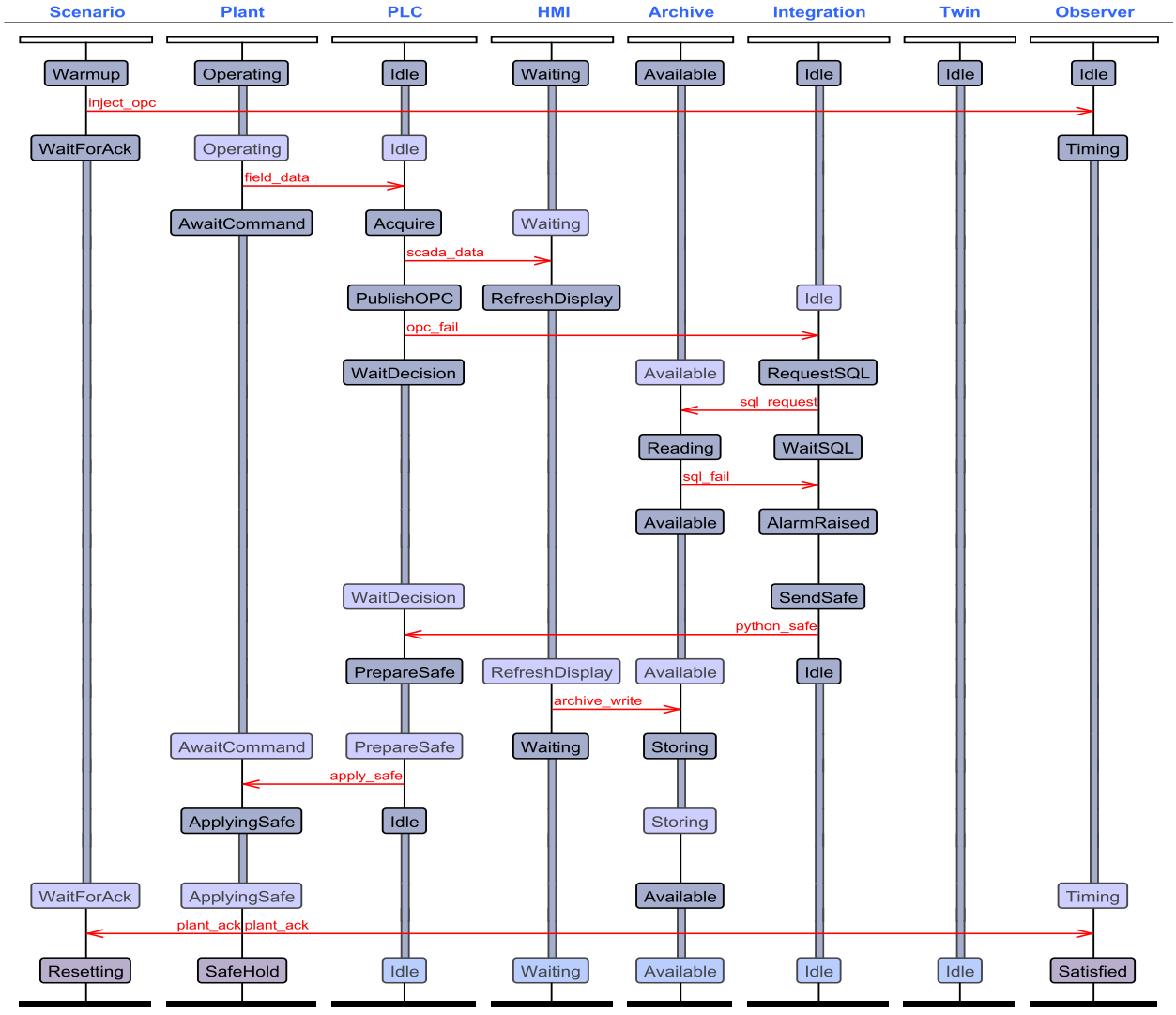


Сурет 2.25 – Контроллермен операция жасау уақыты автоматы



Сурет 2.26 – Операторлық интерфейстің жаңартылу уақыты және архив автоматтары

WinCC SCADA, OPC UA және цифрлық егіз интеграциясындағы қауіпсіздік механизмінің өзара әрекеттесу диаграммасы 2.27-суретте келтірілген.



Сурет 2.27 – WinCC SCADA, OPC UA және цифрлық егіз интеграциясындағы қауіпсіздік механизмінің өзара әрекеттесу диаграммасы

Екінші бөлім бойынша қорытынды

Ұсынылған «Цифрлық егіз» архитектурасын әзірлеу және тестілеу барысында БЛК SIMATIC S7-1500, WinCC, OPC UA байланыс хаттамасы, Python негізіндегі интеграцияланған деңгейі орнатылды және Fluidit Heat термогидравликалық моделі бірегей оқиғалық-бағытталған жұмысты модельдеу процесіне біріктірілуі мүмкін.

Python базасындағы деңгей деректредің жинақталуын, айнымалыларды сәйкестендіру, сценарий таңдау, Fluidit Heat бағдарламасында есептерді іске қосу, модельдеу нәтижелерін өңдеу және SCADA жүйесінде визуализациялау үшін БЛК-ға нәтижелерді қайта беруді басқарды.

Берілген зерттеу шегінде келесідей шешімдер ұсынылды:

- БЛК, SCADA, OPC UA, Python және Fluidit Heat үйлесетін интегрирленген архитектураны енгізу;
- БЛК және цифрлық модель арасындағы жұмыс параметрлері мен модельдеу нәтижелерін құрылымды екібағытты алмастыру;
- орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесінің бірнеше жұмыс сценарийлерін жүзеге асыру;
- Fluidit Heat моделінің әртүрлі сценарийлеріндегі гидравликалық және жылулық сипаттардың сандық бағалануы.

Модельдеу нәтижелерінің негізінде цифрлық модель диспетчерге қысымның, температураның, шығынның, жылу тапшылығы мен жылу шығынының есептік көрсеткіштерін көрсете алады. Алынған нәтижелер диспетчердің шешім қабылдауы үшін жұмыс параметрлерін оңтайландыру үшін орталықтандырылған электрмен жабдықтау жүйелерін тиімді басқару мақсатында қолданылуы мүмкін.

Бұдан басқа UPPAAL-да құрылған ресми модель жылумен жабдықтау жүйесінің цифрлық егіз компоненттерінің өзара әркеттерінің логикалық және уақытша үйлесімдігін растады. Берілген шарттар кезінде жүйе тупиктік немесе қауіпті жағдайға түспейтіні бекітілген, ол уақытылы енгізілген аномалияларға әсер етеді және белсенді апаттық сигнал болған кезде оңтайландырылған әркеттерді блоктайды.

Демек, UPPAAL пайдалану TIA Portal-Python-Fluidit Heat бағдарламалық кешенінде жүзеге асқан супервизорлық басқару алгоритмінің дұрыстығын ресми негіздеуге мүмкіндік берді.

3. АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕСІНІҢ МАТЕМТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

3.1 Орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесінің математикалық моделі

Математикалық модель берілген жылу жүктемесі кезінде отынның минималды тұтынылуын қамтамасыз ететін және температураға, қысымға және жылумен жабдықтау сапасына қойылатын талаптарды сақтайтын ауданның жылумен жабдықтау жүйесінің жұмыс режимдерін анықтауға арналған. Модель желідегі гидравликалық және жылу процестерін тұтынушылар мен жылу көзінің сипаттамаларымен байланыстырады. Ауытқулар физикалық параметрлердің өзгеруі, қосымша жоғалту ағындары және өлшеудің бұзылуы арқылы ескеріледі. Мұндай қойылым «Үлкен деректердегі ауытқуларды анықтау негізінде ауданның жылумен жабдықтау жүйесінің отын тұтынуын оңтайландыру әдістерін зерттеу және өңдеу» диссертация тақырыбына сәйкес келеді

Параметрлеудің негізі TIA Portal, Python және Fluidit heat интеграциясы және Fluidit Heat есептеулерін MATLAB/Simulink/Simscape-пен салыстыру бойынша материалдарда ұсынылған Алматының жылу желісінің зерттелетін учаскесі болып табылады [1, 2]. Оңтайландыру міндеті үшін желінің сипаттамасы отын шығыны моделімен, жылу баланстарымен, бақылау шарттарымен және рұқсат етілген режимдерге шектеулермен толықтырылған. Диагностикалық бұзылулар математикалық түрде анықталады.

Теңдеулерде СИ бірліктері қолданылады (3.1-кесте).

Кесте 3.1 – Математикалық модельдің негізгі белгілері

Белгіленуі	Физикалық мағынасы	Бірлігі
t, z, L_ℓ, D_ℓ	Құбырдың уақыты, бойлық координаты, ұзындығы және ішкі диаметрі	с; м
A_ℓ, q_ℓ, v_ℓ	Қима ауданы, көлемдік ағын жылдамдығы, су жылдамдығы	м²; м³/с; м/с
$\dot{m}_\ell, \rho, c_p$	Судың массалық шығыны, тығыздығы және меншікті жылу сыйымдылығы	кг/с; кг/м³; Дж/(кг·К)
$p_i, \Delta p_i, H_p$	Қысым, қысымның төмендеуі, сорғы басы	Па; Па; м
T^S, T^R, T_g, T_a	Жеткізу температурасы, кері су, топырақ және сыртқы ауа	°С или К
$f_\ell, \zeta_\ell, \varepsilon_\ell$	Дарси коэффициенті, жергілікті қарсылық коэффициенті, кедір-бұдыр	1; 1; м
$K_{\ell g}, K_{\ell SR}$	Жерге және құбырлар арасындағы сызықтық өткізгіштік	Вт/(м·К)
$\dot{Q}_{\mathrm{req}}, \dot{Q}_{\mathrm{del}}, \dot{Q}_{\mathrm{loss}}$	Қажетті және берілген Қуат, жылу шығыны	Вт
$\dot{Q}_j, \eta_j, H_{u,j}$	Агрегаттың пайдалы қуаты, төмен жану жылуы бойынша тиімділік, төмен жану жылуы	Вт; 1; Дж/кг
$\dot{B}_j, \lvert M_f$	Агрегаттың отын шығыны және оның есептік кезеңдегі массасы	кг/с; кг

3.1-кестенің жалғасы

$P_{\mathrm{el},p}, E_{\mathrm{el}}$	Сорғының электр қуаты және сорғы энергиясы	Вт; Дж
x, a, u, d	Динамикалық күйлер, алгебралық айнымалылар, басқару және мазасыздық	Компоненттер бойынша
θ, ξ, b, r	Модель параметрлері, физикалық ауытқулар, өлшеудің ауытқуы және салмақтың болмауы	Компоненттер бойынша

Кельвин мен Цельсий градусындағы температура айырмашылықтары сан жағынан сәйкес келеді. Термодинамикалық тәуелділіктегі абсолютті температура кельвиндерде белгіленеді. Шектеуді тексеру кезінде артық және абсолютті қысым ажыратылады; аяқталу формуласында абсолютті қысым қолданылады.

Халықаралық кестелік калорияны пайдаланған кезде жылу қуатын түрлендіру $1\,\frac{\text{Гкал}}{\text{ч}} = 1163$ кВт қатынасы бойынша орындалады; 1 Гкал $= 4{,}1868 \cdot 10^9$ Дж [13]. Қосымша 1 бар $= 10^5$ Па и $1\,\frac{\text{л}}{\text{с}} = 10^{-3}\text{м}^3/\text{с}$. кезеңдегі Гкал көрсеткіші, егер орташа қуат қажет болса, алдымен кезең ұзақтығына бөлінеді.

Жылу желісі бағытталған $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{E})$ графигімен ұсынылады. Графикті салу кезінде әр жиектегі ағынның оң бағыты беріледі. Ағынның теріс мәні судың кері қозғалысын білдіреді. Геометриялық және шығыс сипаттамалары теңдіктермен байланысты:

$$A_\ell = \frac{\pi D_\ell^2}{4}, \qquad v_\ell = \frac{q_\ell}{A_\ell}, \qquad \dot{m}_\ell = \rho q_\ell \tag{3.1}$$

A – кіріс жиегі үшін +1 және шығыс жиегі үшін -1 элементтері бар оқиға матрицасы болсын. Массаның жинақталуы болмаған кезде түйін балансы келесідей болады:

$$\rho \mathrm{A} q + s - \lambda = 0 \tag{3.2}$$

Мұнда s – сыртқы кірістер мен массаны таңдау векторы, соның ішінде қоректендіру, кг/с; λ – есепке алынбаған ағып кету векторы, кг/с. жабық жұмыс істейтін желіде $\lambda = 0$, ал сыртқы ағындар теңдестірілген. Жылу көзі мен жылу нүктелері жеткізу және кері тізбектерді байланыстырады; олар арқылы айналым судың сыртқы шығыны емес. Құбырдағы қысымның жоғалуы Дарси-Вейсбах теңдеуімен анықталады

$$\Delta p_{\mathrm{fr},\ell} = R_\ell q_\ell |q_\ell|, \qquad R_\ell = \frac{\rho}{2A_\ell^2}\left(f_\ell \frac{L_\ell}{D_\ell} + \sum_j \zeta_{j,\ell} \right) \tag{3.3}$$

$q_\ell|q_\ell|$ белгісі қозғалыстың нақты бағытына қарсылықты қамтамасыз етеді. R_ℓ коэффициенті Па·с²/м⁶ өлшеміне ие және жалпы жағдайда Рейнольдс саны арқылы ағынға байланысты:

$$\mathrm{Re}_\ell = \frac{\rho |v_\ell| D_\ell}{\mu}, \qquad f_\ell = \frac{64}{\mathrm{Re}_\ell} \tag{3.4}$$

Рейнольдс санының формуласында μ судың динамикалық тұтқырлығын білдіреді, Па·с. турбулентті ағын үшін кедір-бұдырға тәуелділік және Рейнольдс саны қолданылады, мысалы Колбрук-Уайт теңдеуі:

$$\frac{1}{\sqrt{f_\ell}} = -2\log_{10}\left(\frac{\varepsilon_\ell}{3{,}7 D_\ell} + \frac{2{,}51}{\mathrm{Re}_\ell \sqrt{f_\ell}}\right) \tag{3.5}$$

Өтпелі аймақта режимдер арасында келісілген интерполяция қолданылады. Дарси коэффициенті мен жергілікті қарсылық параметрлерін таңдау бағдарламалық жасақтаманы салыстыру кезінде сәйкес келуі керек [9]. Нөлдік ағында қарсылық $\mathrm{Re} = 0$ кезінде $64/\mathrm{Re}$ қатынасын есептемей, шекті өрнекпен беріледі.

i түйіннен j түйініне бағытталған жиек үшін гидравликалық инерциясы бар қозғалыс теңдеуі келесідей жазылады:

$$I_\ell \frac{dq_\ell}{dt} + R_\ell q_\ell |q_\ell| = p_i - p_j + \Delta p_{\mathrm{pump},\ell} - \rho g\left(h_j - h_i\right) \qquad I_\ell = \frac{\rho L_\ell}{A_\ell} \tag{3.6}$$

Мұнда h_i – түйіннің геодезиялық белгісі; $\Delta p_{\mathrm{pump},\ell}$ – пассивті құбыр үшін нөлге тең сорғы қысымының жоғарылауы. I_ℓ коэффициенті Па·с²/м³. өлшеміне ие. Квазистационарлық модельде ағынның туындысы нөлге тең деп қабылданады. Қысымның жалғыз шешімін алу үшін желінің әрбір байланысқан компонентіндегі тірек қысымы орнатылады.

Пуазейль формуласы $R_{\mathrm{lam}} = 128\mu L/(\pi D^4)$ сызықтық тәуелділікті білдіреді $\Delta p = R_{\mathrm{lam}} q$ ламинарлы ток кезінде. Оны квадраттық тәуелділік коэффициенті немесе режимді тексермей турбулентті желінің кедергісі ретінде пайдалануға болмайды.

Салыстырмалы айналу жиілігіндегі центрифугалық сорғының сипаттамасы $n_p = \omega_p/\omega_{p,0}$ ұқсастық заңдарымен анықталады:

$$H_p\left(q_p, n_p\right) = n_p^2 H_{p,0}\left(\frac{q_p}{n_p}\right), \qquad \Delta p_p = \rho g H_p \tag{3.7}$$

Тәуелділік $n_p > 0$ кезінде және сорғының паспорттық жұмыс аймағында қолданылады; тоқтатылған сорғы жеке күймен сипатталады. $H_{p,0}$ және тиімділік қисығы төлқұжат немесе эксперименттік мәліметтер бойынша беріледі [10]. Метрдегі қысым ρg мультипликаторымен қысымға ауысады.

Сорғы жетегінің электр қуаты:

$$P_{\mathrm{el},p} = \frac{q_p \Delta p_p}{\eta_{\mathrm{pump},p}\eta_{\mathrm{motor},p}\eta_{\mathrm{drive},p}} \tag{3.8}$$

Басқару клапаны α_i ашылуына байланысты кедергімен сипатталады:

$$\Delta p_{\mathrm{val},i} = R_{\mathrm{val},i}(\alpha_i) q_i |q_i|, \qquad 0 \le \alpha_i \le 1 \tag{3.9}$$

Кедергі функциясы клапанның сипаттамасымен анықталады. Толық жабу $q_i = 0$ шартымен беріледі, өйткені соңғы кедергі өте жақсы жабық арматураны шығармайды.

Бір құбыр үшін ұзындық бірлігіне шаққандағы жылу энергиясының балансы келесідей болады:

$$\rho c_p A_\ell \frac{\partial T_\ell}{\partial t} + \rho c_p q_\ell \frac{\partial T_\ell}{\partial z} = -K_{\ell g}\left(T_\ell - T_g\right) \tag{3.10}$$

$K_{\ell g}$ коэффициентінің өлшемі Вт/(м·К). Егер U_ℓ, Вт/(м²·К) жылу берудің беттік коэффициенті қолданылса, онда $K_{\ell g} = U_\ell P_\ell$, мұндағы P_ℓ - есептелген периметр. Сызықтық коэффициентті периметрге қосымша көбейтуге жол берілмейді. Оң жақ бөліктің алдындағы белгі теріс: $T_\ell > T_g$ кезінде су жылуды жоғалтады.

Теңдеу $T_\ell(z, 0)$ бастапқы үлестірімімен және кіріс шекарасындағы температурамен толықтырылады. Оң ағынмен кіріс $z = 0$ теріс ағынмен $z = L_\ell$ болады. ағынның бағыты өзгерген кезде кіріс шекарасы өзгереді.

Қос құбырлы элемент үшін жалпы бойлық координатада байланысты теңдеулер жазылады:

$$\begin{aligned} \rho c_p A_\ell^S \frac{\partial T_\ell^S}{\partial t} + \rho c_p q_\ell^S \frac{\partial T_\ell^S}{\partial z} &= -K_{\ell Sg}\left(T_\ell^S - T_g\right) - K_{\ell SR}\left(T_\ell^S - T_\ell^R\right), \\ \rho c_p A_\ell^R \frac{\partial T_\ell^R}{\partial t} + \rho c_p q_\ell^R \frac{\partial T_\ell^R}{\partial z} &= -K_{\ell Rg}\left(T_\ell^R - T_g\right) - K_{\ell SR}\left(T_\ell^R - T_\ell^S\right) \end{aligned} \tag{3.11}$$

Жеткізу және кері құбырлардағы шығындар жалпы координатаға қатысты қарама-қарсы белгілерге ие. Құбыраралық жылу алмасу энергияны желі ішінде қайта бөледі; екі тепе-теңдік қосылған кезде тиісті мүшелер азаяды. Сондықтан ол сыртқы ортадағы жалпы шығындарға екінші рет қосылмайды.

Жерге жылу шығыны интеграция арқылы анықталады:

$$\dot{Q}_{\mathrm{loss}} = \sum_{\ell \in \mathcal{E}_{\mathrm{pipe}}} \int_0^{L_\ell} K_{\ell g}\left(T_\ell(z,t) - T_g\right) dz \tag{3.12}$$

Мұндағы $\mathcal{E}_{\mathrm{pipe}}$ массиві жеке жеткізу және кері құбырларды қамтиды. Екі құбырлы элементтермен ұсыну үшін әр элементке екі топырақ терминдері

қосылады. Біркелкі температурада формула $K_{\ell g}L_{\ell}\left(\bar{T}_{\ell}-T_{g}\right)$ дейін азаяды.

Араластыру түйінінде айтарлықтай энергия жиналмай температура кіріс массалық ағындармен анықталады:

$$T_i = \frac{\sum_{\ell\in\mathcal{E}_i^{\text{in}}} \dot{m}_l^{\text{in}}\, T_{\ell,\text{out}}}{\sum_{\ell\in\mathcal{E}_i^{\text{in}}} \dot{m}_l^{\text{in}}} \tag{3.13}$$

Бұл формуладағы кіріс шығындары нақты ағын бағыты бойынша оң. Егер қуат болса, оның ағыны мен температурасы нумератор мен бөлгішке қосылады. Формула кіріс шығындарының нөлдік емес мөлшерінде қолданылады; тоқырау түйіндері Энергияны сақтаудың бөлек балансын қажет етеді.

$q_{\ell} > 0$, T_g және $K_{\ell g}$ тұрақтылары үшін қабырғаның жылу инерциясынсыз бір түтік моделінің шешімі:

$$\begin{aligned} T_{\ell,\text{out}}(t) &= T_g + \left[T_{\ell,\text{in}}(t-\tau_{\ell}) - T_g\right]e^{-\kappa_{\ell}}, \\ \tau_{\ell} &= \frac{L_{\ell}}{v_{\ell}}, \qquad \kappa_{\ell} = \frac{K_{\ell g}L_{\ell}}{\rho c_p q_{\ell}} \end{aligned} \tag{3.14}$$

Бастапқы фронттан өткеннен кейін Шығыс температурасы кіріс температурасына тәуелді болады, көліктік кідіріс τ_{ℓ} сәйкес беріліс функциясы тұрақты ағынмен тең:

$$G_{\ell,T}(s) = \frac{\Delta T_{\ell,\text{out}}(s)}{\Delta T_{\ell,\text{in}}(s)} = e^{-\kappa_{\ell}}e^{-\tau_{\ell}s} \tag{3.15}$$

Айнымалы ағын кезінде кідіріс құбыр көлемінің өту уақытымен анықталады: кіру сәтінен шығу сәтіне дейінгі жылдамдық интегралы құбырдың ұзындығына тең. Содан кейін тұрақты кідіріс жергілікті жуықтау болып табылады. Егер қабырға мен оның айналасындағы топырақтың инерциясын ескеру қажет болса, қосымша жылу күйлері енгізіледі; олардың температураның ауысуына әсері эксперименттік зерттеулермен расталады [4].

Құбырды бір тамаша аралас көлемде жақындату үшін басқа беріліс функциясы алынады:

$$G_{\ell,\text{lump}}(s) = \frac{K_{\ell,0}}{\tau_{\ell,0}s+1}, K_{\ell,0} = \frac{\dot{m}_{\ell}c_p}{\dot{m}_{\ell}c_p + K_{\ell g}L_{\ell}}, \tau_{\ell,0} = \frac{C_{\ell}}{\dot{m}_{\ell}c_p + K_{\ell g}L_{\ell}} \tag{3.16}$$

Мұнда C_{ℓ} – таңдалған көлемнің жылу сыйымдылығы, Дж/К. Аралас көлем моделі – бұл өзіндік болжамдармен жеңілдету. Ол үлестірілген теңдеуді апериодтық бірлікке бір реттік күшейтумен қарапайым ауыстыру арқылы алынбайды.

Жылу пунктінің бастапқы жағында тұтынушыға берілген қуат энтальпия айырмашылығымен анықталады:

$$\dot{Q}_{\mathrm{del},i} = \dot{m}_i\left[h_w\left(T_i^S\right) - h_w\left(T_i^R\right)\right] \approx \dot{m}_i c_p\left(T_i^S - T_i^R\right) \tag{3.17}$$

Мұнда h_w – судың ерекше энтальпиясы. Қабылданған тұрақты жылу сыйымдылығында формуланың оң жағы қолданылады. Берілген қуат, берілген қажеттілік және құбырдың жоғалуы әртүрлі мәндерді білдіреді және бөлек есептеледі.

Жылу алмастырғыш үшін энергияның айтарлықтай жинақталуы жоқ тиімділік әдісі және тасымалдау бірліктерінің саны қолданылады:

$$\dot{Q}_{\mathrm{HEX},i} = \epsilon_i C_{\min,i}\left(T_{\mathrm{prim,in},i} - T_{\mathrm{sec,in},i}\right), \quad \mathrm{NTU}_i = \frac{U_{\mathrm{HEX},i} A_{\mathrm{HEX},i}}{C_{\min,i}} \tag{3.18}$$

Шығыстардың жылу эквиваленттері $C_{\mathrm{prim},i} = \dot{m}_{\mathrm{prim},i} c_p$ және $C_{\mathrm{sec},i} = \dot{m}_{\mathrm{sec},i} c_p$, Вт/К; $C_{\min,i}$ және $C_{\max,i}$ – олардың кішісі және үлкені. Қарсы жылу алмастырғыш үшін:

$$\epsilon_i = \frac{1 - e^{-\mathrm{NTU}_i\left(1 - C_{r,i}\right)}}{1 - C_{r,i} e^{-\mathrm{NTU}_i\left(1 - C_{r,i}\right)}}, \qquad C_{r,i} = \frac{C_{\min,i}}{C_{\max,i}} \tag{3.19}$$

$C_{r,i} = 1$ кезінде $\epsilon_i = \mathrm{NTU}_i/(1 + \mathrm{NTU}_i)$ шегі қолданылады. Бір тізбектің нөлдік шығыны кезінде қуат нөлге тең болады. Бастапқы жағының кері температурасы $\dot{Q}_{\mathrm{HEX},i} = \dot{m}_{\mathrm{prim},i} c_p\left(T_{\mathrm{prim,in},i} - T_{\mathrm{prim,out},i}\right)$ балансымен анықталады. Егер жылу алмастырғыштың инерциясы маңызды болса, оның көлемі мен қабырғасының температурасы модельге енгізіледі; уақыт константасы деректерге сәйкес бағаланады.

Есептік қажеттілік жылыту және ыстық сумен жабдықтау болып бөлінеді:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\mathrm{req},i}(t) &= \dot{Q}_{\mathrm{H},i}(t) + \dot{Q}_{\mathrm{DHW},i}(t), \\ \dot{Q}_{\mathrm{H},i}(t) &= \dot{Q}_{\mathrm{H},i}^{\mathrm{des}} \left[\frac{T_{\mathrm{b,set},i} - T_a(t)}{T_{\mathrm{b,set},i} - T_a^{\mathrm{des}}}\right]_+ \end{aligned} \tag{3.20}$$

Белгілеу $[\cdot]_+$ оң бөлікті білдіреді. Ауа-райына тәуелділік жылыту режимінің қолданылу шегінде қолданылады; жылуды өшіру температурасы бөлек орнатылады. ГВС жүктемесі тұтыну профилімен анықталады және сыртқы температураға пропорционалды түрде өзгеруге міндетті емес. Сценарийлік есептеулерде [1] жылыту жүктемесі мен ыстық су құбырларын мұрағаттық мәндер бойынша тікелей орнатуға болады.

Жылыту сапасын талдау және ғимараттың жылу инерциясын пайдалану үшін модель енгізіледі:

$$C_{\mathrm{b},i} \frac{dT_{\mathrm{b},i}}{dt} = \dot{Q}_{\mathrm{H,del},i} + \dot{Q}_{\mathrm{int},i} - H_{\mathrm{b},i}\left(T_{\mathrm{b},i} - T_a\right) \tag{3.21}$$

Мұндағы $T_{\mathrm{b},i}$ – ішкі температура, $C_{\mathrm{b},i}$ – ғимараттың тиімді жылу сыйымдылығы, $H_{\mathrm{b},i}$ – жылу жоғалту коэффициенті, $\dot{Q}_{\mathrm{int},i}$ – ішкі және күн жылу шығыны. Параметрлер ғимарат туралы мәліметтер мен өлшемдер бойынша анықталады [3].

Берілген жүктемелері бар қойылымда сапа берілген қуатқа шектеулермен қамтамасыз етіледі. Жылу инерциясы бар қондырғыда жылыту қуаты рұқсат етілген ішкі температура сақталған кезде уақытында қайта бөлінуі мүмкін. Бұл опциялар анық таңдалады; тәуелсіз ағынның жылдамдығын, жылу қуатын және бір жылу пунктінің екі температурасын бір уақытта қатаң түрде орнату модельді жоққа шығаруы мүмкін.

Жылу шығаратын қондырғылардың пайдалы қуаты желіге берілетін қуатпен, көз балансымен байланысады:

$$\sum_{j\in\mathcal{J}_{\mathrm{on}}} \dot{Q}_j = \dot{Q}_{\mathrm{plant}} + \dot{Q}_{\mathrm{src,loss}} + \frac{dE_{\mathrm{src}}}{dt} \tag{3.22}$$

$\mathcal{J}_{\mathrm{on}}$ жиынында осы аралықта жұмыс істейтін агрегаттар бар. Біріктірілген модельде $E_{\mathrm{src}} = C_{\mathrm{src}}(T_{\mathrm{src}} - T_{\mathrm{ref}})$. Желі шекарасындағы жылу қуаты $\dot{Q}_{\mathrm{plant}} = \dot{m}_{\mathrm{plant}} c_p \left(T^S_{\mathrm{plant}} - T^R_{\mathrm{plant}}\right)$ тұрақты жылу сыйымдылығында. Тамаша аралас көз көлемі үшін $T_{\mathrm{src}} = T^S_{\mathrm{plant}}$. Стационарлық режимде энергия туындысы нөлге тең.

Өз сипаттамасы шегінде жұмыс істейтін отын агрегаты үшін:

$$\dot{B}_j = \frac{\dot{Q}_j}{H_{u,j}\eta_j\left(\ell_j, T_j^R\right)}, \qquad \ell_j = \frac{\dot{Q}_j}{\dot{Q}_j^{\mathrm{nom}}} \tag{3.23}$$

$\dot{Q}_j$ Вт және $H_{u,j}$ Вт/кг кезінде отын шығыны кг/с алынады, газ отыны үшін Дж/м³ жану жылуын қолдана отырып, берілген стандартты жағдайларда көлемдік шығынды есептеуге рұқсат етіледі. Отынның массалық және көлемдік сипаттамалары бір өрнекте араласпайды.

Тиімділік пен жану жылуы бір энергетикалық негізде беріледі. Жанудың төмен жылуы бойынша тиімділікті анықтаған кезде Жоғарғы шекара конденсациялық агрегаттар үшін бірліктен асып кетуі мүмкін. Конденсацияланбайтын көз үшін тиісті төлқұжат диапазоны қабылданады. Тиімділіктің температураға тәуелділігі физикалық негіз және деректер болған жағдайда ғана енгізіледі.

Бақыланатын жұмыс аймағында эмпирикалық жуықтауға рұқсат етіледі:

$$\eta_j \quad = \beta_{0,j} + \beta_{1,j}\ell_j + \beta_{2,j}\ell_j^2 + \beta_{3,j}\frac{T_j^R - T_{j,0}^R}{T_{\mathrm{scale},j}} \tag{3.24}$$

Функция $0 < \eta_j^{\min} \le \eta_j \le \eta_j^{\max}$ шартымен шектеледі. Коэффициенттер төлқұжат сипаттамалары бойынша немесе отын мен пайдалы қуаттың бірлескен

өлшемдері бойынша бағаланады. Температура коэффициентінің белгісі және сандық мәндер ерікті түрде тағайындалмайды. Расталған тәуелділік болмаған жағдайда сезімталдықты талдаумен тұрақты тиімділік қолданылады. Желілік судың қысымы эксперименттік негізделген байланыссыз қазандықтың тиімділігіне тікелей қосылмайды.

$[t_0, t_0 + H]$ кезеңіндегі біртекті отынның жалпы шығыны:

$$M_f = \int_{t_0}^{t_0+H} \sum_{j \in \mathcal{J}_{\text{on}}} \dot{B}_j\,(t)\,dt \tag{3.25}$$

Әр түрлі отындар үшін$\int \sum_j H_{u,j}\,\dot{B}_j\,dt$ энергия шығыны немесе бір жану жылуына әкелетін шартты отын массасы салыстырылады. Әр түрлі отындардың массаларының қарапайым қосындысы бірдей энергия нәтижесін сипаттамайды.

Зерттеу учаскесінде бір MainPlant желі көзі ұсынылған [1]. Оның ішіндегі бірнеше агрегаттар олардың жеке сипаттамалары болған кезде ғана ескеріледі. Егер көзі ЖЭО болса, дербес қазандық сипаттамасының орнына жылу мен электр энергиясын бірлесіп өндірудің келісілген моделі қажет; қазандық отынын азайту нәтижелерін ЖЭО-ға автоматты түрде ауыстыруға болмайды [5].

Аномалия – салыстырмалы жүктемелер мен сыртқы жағдайларда жабдықтың немесе өлшеу арнасының қалыпты режим сипаттамасынан ауытқуы. Сыртқы температураның өзгеруі немесе жүктеменің белгілі бір секіруі өздігінен ақаулық емес. Модель мұндай өзгерістерді бұзылу векторы арқылы қайталауы керек.

Физикалық бұзылулар параметрлердің өзгеруімен және қосымша ағындармен беріледі:

$$K_{\ell g}^{\text{act}} = K_{\ell g}^{0} + \delta K_{\ell g}, \qquad R_{\ell}^{\text{act}} = R_{\ell}^{0} + \delta R_{\ell}, \qquad \eta_j^{\text{act}} = \eta_j^{0} - \delta \eta_j \tag{3.26}$$

Мұнда 0 және act жоғарғы индекстері қалыпты және нақты күйлерді білдіреді. Жерге өткізгіштіктің жоғарылауы жылу оқшаулауының нашарлауын сипаттайды; қосымша қарсылық арматураның бітелуін немесе дұрыс орналаспауын көрсетуі мүмкін; тиімділіктің төмендеуі қажетті отынды арттырады. Диагностика кез-келген жағымсыздықтың бір себебін көрсетпеуі керек: әр түрлі бұзылулар жақын сыртқы көріністерге ие болуы мүмкін [7].

Тесік болған кезде түйіндегі ағып кету аяқталу формуласы бойынша бағаланады:

$$\lambda_i = C_{d,i} A_{\text{leak},i} \sqrt{2\rho \left[p_i^{\text{abs}} - p_{\text{ext},i}^{\text{abs}}\right]_+} \tag{3.274}$$

$C_{d,i}$ коэффициенті өлшемсіз, $A_{\text{leak},i}$ м² өлшенеді, λ_i – кг/с. Егер ағып кету құбырдың ішінде болса, тиісті нүктеге қосымша түйін енгізіледі. Масса балансы толтырумен толықтырылады. Судың жоғалуына және қоректендіретін судың

түсуіне байланысты жылу шығындары мыналарды құрайды:

$$\dot{Q}_{\text{leak}} = \sum_i \lambda_i \left[h_w\left(T_{\text{leak},i}\right) - h_w\left(T_{\text{makeup}}\right) \right] \tag{3.28}$$

Формула бір қоректену температурасын және интервалда түскен және жоғалған массаның тепе-теңдігін қамтиды. Бірнеше қоректендіру ағындары олардың жеке энтальпиялық баланстарын пайдаланады. Ағып кетудің жоғалуы жылу оқшаулау өткізгіштігінде қайта ескерілмейді.

Сенсордың дрейфі өлшеу деңгейінде сипатталады:

$$y_k^{\text{meas}} = y_k^{\text{phys}} + b_k + \nu_k \tag{3.29}$$

Сенсордың қателігі жылу берудің физикалық заңын өзгертпейді, дегенмен қате өлшеу дұрыс емес басқару пәрменіне әкелуі мүмкін. Сондықтан физикалық аномалиялар ξ және b өлшеу ығысулары бөлек бағаланады.

Желінің интегралды энергия балансы келесідей жазылады:

$$\frac{dE_{\text{net}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{plant}} + P_{\text{pump}\to\text{w}} - \sum_i \dot{Q}_{\text{del},i} - \dot{Q}_{\text{loss}} - \dot{Q}_{\text{leak}} \tag{3.30}$$

Мұнда E_{net} – судың энергиясы және жалпы санақ деңгейіне қатысты құбырлардың жылу сыйымдылығы. $P_{\text{pump}\to\text{w}}$ мүшесі таңдалған тепе-теңдік шекарасында салқындатқышқа сорғы энергиясының түсуін көрсетеді. Механикалық қыздыру ескерілмеген жылу жуықтауында бұл термин нөлге тең қабылданады; дәл осы Конвенция жиынтық қуаттарды салыстыру кезінде қолданылады [1]. Егер сорғылардың үлесі зерттелетін шығындарға қатысты маңызды болса, ол көздің қуатына қайта қосылмай, модельде және өлшеу балансында келісілген түрде ескеріледі.

Қалыпты күй болжамының болмауы синхрондалған деректерде анықталады:

$$r_k = y_k^{\text{meas}} - \hat{y}_{k|k-1}^{0} \tag{3.31}$$

$\hat{y}_{k|k-1}^{0}$ шамасы бұрынғы күйден, белгілі бақылаулардан және бұзылулардан жарамды модель арқылы алынады. Тексерілетін шығыс дәл шекаралық шарт ретінде бір уақытта бірдей модельге берілмеуі керек: мұндай тексеру жасанды түрде нөлдік қатені тудыруы мүмкін.

Арналарды әртүрлі бірліктермен салыстыру үшін нормаланған қоспалар қолданылады:

$$\tilde{r}_{k,m} = \frac{r_{k,m}}{\sigma_{r,m}}, \qquad S_k = \tilde{r}_k^{\top} C_r^{-1} \tilde{r}_k \tag{3.32}$$

$\sigma_{r,m}$ оң шкалалары және C_r корреляция матрицасы өлшеу қателіктері мен модельдерін ескере отырып, қалыпты режимдер арқылы анықталады. Деградацияланған корреляциялық матрицада регуляризация қолданылады. Рұқсат етілген S_k деңгейінен асып кету сәйкессіздіктің белгісі болып табылады, бірақ бұзушылықтың себебін анықтамайды. Табалдырықты таңдау және бағдарламалық қамтамасыз ету әдістері 4-тарауға жатады.

Қосымша диагностикалық белгілер физикалық тепе-теңдік бойынша қалыптасады. Желінің бақылау көлемі үшін жаппай байланбау:

$$r_{M,k} = \dot{m}^{\text{meas}}_{\text{supply},k} - \dot{m}^{\text{meas}}_{\text{return},k} + \dot{m}^{\text{meas}}_{\text{makeup},k} - \dot{m}_{\text{known out},k} - \frac{\Delta M_{\text{net},k}}{\Delta t_k} \qquad (3.33)$$

Қайта зарядтау оның ағыны таңдалған шекараны өлшенген тамақтандырудан бөлек кесіп өткенде ғана қосылады. Оң сыртқы таңдаулар нақты ескеріледі. Толтырылған сығылмайтын тұрақты көлемді желі үшін сақталған массаның өзгеруі нөлге тең. Сәйкес келмейтін шығын өлшегіштер мен уақыт белгілері ағып кетудің жалған белгісін тудыруы мүмкін.

Қалыпты модельге қатысты энергияның болмауы келесідей анықталады:

$$\begin{aligned} r_{E,k} = \quad & \dot{Q}^{\text{meas}}_{\text{plant},k} + \hat{P}_{\text{pump}\to w,k} - \sum_i \dot{Q}^{\text{meas}}_{\text{del},i,k} \\ & - \hat{\dot{Q}}^{0}_{\text{loss},k} - \frac{\hat{E}_{\text{net},k+1} - \hat{E}_{\text{net},k}}{\Delta t_k} \end{aligned} \qquad (3.34)$$

Тұрақты жұмыс режимінде бұл байламның математикалық күтуі нөлге жақын. Желіні жылыту және салқындату кезінде энергияны сақтау мүшесі міндетті болып табылады. Онсыз тұрақты өтпелі кезең ағып кету немесе қосымша жылу жоғалту ретінде қате түсіндірілуі мүмкін.

Аномалияны анықтаудың отын үнемдеумен байланысы желінің нақты күйін және басқарудың рұқсат етілген әсерін нақтылаудан тұрады. Датчиктің мәнін түзету режимді бағалауды жақсартады; шығындарды физикалық азайту режимді өзгертуді немесе ақаулықты жоюды қажет етеді. Диагностикалық нәтиженің өзі отын шығынын азайтуды білдірмейді.

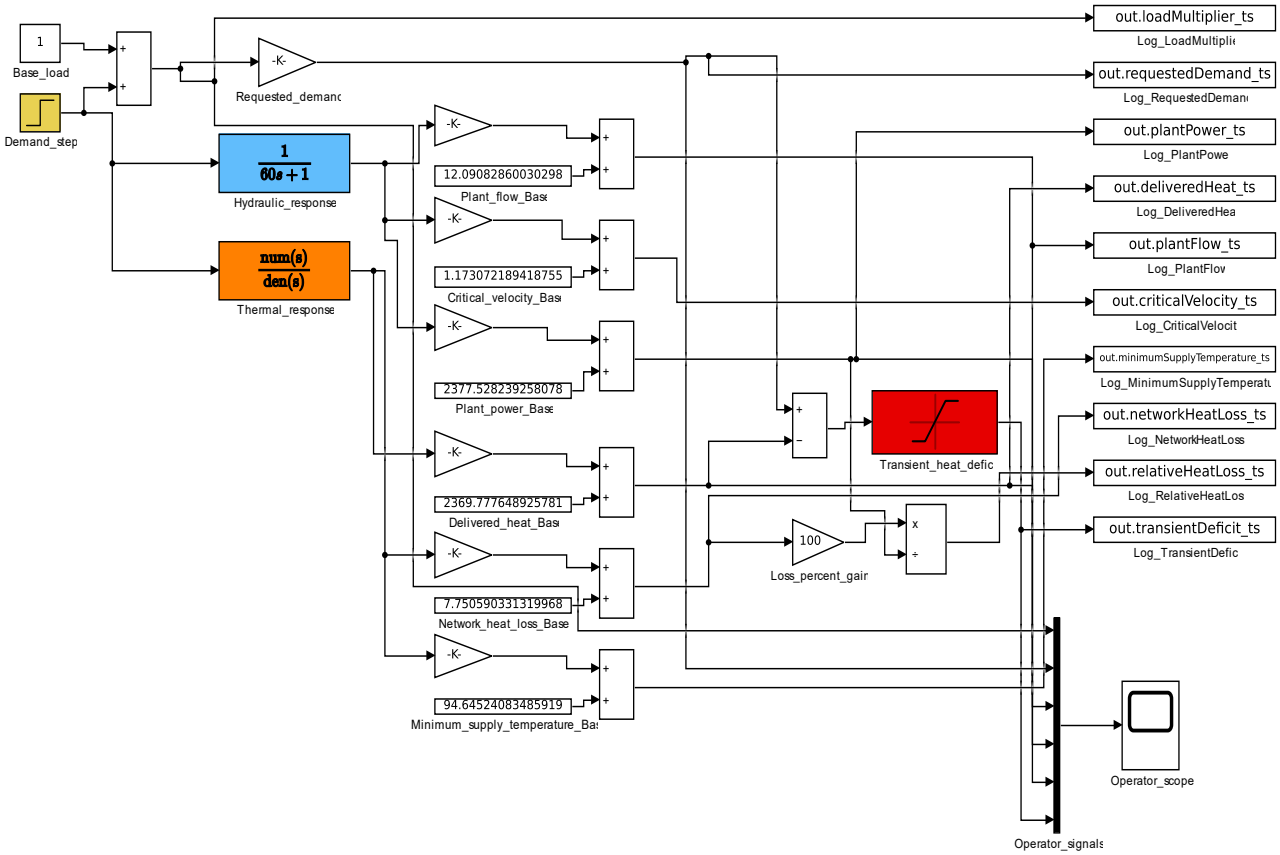
3.2 MATLAB / Simulink / Simscape бағдарламасында термогидравликалық желі моделін өңдеу

Әр түрлі арнайы бағдарламалық құралдар көп жағдайда зерттеу және жылумен жабдықтау жүйелерін модельдеу кезінде, әсіресе, 4 және 5 даму кезеңдерінде қолданылады. Мысалы [6] жұмыстың авторлары MATLAB/Simulink бағдарламасында Simscape инструментариін пайдаланып цифрлық егізді әзірледі. Оның тапсырмасы жылу насостарының, жылу аккумуляторының, электрлік жылыту элементтерінің. Газ қазандықтары мен желілердің термогидравликалық күйі болып табылады. Сондай-ақ, [7, 8]

жұмыстарда жылумен жабдықтаудың нақты жүйелерінің физикалық динамикалық имитациялық моделінің жасанды интеллект технологиялары қарастырылды. Бұл кезде ЖИ қайта қалпына келетін энергия көздерінің пайдалануын арттыру және резервті көздердіғ пайдалануын қысқарту мақсатында қазба отынының моделіне негізделген генерацияның таратылуын анықтайды. [9] жұмыста орталықтандырылған жылумен жабдықтаудың екі жергілікті желісінің мысалында жеке үйлердегі орталықтандырылған жылумен жабдықтау қосалқы станциядағы контроллерлер мен клапандардың әсерін оңтайландыру зерттелді.

Зерттеу MATLAB бағдарламасының 2026R нұсқасының базасында [13] модельдің дұрыстығын тексеру үшін жүргізілді және нәтижелер зерттелетін аймақ үшін Fluidit Heat ортасын қолдану арқылы алынған.

3.1-суретте Simulink бағдарламасында жылу желісінің имитациялық моделінің құрылымдық сұлбасы көрсетілген.



Сурет 3.1 – Simulink бағдарламасындағы жылу желісінің имитациялық моделінің құрылымдық сұлбасы

Пайдалану шығындарына және экономикалық және энергетикалық көрсеткіштерге мұндй шараларды енгізу тиімдігін анықтауда әсерін анықтауды бағалауға ерекше назар аударылды. MATLAB/Simulink/Simscape бағдарламасында имитациялық зерттеулер тұтынушылар ретінде де, орталықтандырылған жылумен жабдықтау желісі ретінде де жеке жинақтаусыз бейнеленеді. Зерттеулер көрсеткендей жеке үйлердегі қосалқы станциялар

контроллерінің жетілдіруге инвестициялар 13 жыл уақыттан кейін өз жемісін береді. Қосалқы станцияларды басқарудың барлық жүйелерін кешенді оңтайландыру жеке үйлерде жылу энергиясын жылу жоғалуларының азаю есебінен және негізгі сорғының электр энергиясын тұтынуының сәйкесінше төмендеуінен 9 % дейін үнемдеуге алып келуі мүмкін.

Simulink бағдарламасындағы жылу желісінің әзірленген имитациялық моделінің құрамына келесі блоктар кіреді:

- Hydraulic_response (Гидравликалық жауап);
- Thermal_response (Жылу реакциясы)
- Plant_Flow_Base (Жылу тасымалдағыштық негізгі шығыны);
- Delivered_Heat_Base (Босатылған жылудың негізгі саны);
- Network_heat_loss_Base (Желідегі негізгі жылудың жоғалулары);
- Minimum_supply_temperature_Base (Берілетін құбырдың негізгі минимал температурасы).

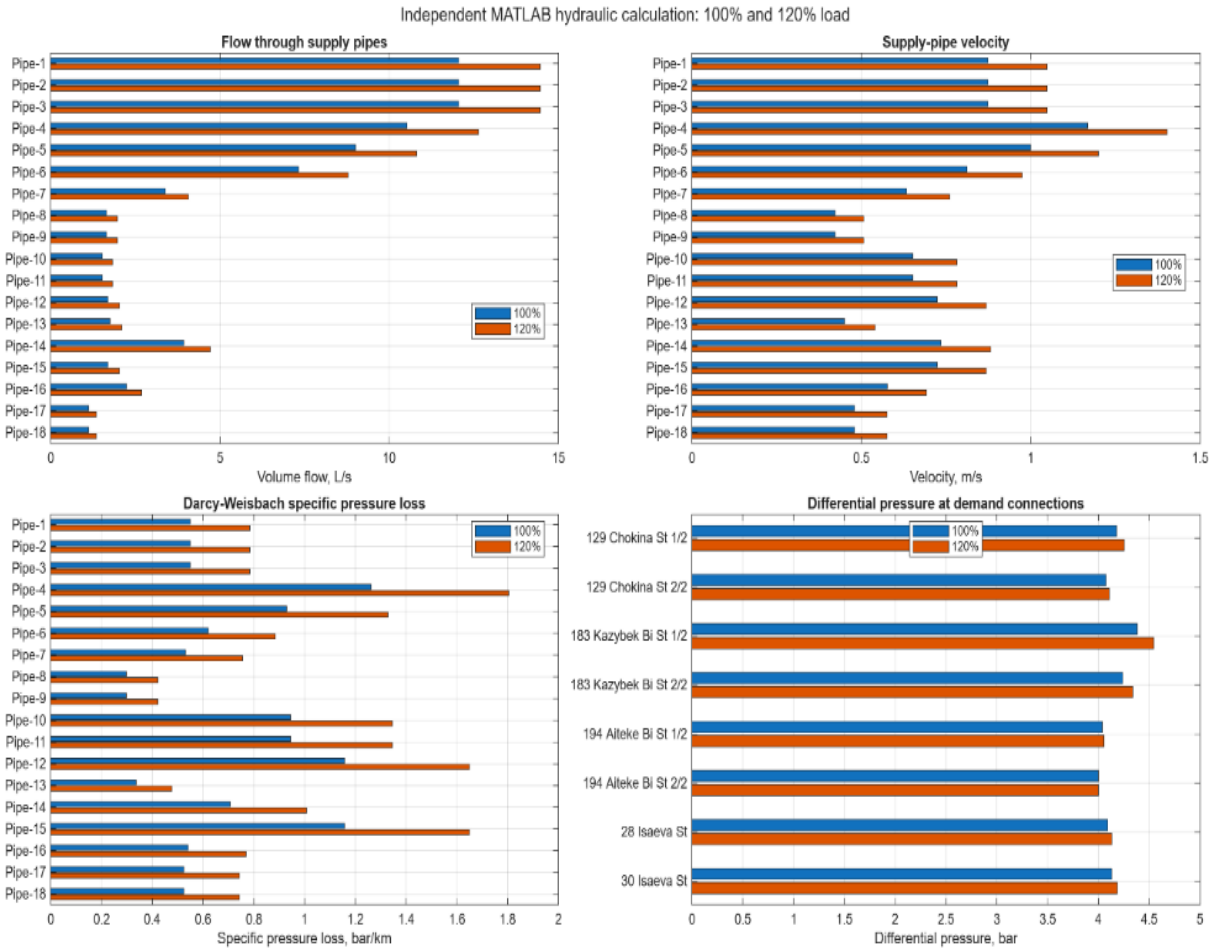
Кіріс әсерлер – жүктеменің бастапқы деңгейі (Base_load) және сұраныстың сатылы өзгеруі (Demand_step);

Шығыс сигналдар – жүктеме көбейткіші, талап етілетін сұраныс, станцияның қуаты, босатылған жылу, желідегі жылу, критикалық жылдамдық, минималды беру температурасы, желідегі жылудың жоғалуы және жылудың салыстырмалы жоғалуы.

3.3 MATLAB/Simscape және Fluidit Heat нәтижелерін салыстыру жолымен модельді тексеру

Модельдеу нәтижелері жеке MATLAB/Simulink және Simscape бағдарламаларынан қалыпты 100% және 120% жүктемедегі жылу желісінің жұмыс режимі үшін Fluidit Heat деректері бойынша алынды.

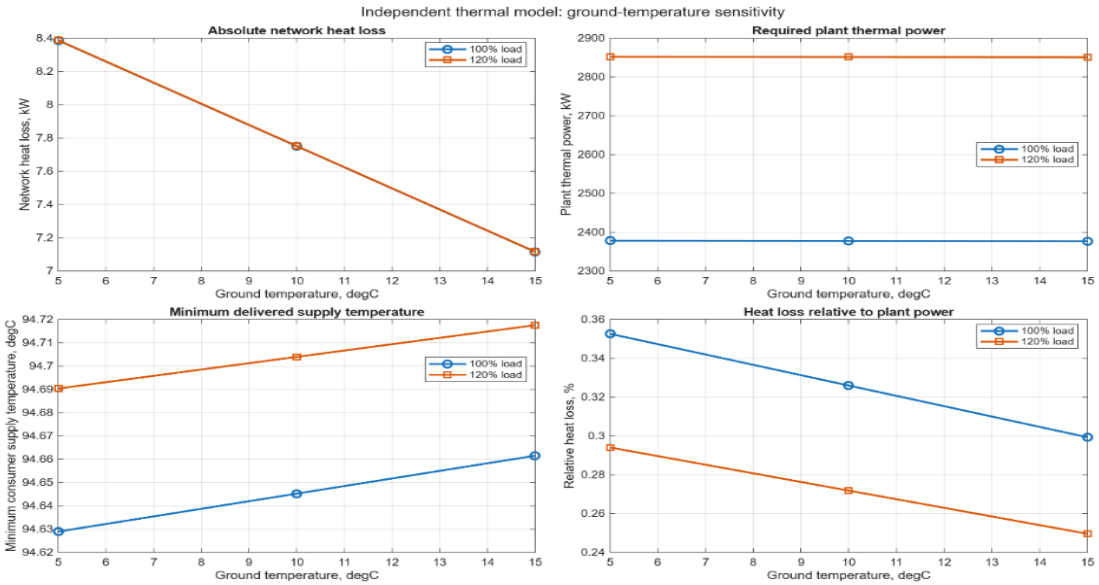
3.2-суретте MATLAB/Simulink және Fluidit Heat бағдарламаларынан алынған гидравликалық есептің салыстырмалы талдауы көрсетілген. Берілген зерттеу Fluidit Heat бағдарламасында модельдерді құру мен қайта іске қосды қамтымайды, ол нақты дайын сандық мәндерді қолданатынын ескеру керек.



Сурет 3.2 – 100 және 120% жүктеме кезіндегі гидравликалық есептеу нәтижелері

MATLAB тәуелсіз моделінің нәтижелерін Fluidit Heat есептеулерімен салыстырғанда негізгі жылу гидравликалық параметрлер жоғарғы үйлесімдікті көрсетті.

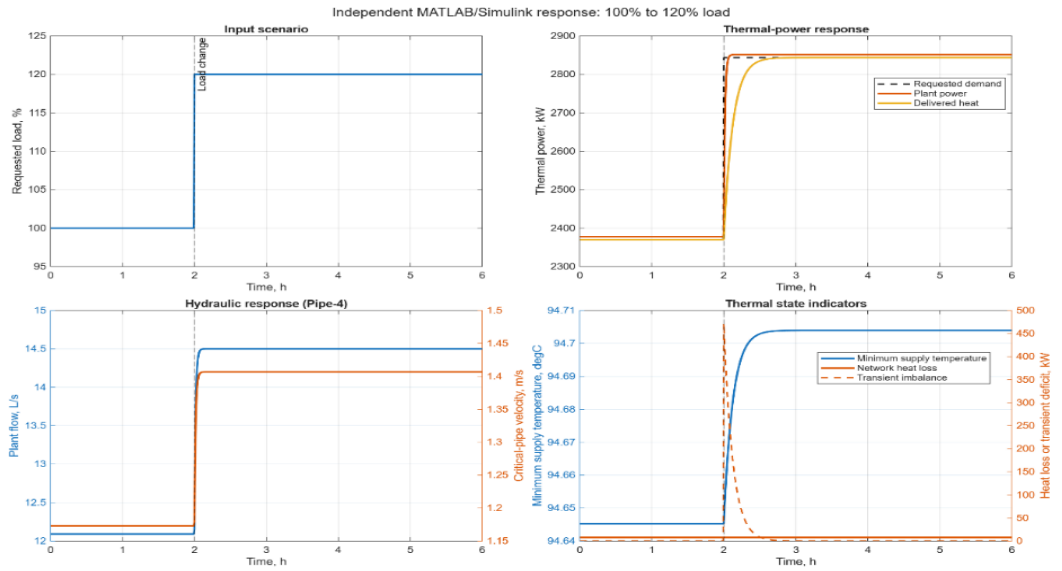
3.3-суретте топырақ температурасы 5°C-тан 15°C дейінгі аралықта болатын 100 % және 120 % жүктеме деңгейі үшін тәуелсіз жылу моделі бойынша есептеулер нәтижесі ұсынылған.



Сурет 3.3 – 100 % және 120 % жүктеме кезіндегі топырақ температурасына параметрлердің тәуелдігі

Графикте желідегі абсолютті жылу жоғалуы, станцияның талап етілетін жылу қуаты, минималды беру температурасы және салыстырмалы жылу жоғалуы көрсетілген.

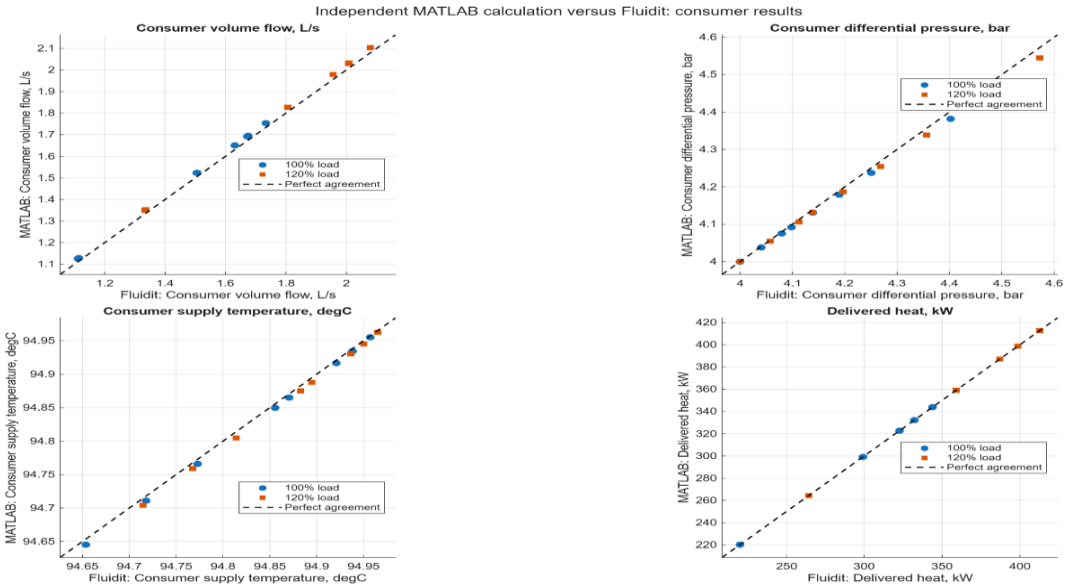
3.4-суретте 100 %-ден 120 %-ге жүктеменің сатылы өзгеруі кезіндегі MATLAB/Simulink моделіндегі өтпелі процестер көрсетілген.



Сурет 3.4 – Жүктеменің өзгеріне модельдің реакциясы

График кіріс сценариін, жылудың реакциясын, гидравликалық жауапты және жылу көрсеткіштерінің күйін бейнелейді. Жүйе жаңа жүктеменің өзгерісінен (скачок) кейін жаңа орнатылған режимге шығатыны көрініп тұр.

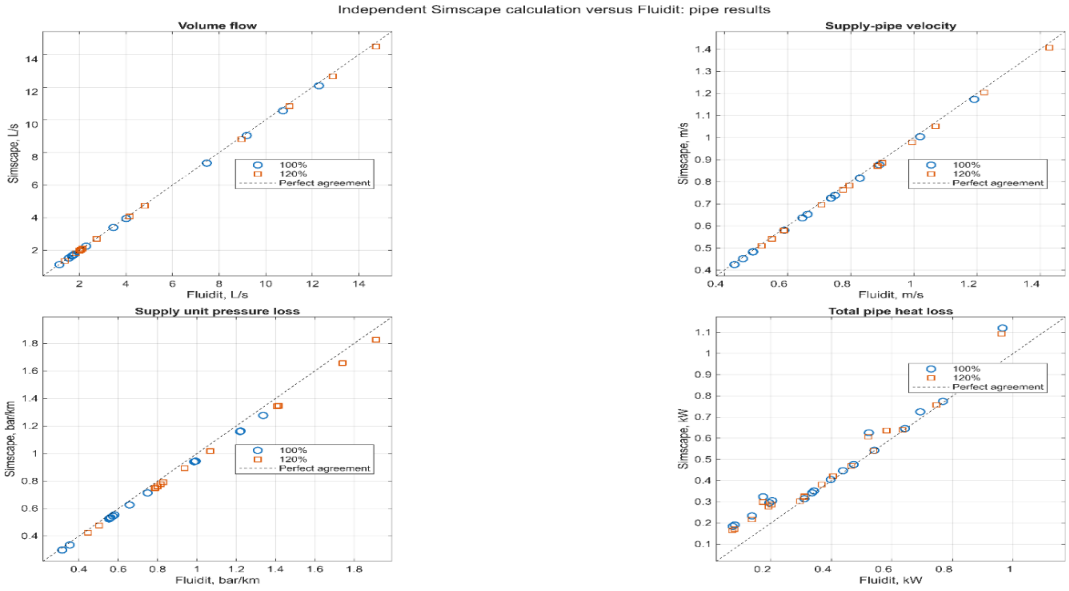
3.5-суретте 100 % және 120 % жүктеме кезіндегі тұтынушылардың параметрлері бойынша MATLAB бағдарламасында және Fluidit Heat есептеулерінде нәтижелерді салыстыру көрсетілген.



Сурет 3.5 – MATLAB және Fluidit Heat бағдарламаларында тұтынушылар параметрлері бойынша нәтижелер есебін салыстыру

Графикте төрт тәуелділік ұсынылған: 100% және 120% жүктеме кезіндегі шығын (л/с), қысымның төмендеуі (бар), беру температурасы (°C) және босатылған жылу (кВт). Сәйкесінше MATLAB және Fluidit Heat бағдарламаларынан алынған осьтер бойынша мәндер кейінге қалдырылды.

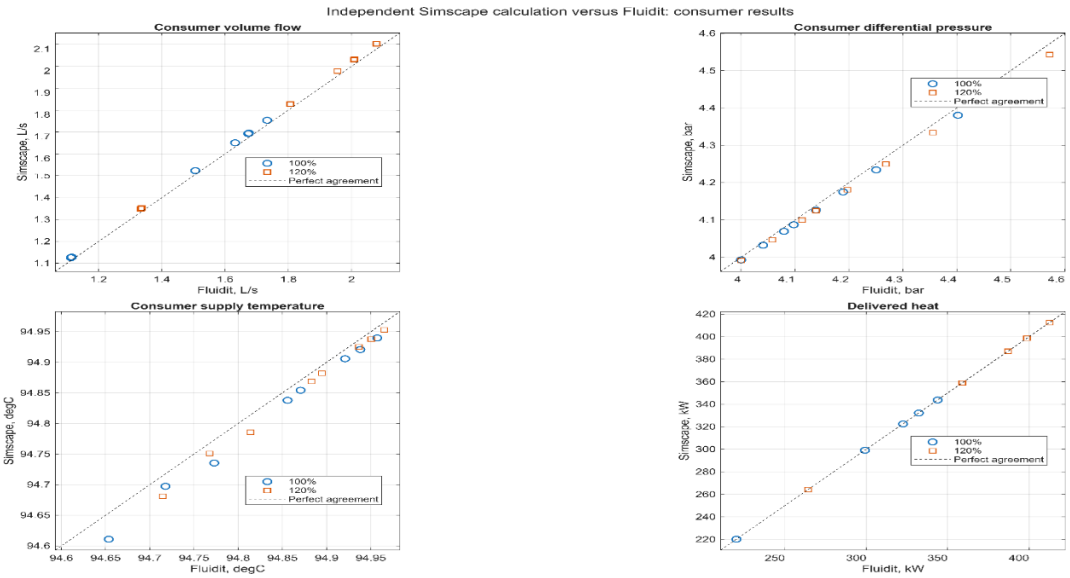
3.6-суретте құбыр параметрлері бойынша Simscape және Fluidit Heat бағдарламаларында есептеу нәтижелерін салыстыру көрсетілген: көлем шығыны, берілу құбырындағы ағын жылдамдығы, қысымның меншікті шығыны және жалпы жылудың жоғалуы.



Сурет 3.6 – Simscape және Fluidit Heat есептеулерінің нәтижелерін салыстыру

График параметрлердің минималды сәйкессіздігін көрсетеді, ол гидравликалық және жылу модельдерінің дұрыстығын дәлелдейді.

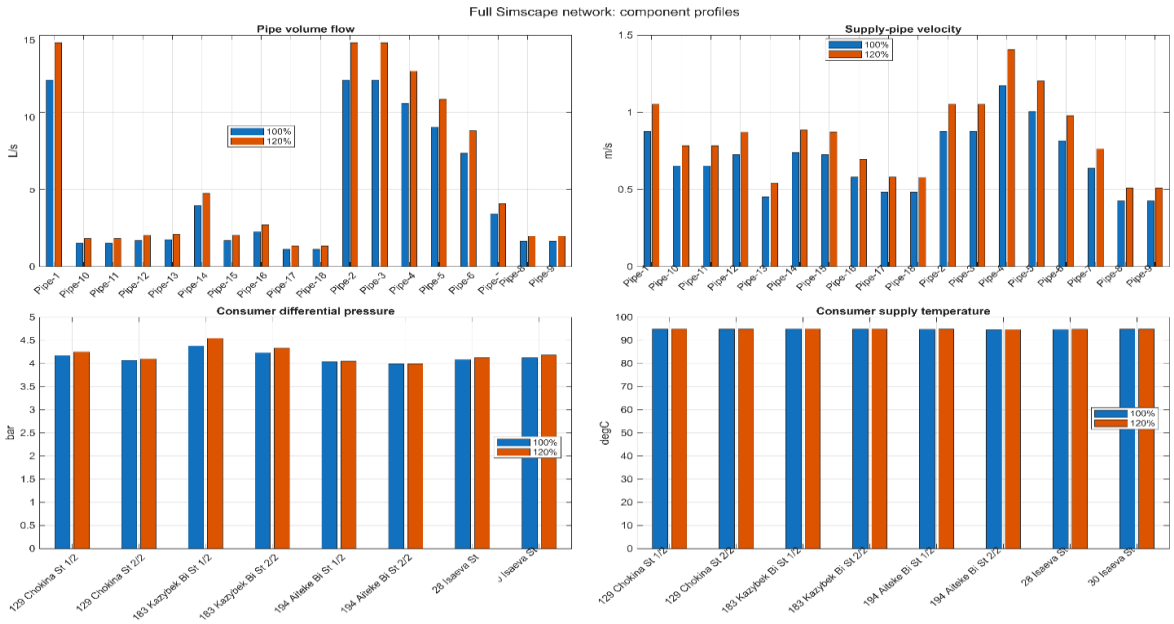
3.10-суретте Simscape бағдарламасындағы есептеу мен Fluidit Heat бағдарламасындағы есептеудің тұтынушы параметрлері бойынша нәтижелерін салыстыру ұсынылған.



Сурет 3.7 – Simscape және Fluidit Heat бағдарламаларындағы есептеудің тұтынушы параметрлері бойынша нәтижелерін салыстыру

Графикте тұтынушылардың параметрлері шығын, қысымның төмендеуі, беру температурасы және босатылған жылу жүктеменің 100% және 120% түзу бойында орналасқандығы жақсы сәйкестікті растайды.

3.8-суретте 100 % және 120 % жүктемесі кезінде желі компоненттер параметрлерінің профильдері көрсетілген.



Сурет 3.8 – жүктемесі 100 % және 120 % кезінде желі компоненттер параметрлері бойынша шығынның, жылдамдықтың, қысымның төмендеуін бөлу

Графикте төрт диаграмма көсетілген: құбырлар бойынша көлемдік шығын (л/с), берулетін құбырдағы ағын жылдамдығы (м/с), тұтынушылар қысымының төмендеуі (бар) және тұтынушылардағы беру температурасы (°C).

Көк бағандар 100 % жүктемеге, қызғылт сары бағандар 120 % жүктемеге сәйкес келеді. Жүктеменің артуына байланысты құбырлардағы шығын мен жылдамдық артады, сонда қысымның төмендеуі мен тұтынушылардың беру температурасы аздап өзгеретіні көрініп тұр. 3.8-суреттен жүктеменің 100 %-ден 120%-ға артуы құбырлардағы шығын мен жылдамдықтың артуына алып келеді, сол кезде қысымның төмендеуі мен тұтынушылардағы беру температурасы іс жүзінде өзгермеген болып қала береді. Ол өз кезегінде желінің өткізгіштік қабілетінің қорымен және температуралық режимнің тұрақтылығы туралы айтады.

Үшінші бөлім бойынша қорытынды

MATLAB/Simulink және Fluidit Heat есептеулері бар Fluidit Heat бағдарламасынің тәуелсіз модельдерінің нәтижелерін салыстыру негізгі жылу-гидравликалық параметрлердің жоғарғы үйлесімдігін көрсетті. Жүктемесі 100% және 120% режимдері үшін берулген жылу қуатының салыстырмалы ауытқуы 0,003%-дан аспады, ал қорек көз қуатының ауытқуы 0,025%-тен аз болды. Шығын мен жылу тсымалдағыш жылдамдығының орташа абсолютті пайыздық қателігі 1,92-1,99% аралығында болды. MAPE мәні тұтынушылар арасындағы қысымның төмендеуі үшін мән 0,25%-дан аспады. MATLAB-тағы мәні Fluidit Heat нәтижелерінен шамамен 5,6% төмен болатын қысымның нақты жоғалуы үшін анағұрлым айқын жүйелі алшақтық анықталды.

MATLAB бағдарламасындаесептелген желінің жылу шығыны жүктемесі 100% кезінде Fluidit Heat нәтижелерінен 6,21% және жүктемесі 120% кезінде 10.81%-ға артты. Көрсетілген айырмашылық жылу алмасудың математикалық сипатындағы және MATLAB бағдарламасында қабылданған топырақ температураснының мәніне байланысты болуы мүмкін. Алынған нәтижелер тәуелсіз MATLAB/Simulink/Simscape моделінің жүзеге асуының дұрыстығын және зерттеу режимдерінде Fluidit Heat бағдарламасымен үйлесімдігін растайды.

4. АНОМАЛИЯЛАРДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ АНЫҚТАУ ЖӘНЕ ОТЫН ШЫҒЫНДАРЫН БАСҚАРУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

4.1 Жылу желісіндегі аномалиялық режимдерді машиналық оқыту әдістерімен анықтау

Бұл бөлімде аудандық жылумен жабдықтау желісінің цифрлық егізі үшін аномалиялық режимдерді автоматты анықтау тәсілі ұсынылады. Зерттеу мақалада сипатталған Software in the Loop архитектурасын машиналық оқыту модулімен толықтырады. Үшінші бөлімде алты термогидравликалық сценарий тексерілген, ал аномалияларды анықтайтын машиналық оқыту алгоритмдері болашақ жұмыс ретінде белгіленген [110]. Осы зерттеу кеңейтілімінде алты алгоритм іске асырылып, олардың жеке және біріктірілген нәтижелері салыстырылды.

Есептеу тәжірибесінің негізгі нәтижесі бойынша кемінде төрт модельдің келісіміне негізделген көпшілік шешімі F1 көрсеткіші бойынша 95,07% нәтижеге жетті. Бұл мән алты жеке модельдің әрқайсысынан жоғары болды. Дегенмен барлық көрсеткіштер мақаладағы кестелік параметрлерден жасалған синтетикалық уақыттық қатарлар бойынша алынған. Сондықтан нәтижелер әдістеменің жұмыс қабілетін көрсетеді, бірақ өндірістік желіде тәуелсіз валидация жүргізілгенін білдірмейді.

Зерттеу мақсаты жылу желісінің қалыпты жұмыс режимінен ауытқуларын белгіленбеген деректер негізінде анықтайтын есептеу модулін құру және бірнеше алгоритмнің шешімдерін салыстыру болып табылады. Негізгі зерттеу сұрағы былай тұжырымдалды: мақалада берілген тұтынушы және сценарий параметрлеріне сүйеніп жасалған уақыттық қатарларда алты бақылаусыз оқыту алгоритмінің қайсысы аномалиялық режимдерді неғұрлым дәл анықтайды және модельдерді біріктіру жалған дабылдар мен өткізіп алған аномалиялардың арақатынасын жақсарта ма.

Зерттеу бірлігін 15 минуттық интервалдағы бір тұтынушының технологиялық күйі құрайды. Модель аномалияны оның физикалық себебін толық диагностикалау ретінде емес, қалыпты көпөлшемді күйден статистикалық немесе құрылымдық ауытқу ретінде анықтайды. Сондықтан модельдің нәтижесі операторға ескерту және кейінгі термогидравликалық тексеруді іске қосу сигналы ретінде қарастырылады.

Бастапқы параметрлер [110] еңбегіндегі бес тұтынушының жылулық жүктемелері, беру және қайтару қысымдары, сондай-ақ алты есептік сценарийдің нәтижелері негізінде алынды. Үшінші бөлімдегі біріктірілген жылыту және ыстық сумен жабдықтау сценарийінде желінің жеткізілген жылуы 2369,84 кВт, шығыны 12,288 л/с және ең төмен қысым айырмасы 4,0 бар болған. 120% жүктеме сценарийінде жеткізілген жылу 2843,79 кВт, ал шығын 14,737 л/с-қа дейін өскен. Төмен беру температурасы сценарийінде ең төмен температура 89,71 С, ал төмен қысым айырмасы сценарийінде 3,0 бар қабылданған (4.1-кесте).

Кесте 4.1 – Модельде пайдаланылған негізгі сценарийлер

№	Сценарий	Жеткізілген жылу кВт	Шығын л/с	Ең төмен Δр бар	Ең төмен беру температурасы С
1	Жылыту және ЫСЖ	2369,84	12,288	4,0	94,65
2	Беру температурасы 90 С	2369,83	13,664	4,0	89,71
3	Қысым айырмасы 3 bar	2369,82	12,288	3,0	94,65
4	Жүктеме 120%	2843,79	14,737	4,0	94,71

Ескертпе: Кесте [1] еңбегінің негізінде құрастырылған

Кестелік мәндер уақыттық қатар құру үшін тірек нүктелері ретінде пайдаланылды. 30 тәулікке созылатын 15 минуттық қадаммен бес тұтынушы бойынша 14 400 бақылау жасалды. Алғашқы 70% кезең 10 080 қалыпты бақылаудан тұратын оқыту жиынына, соңғы 30% кезең 4320 бақылаудан тұратын тест жиынына бөлінді. Тест жиынына 669 басқарылатын аномалия енгізілді. Кездейсоқ генератордың мәні 42, күтілетін ауытқу үлесі 3% болып бекітілді.

Әр бақылаудың белгілік векторы жеті айнымалыдан құрылды: жылыту жүктемесі, ыстық сумен жабдықтау жүктемесі, беру қысымы, қайтару қысымы, беру температурасы, қайтару температурасы және көлемдік шығын. Әр тұтынушыға жеке модель үйретілді. Жеті белгі StandardScaler арқылы орташа мәні нөлге, стандарттық ауытқуы бірге тең болатындай стандартталды. Бос мәндер болған жағдайда олар тек оқыту жиынының медианаларымен алмастырылды; тест деректері шекті мәндерді анықтауға қатыстырылған жоқ.

Тест кезеңінде мақаладағы үш ауытқу сценариі қолданылды: беру температурасының 90 С-қа төмендеуі, қысым айырмасының 3 bar-ға түсуі және сұраныстың 120% деңгейіне өсуі. Әдістің басқа ақауларға сезімталдығын тексеру үшін ағып кетуге ұқсас ауытқу мен датчик ақауының имитациясы қосылды. Жоғары сұраныс қалыпты режимнен ауытқу ретінде белгіленгенімен, ол автоматты түрде қызмет көрсету талаптарының бұзылуы болып есептелмейді. Бұл айырмашылық аномалияны операциялық бұзушылықпен теңестірмеу үшін сақталды (4.2-кесте).

Кесте 4.2 – Есептеу тәжірибесінің негізгі параметрлері

№	Параметр	Мәні
1	Бақылау қадамы	15 минут
2	Кезең ұзақтығы	30 тәулік
3	Тұтынушылар саны	5
4	Барлық бақылаулар	14 400

4.2-кестенің жалғасы

5	Оқыту жиыны	10 080 қалыпты бақылау
6	Тест жиыны	4320 бақылау
7	Тесттегі аномалиялар	669 бақылау
8	Күтілетін ауытқу үлесі	0,03
9	Көпшілік шешімі	6 модельдің кемінде 4 дауысы

4.2 Жылыту жүйелеріндегі аномалияларды анықтау алгоритмдері

Алгоритмдер таңбаланған өндірістік ақауларды қажет етпейтін бақылаусыз немесе бір класты тәсілдерден таңдалды. Бұл шешім қолдағы бастапқы деректерде нақты ақау журналдары болмағандықтан қабылданды. Бірдей оқыту және тест бөлу тәртібі барлық алгоритмге қолданылды, сондықтан олардың нәтижелері бірдей эксперимент жағдайында салыстырылды.

Z score әдісі. Z-score әр белгінің бақылауын қалыпты кезеңдегі орташа мәні мен стандарттық ауытқуына қатысты өлшейді. і бақылауындағы j белгі үшін стандартталған мән төмендегі өрнекпен есептелді.

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \tag{4.1}$$

мұндағы x_{ij} – өлшенген белгі, μ_j – оқыту жиынындағы орташа мән, σ_j – стандарттық ауытқу. Кемінде бір белгінің абсолюттік Z-score мәні 3-тен асса, бақылау аномалия ретінде белгіленді. Әдіс түсіндіруге жеңіл, бірақ айнымалылар арасындағы байланыстарды және сызықтық емес қалыпты режимдерді толық ескермейді.

Isolation Forest. Isolation Forest бақылауларды кездейсоқ белгілер мен бөліну нүктелері арқылы оқшаулайтын 250 ағаштан құрылды. Аномалиялық бақылаулар ағашта аз бөліну арқылы ертерек оқшауланады [111]. Модельдің contamination параметрі 0,03, random state мәні 42 болып орнатылды. Бұл алгоритм көпөлшемді дерекке жарамды және таралудың нақты түрін алдын ала қабылдамайды.

One Class SVM. One-Class SVM қалыпты бақылауларды белгілер кеңістігінде қоршайтын шекара құрады [112]. Радиалдық базистік функция ядросы пайдаланылды, gamma параметрі scale режимінде, ал nu параметрі 0,03 деңгейінде берілді. Әдіс сызықтық емес шекараны үйрене алады, бірақ нәтижесі масштабтауға және параметрлерге сезімтал.

Local Outlier Factor. Local Outlier Factor бақылаудың жергілікті тығыздығын оның көршілерінің тығыздығымен салыстырады [113]. Осы тәжірибеде 35 көрші және novelty режимі қолданылды. LOF әртүрлі тығыздықтағы жергілікті ауытқуларды анықтауға ыңғайлы, алайда үлкен деректерде есептеу шығыны артады және көршілер саны нәтижеге ықпал етеді.

Elliptic Envelope. Elliptic Envelope қалыпты деректердің робасты ковариациялық құрылымын бағалап, бақылауларды Махаланобис қашықтығы

арқылы тексереді. Ковариацияны бағалау үшін Minimum Covariance Determinant тәсілі пайдаланылады [114]. support fraction 0,90 және contamination 0,03 болып белгіленді. Әдіс айнымалылар арасындағы корреляцияны ескереді, бірақ қалыпты деректердің эллипстік таралуына жуық болуын талап етеді.

MLP автоэнкодері. MLP-автоэнкодер кіріс векторын өзінің шығысында қайта құруға үйретілді. Желі құрылымы 7 кіріс белгісі, 14 және 4 нейрондық жасырын қабаттар, қайта кеңейтетін 14 нейрондық қабат және 7 шығыс мәнінен тұрды. tanh белсендіру функциясы, Adam оңтайландырғышы және ерте тоқтату қолданылды. Автоэнкодер қалыпты бақылауларды аз қатемен қайта құрады, ал қалыпты режимге ұқсамайтын бақылауларда қайта құру қатесі ұлғаяды [115]. і бақылауының қатесі келесі өрнекпен есептелді.

$$e_i = \frac{1}{p}\sum_{j=1}^{p}(x_{ij} - \hat{x}_{ij})^2 \qquad (4.2)$$

мұндағы p – белгілер саны, x_{ij} – стандартталған кіріс, $\hat{x}_{ij}$ – желі қалпына келтірген мән. MLP-автоэнкодер үшін де, Z-score-дан басқа өзге машиналық модельдер үшін де шешім шегі оқыту жиынындағы аномалия балдарының 97-процентилі бойынша анықталды.

Көпшілік шешімі. Жеке модельдердің сезімталдығы мен жалған дабылдары әртүрлі болғандықтан, қорытынды белгі алты алгоритмнің дауысын біріктіру арқылы есептелді. Егер кемінде төрт модель бақылауды аномалия деп белгілесе, көпшілік шешімі аномалияға тең болды.

$$a_i = 1\{\sum_{m=1}^{6} I_{im} \geq 4\} \qquad (4.3)$$

мұндағы I_{im} – m моделінің і бақылауына берген екілік белгісі. Төрт дауыс шегі кездейсоқ бір немесе екі модельдің жалған дабылын басуға және алгоритмдердің басым бөлігі келіскен жағдайларды сақтауға мүмкіндік береді (4.3-кесте).

Кесте 4.3 – Алгоритмдердің конфигурациясы және шешім қағидасы

Алгоритм	Негізгі параметр	Аномалия белгісі
Z-score	Шек 3,0	max |z| > 3
Isolation Forest	250 ағаш contamination 0,03	Балл оқыту шегінен жоғары
One-Class SVM	RBF nu 0,03 gamma scale	Балл оқыту шегінен жоғары
Local Outlier Factor	35 көрші novelty режимі	Балл оқыту шегінен жоғары
Elliptic Envelope	support fraction 0,90	Балл оқыту шегінен жоғары
MLP-автоэнкодер	14 4 14 tanh early stopping	Қайта құру қатесі шектен жоғары
Көпшілік шешімі	Кемінде 4 дауыс	4 немесе одан көп модель келісті

Бағалау көрсеткіштері. Модельдер precision, recall, F1 және ROC-AUC көрсеткіштері арқылы бағаланды. TP – дұрыс анықталған аномалиялар, FP – қалыпты бақылауларға берілген жалған дабылдар, FN – өткізіп алған аномалиялар. Негізгі формулалар төменде берілген.

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \tag{4.4}$$

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \tag{4.5}$$

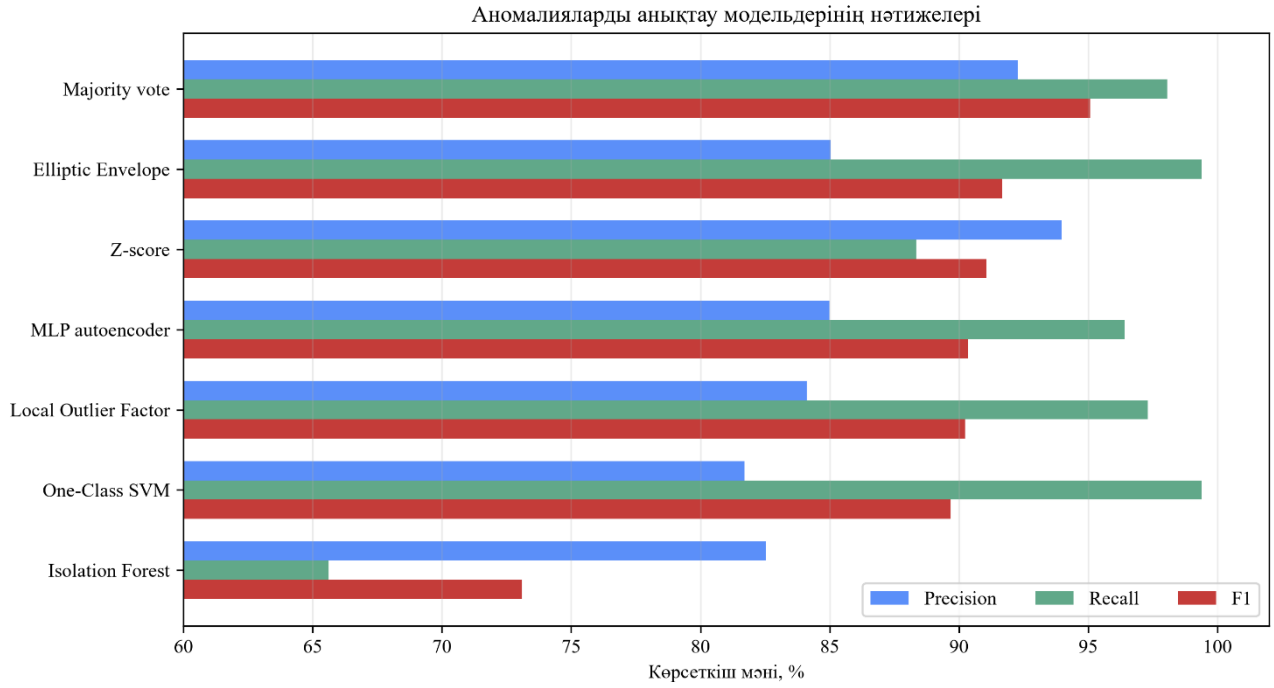
$$\text{F1} = \frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \tag{4.6}$$

Precision модель берген дабылдардың қаншасы дұрыс екенін, recall енгізілген аномалиялардың қаншасы табылғанын көрсетеді. F1 осы екі көрсеткіштің гармониялық ортасы ретінде пайдаланылды. ROC-AUC модель балдарының қалыпты және аномалиялық бақылауларды барлық ықтимал шектер бойынша ажырату қабілетін сипаттайды. Бұл жұмыста модельдерді негізгі салыстыру F1 бойынша жүргізілді, себебі өндірістік мониторингте жалған дабыл мен өткізіп алған аномалияның екеуі де маңызды. Эксперимент нәтижелері 4.4-кестеде жинақталған.

Кесте 4.4 – Алгоритмдердің тест жиынындағы нәтижелері

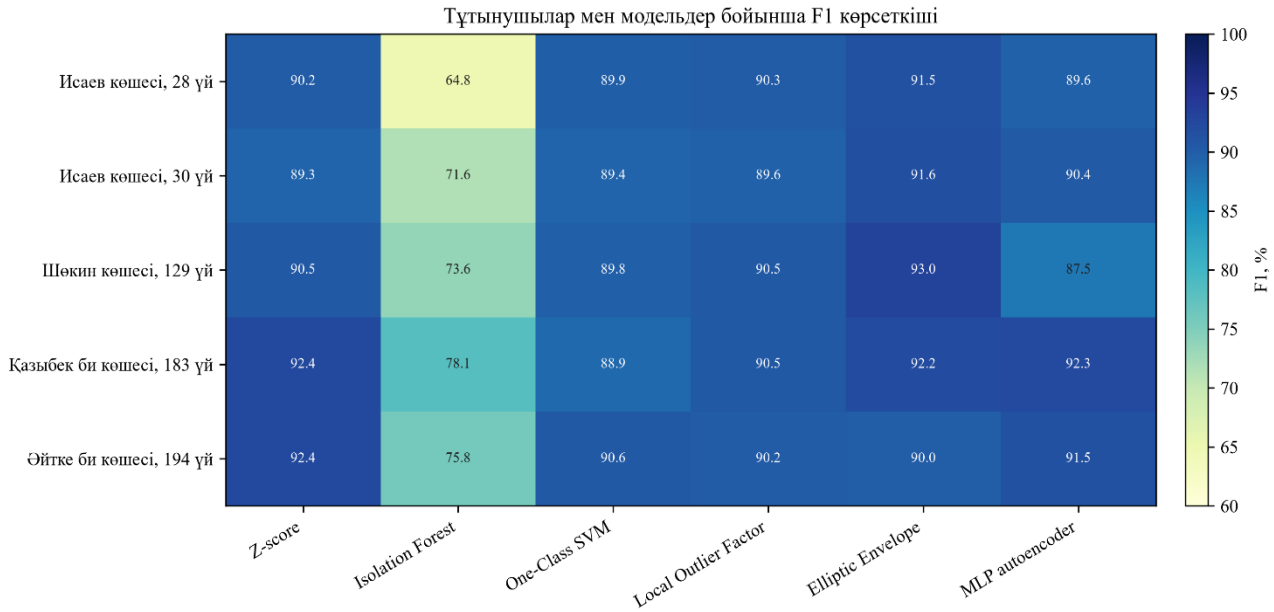
Модель	Precision %	Recall %	F1 %	ROC AUC %	P	N
Majority vote	92.26	98.06	95.07	99.58	55	13
Elliptic Envelope	85.04	99.40	91.66	99.89	17	4
Z-score	93.96	88.34	91.06	99.41	38	78
MLP autoencoder	84.98	96.41	90.34	99.62	14	24
Local Outlier Factor	84.11	97.31	90.23	99.74	123	18
One-Class SVM	81.70	99.40	89.68	99.87	149	4
Isolation Forest	82.52	65.62	73.11	95.48	3	30

4.1-сурет модельдердің қателік құрылымы әртүрлі екенін көрсетеді. Elliptic Envelope, One-Class SVM және LOF recall көрсеткішін жоғары деңгейде сақтағанымен, олардың жалған дабыл саны Z-score-мен салыстырғанда көбірек болды. Isolation Forest 230 аномалияны өткізіп алғандықтан recall 65,62% деңгейінде қалды. Көпшілік шешімі сезімтал модельдердің басымдығын сақтап, жекелеген алгоритмдердің жалған дабылдарын азайтты.



Сурет 4.1 – Модельдердің Precision, Recall және F1 көрсеткіштерін салыстыру

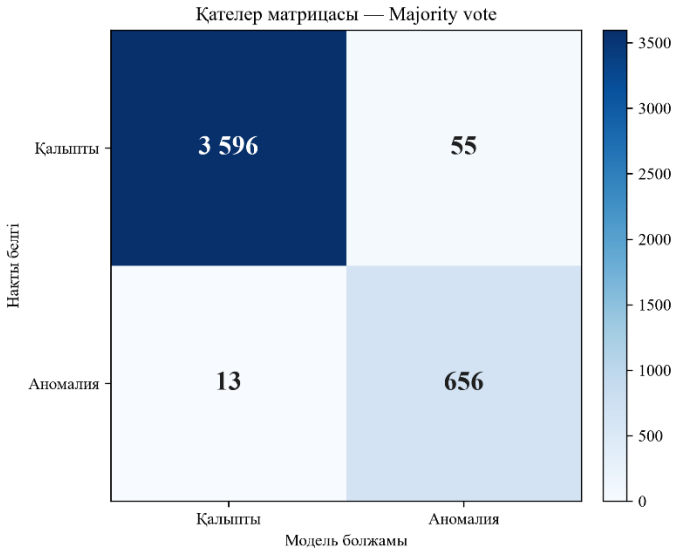
Суретте бес тұтынушы бойынша алты алгоритмнің F1 көрсеткіштері салыстырылған. Ең жоғары нәтиже Шөкин көшесі, 129 үй үшін Elliptic Envelope моделінде байқалды – 93,0%. Isolation Forest барлық тұтынушыларда салыстырмалы түрде төмен нәтиже көрсетті (64,8–78,1%), ал қалған модельдердің F1 көрсеткіштері негізінен 87,5–93,0% аралығында болды (4.2-сурет).



Сурет 4.2 – Тұтынушылар мен аномалияларды анықтау модельдері бойынша F1 көрсеткіштерінің салыстырмалы жылу картасы

Қателер матрицасы модельдің 3596 қалыпты бақылауды және 656 аномалиялық бақылауды дұрыс жіктегенін көрсетеді. 55 жалған дабыл

оператордың қосымша тексеруін қажет етеді, ал 13 өткізіп алған аномалия қауіпсіздік тұрғысынан маңызды. Сондықтан нақты жүйеде шешім шегін тек F1 максимумы бойынша емес, ақауды өткізіп алудың операциялық салмағын ескере отырып таңдау қажет (4.3-сурет).

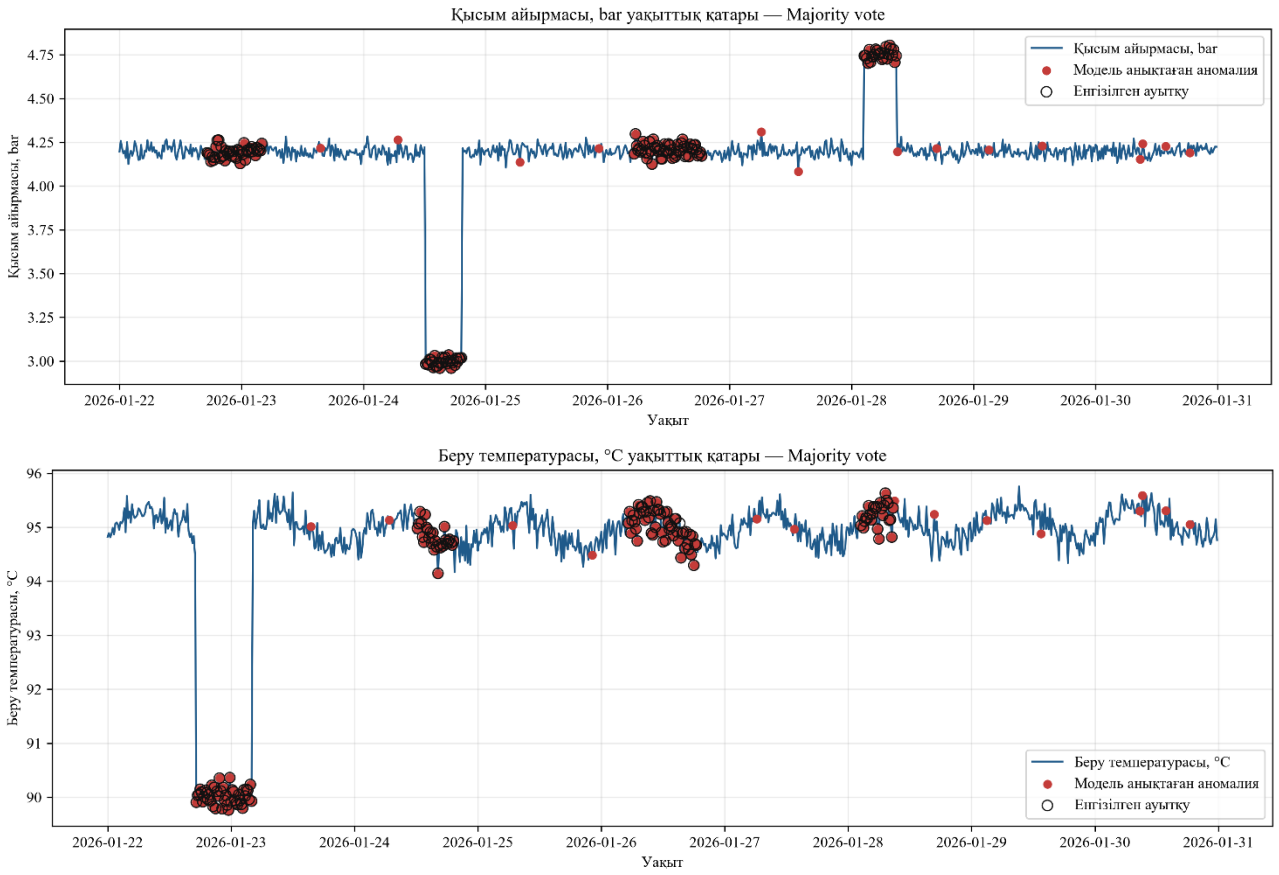


Сурет 4.3 – Көпшілік шешімінің қателер матрицасы

4.4-суретте Қазыбек би көшесі, 183 үй тұтынушысы бойынша тест кезеңінің беру температурасы мен қысым айырмасы көрсетілген. Қызыл нүктелер көпшілік шешімі анықтаған бақылауларды, қара жиекті нүктелер енгізілген ауытқуларды белгілейді. Беру температурасының шамамен 90°C деңгейіне түсуі және қысым айырмасының 3 бар маңына төмендеуі модельдер үшін анық бөлінетін режимдер болды. Жекелеген қысқа қызыл белгілер қалыпты режимдегі жалған дабылдарды көрсетеді.

Нәтижелер бір ғана алгоритмге сүйенгеннен гөрі әртүрлі математикалық қағидаға негізделген модельдерді біріктіру тиімді болғанын көрсетті. Z-score жеке белгінің үлкен ауытқуын дәл ұстаса, Elliptic Envelope корреляциялық құрылымды есепке алды. LOF жергілікті тығыздықтағы өзгерістерге, One-Class SVM сызықтық емес шекараларға, MLP-автоэнкодер көпөлшемді қайта құру қатесіне жауап берді. Осы айырмашылықтар көпшілік шешімінде бірін-бірі толықтырды.

Elliptic Envelope жеке модельдер арасында үздік F1 көрсетті және 669 аномалияның 665-ін анықтады, бірақ 117 жалған дабыл берді. Z-score жалған дабылды 38-ге дейін азайтты, алайда 78 аномалияны өткізіп алды. MLP-автоэнкодердің F1 көрсеткіші 90,34% болғанымен, бұл нәтижені терең нейрондық модельдің өндірістік артықшылығы ретінде түсіндіруге болмайды: деректер көлемі шағын, құрылымы синтетикалық және желі архитектурасы кең гиперпараметрлік іздеуден өтпеген. Isolation Forest нәтижесінің төмен болуы да алгоритмнің жалпы жарамсыздығын емес, осы деректер генерациясы мен таңдалған параметрлер жағдайындағы сәйкестігін сипаттайды.



Сурет 4.4 – Беру температурасы мен қысым айырмасындағы аномалияларды анықтау мысалы

Алынған ROC-AUC мәндерінің өте жоғары болуы басқарылатын аномалиялардың қалыпты режимнен айқын бөлінуімен байланысты болуы мүмкін. Нақты желіде маусымдық өзгерістер, датчик дрейфі, жөндеу режимдері, байланыс үзілістері және операторлық араласулар қалыпты және ақаулы режимдердің шекарасын күрделендіреді. Сондықтан синтетикалық тест нәтижелерін нақты объектіге тікелей көшіру модель сапасын асыра бағалауға әкелуі ықтимал.

Ұсынылған модуль цифрлық егіз архитектурасында Python интеграциялық сервисінен кейін орналасуы мүмкін. OPC UA арқылы алынған және типі, өлшем бірлігі, диапазоны мен уақыт белгісі тексерілген деректер модельге беріледі. Көпшілік шешімі аномалия анықтаған кезде Fluidit Heat сценарийі іске қосылып, ықтимал ақаудың қысымға, температураға, шығынға және жылу тапшылығына әсері есептеледі. Осылайша дерекке негізделген ерте ескерту физикаға негізделген модельдік тексерумен толықтырылады. Мұндай құрылым мақалада ұсынылған келешек гибридтік тәсілге сәйкес келеді [110].

Диссертацияда осы нәтижелерді толық эксперименттік дәлел ретінде көрсету үшін нақты өндірістік деректер қажет. Кестелік мәндер бағдарламаның логикасын құруға және бастапқы апробация жасауға жеткілікті, бірақ модельдің жалпылау қабілетін бағалауға жеткіліксіз. Келесі кезеңде кемінде бір толық жылыту маусымын қамтитын архив ұсынылады. Деректер жиынына мына

ақпарат кіруі тиіс:

- әр тұтынушы бойынша бірдей уақыт қадамындағы беру және қайтару температурасы, беру және қайтару қысымы, шығын және жылулық жүктеме;
- сыртқы ауа температурасы, сорғы және реттеуші арматура күйлері, қазандық немесе жылу көзі режимдері;
- авариялар, ағып кетулер, датчик ақаулары, жөндеу жұмыстары және оператор әрекеттері көрсетілген уақыт белгісі бар журнал;
- жоғалған мәндер, байланыс үзілістері, өлшем бірліктері және датчик калибрлеуі туралы сапа метадеректері;
- кемінде әртүрлі сыртқы температура мен жүктеме деңгейлерін қамтитын оқыту, валидация және тәуелсіз тест кезеңдері.

Нақты валидацияда деректер уақыт бойынша бөлінуі тиіс: модель ертерек кезеңде үйретіліп, кейінгі кезеңде тексеріледі. Кездейсоқ араластыру уақыттық тәуелділікті бұзып, болашақ ақпараттың оқытуға өтіп кетуіне әкелуі мүмкін. Шектер валидация жиынында таңдалып, соңғы тест жиыны бір рет қана бағалануы керек. Ақау белгілері сенімді журналмен расталмаса, precision, recall және F1 нақты өндірістік мағынада есептелмейді; мұндай жағдайда нәтижелер тек сараптамалық тексеру немесе термогидравликалық модельмен салыстыру арқылы сипатталады.

Өндірістік енгізуде жалған дабыл құны мен ақауды өткізіп алу құны жеке бағаланады. Қауіпсіздікке ықпалы жоғары ақаулар үшін recall басым болуы мүмкін, ал операторға шамадан тыс жүктеме түсіретін жүйеде precision арттыру қажет. Модель шешімі автоматты басқару командасына тікелей айналмауы тиіс. Алғашқы кезеңде ол операторға кеңес беретін режимде қолданылып, модель дрейфі мен маусымдық тұрақтылығы үздіксіз бақыланады.

4.3 Жылу энергиясын есепке алу жүйесін зерттеу және әзірлеу

Жылу санауыштар және отын жағу маусымында жылу энергиясын есепке алу процесі елдегі жылыту реформасының, сонымен қатар электрмен жабдықтау политикасының маңызды элементі болып табылады. Мысалы, Қазақстан Республикасы Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігінің ұлттық статистика бюросының деректері бойынша 2023 жылы 95 491,9 мың Гкал энергия, 2022 жылы 94 287,9 мың Гкал энергия шығарылды [110]. Бұл жылу энергиясын тұтынушыларының артқанын көрсетеді. Қоршалған ғимараттардың жылу техникалық сипаттағы нақты және тиімді өлшемдері сол жерде электр тұтынуын анықтау және ғимараттардағы жылулық ыңғайлылықты қамтамасыз ету үшін маңызды болып есептеледі. Осы мақсатта [111] жұмыстың авторы жылудың жинақталу әсерін жою әдісін және жылу инерциясының әсерін жоюға мүмкіндік беретін жылу ағынының өлшеу әдісін ұсынады. Бұл әдіс термостатикалық бокс және әр түрлі тқрт шарт барысында сол жерде қабырғалардың жылу кедергісін өлшеу көмегімен тексеріледі. Өлшем нәтижелері жаңа әдістің ауытқуы 6% ғана болатын жақсы нәтиже беретінін көрсетті. Демек, зерттеу авторлардың ойынша, ұсынылған әдіс төменгі дәлдік мәселесін, мезгілдік шектеулерді және жылу ағынын өлшеу әдісі үшін ұзақ

сынақ циклдерін тиімді шеше алады, сондай ақ сәйкес зерттеулер үшін аса сенімді негіз бола алады.

Зерттеу нәтижелері бойынша [112] Ұлыбританиядағы тұрғын үй кешенінде жылу желісіне қосылған 94 үйден қызып кету, тұрғындардың ыңғайсыздығы және желінің тиімділігі төмен мәселелері байқалды. Желі өнімділігін бағалау және жақсарту мақсатында мүмкіндіктерді анықтауды бағалау үшін счетчик көрсеткіштерін автоматтандырылған санау жүйесі орнатылды. Деректер Цельсий бойынша 74/66 градус температура кезінде желінің жұмыс жасағандығын және желінің жалпы шығыны әр пәтерге 1000 Вт-тан асқанын көрсетті. Зерттеуге сәйкес, толық әдістеме және жылулық сорғы немесе төментемпературалық орталықтандырылған жылыту сияқты төмен көміртекті жылу көздеріне болашақта жалғану үшін жылу желісін жаңарту бойынша ұсыныстарды көрсетті. Сапаны бақылау жобалаы, орнату және жобаның сәтті болуын қамтамасыз ету мен кілттік сатыларын жету үшін пайдалануға беру сатыларында жүзеге асты.

Қазіргі таңда жұмыс температурасы жылутасымалдағыштың жөнелту және кері қайтаруы Цельсий бойынша 55/37 градуске дейін төмендетілді, ол газ тұтынуын 38%, желідегі жылу шығынын 90% қысқартуға мүмкіндік береді. Қазіргі кезде жылу шығындары бір ғимаратта 56 Вт құрайды. Деректерге негізделген мұндай тәсіл біруақытта тұрғындардың ыңғайлығын арттырды, жылытуға кеткен шығынды азайтты және төмен көміртекті жылыту көздеріне олар қол жетімді болғанда қарапайым жалғануды қамтамасыз етті.

Қала ғимараттарының энерго тұтыну моделі көп жағдайда үлкен қалалардағы ғимараттарда энергияның қалай пайдаланылатынын түсіну үшін энергияны сақтау бойынша зерттеулерде қолданылады. Көптеген зерттеулерде қолданылатын типтік модельдерде ғимарат құрылымын қоршайтын жылу қорғаныстық қасиеті бар есептік мәндер қолданылады, бірақ, ескіру фаторынан туындаған жылу берудегі өзгерістер есепке алынбайды. [113] жұмыстың авторлары 30 ғимаратты тексеру нәтижесінде алынған ғимараттарды қоршау құрылымының деградация моделі ұсынылған. Алынған тарату қисығы қала ғимараттарының электрмен жабдықтау моделін әзірлеу үшін және оның ғимараттың энерго тұтынуына әсерін талдау үшін қолданылды. Алдымен жылу ағынының өлшегішінің көмегімен 30 ғимараттың жылу беру коэффициенті өлшенді, кейін жылу беру коэффициентінің деградация моделі ұсынылды. Екі сценарий құрылды: біреуі деградация моделінен жылу беру коэффициентін қолдану арқылы, екіншісі жобалау кезінде пайдаланылған және базалық модель ретінде қызмет еткен жылу берудің шығыс коэффициентерін пайдалану арқылы. Веллингтонда, Жаңа Зеландияда 68532 ғимаратқа тақырыптық зерттеу жүргізілді. Ғимараттар туралы ГИС деректер жиынтығы 16 архетип құру үшін талданды, OpenStudio және AutoBPS EnergyPlus бағдарламасында ғимараттың энергетикалық моделін құру үшін қолданылды. 1978 жылдан 2022 жылдар аралығында құрылған ғимараттар үшін EnergyPlus бағдарламасында деградация моделімен бірге 720 модель құрылды. Нәтижелер 2004 жылдан кейін құрылған, әсіресе 40 жылдан асқан ғимараттарда U-коэффициентінің нақты және бастапқы мәндерінің арасында айырмашылық бар екенін көрсетті.

Сонымен қатар, жылу энергиясын есепке алу жүйелерінде термоэлектрлік модульдің (ТЭМ) нақты сипаты оны қолдану үшін қажетті шарт болып табылады.

ТЭМ физикалық параметрлерінің арасында жылу ағыны шешуші мән атқарады, бірақ ол өлшеу үшін күрделі параметр емес. [5] мақалада жоғарыда сипатталған жылу шығынын өлшеу тәсілдері мен мыс-шыны-мыстан тұратын көпқабатты құрылымды ТЭМ сипатын анықтау үшін жылулық расходометр ұсынылады. Расходометрдің дәлдігіне әсер ететін кілттік факторлар жобалау қағидалары мен дайында процедураларын анықтау үшін модельдеу көмегімен талданады. Жылулық расходометрді калибрлеу үшін жылу ағыны мен температура арасындағы өзірі байланысты түсіну үшін қолдан жасалған калибрлық құрылғы пайдаланылады. ТЭМ нақты сипаты жылу энергиясын технологиялық есепке луды дамыту үшін үлкен потенциалды көрсетеді. Бұдан басқа, [6] жұмыстың авторлары мұнау газ секторының өндірісінде үлкен қызығушылық көрсететін, МЭК 61131-3 стандарт тілін қолдана отырып жылу энергиясы мен жылу тасымалдағыштың есептік аспаптарын басқарудың автоматтандырылған жүйесін ұсынған.

Жылумен жабдықтаудың автоматтандырылған басқару жүйесінің (ЖЖАБЖ АСУТ) негізі жылыту энергиясының жылу тұтынуын және әзірленіп жатқан жылу санауышты қолдана отырып, ыстық сумен жабдықтауды есептеу алгоритмі болып табылады. Қолданыстағы жылу энергиясын және жылу тасмылдағышты жіберуді есепке алу ережесіне сәйкес тұтынуды есептеу үшін екі мезгіл, яғни жаз бен қыс қарастырылған. Сол себепті ЖЖАБЖ түрлі айнымалыларды және жыл мезгілін анықтаумен сәйкес коэффициенттер мен есептеу параметрлері үшін даталарды қарастыру қажет.

Алгоритм келесідей логикадн тұрады.

1. Алдымен datetime және date.today() функциясының көмегімен ағындық дата анықталады. Сонымен қатар datetime.now().year көмегімен ағындық жыл анықталады.

2. Содан кейін жазғы маусымның басталу және аяқталу даталары орнатылады. Берілген жағдайда жазғы маусым ағындық жылдың 15-ші сәуірінен 14-ші қазанға дейін деп есептеледі.

3. check_summer_date() функциясы сәйкес бульдік мәнді қайтара отырып, ағындық дата жазғы маусымның ішінде орналасатындығын тексереді.

4. Негізінен АСУТП бағдарламалық жасақтамасының әзірленген код блогында жыл мезгіліне тәуелді есептер орындалады (4.5-сурет).

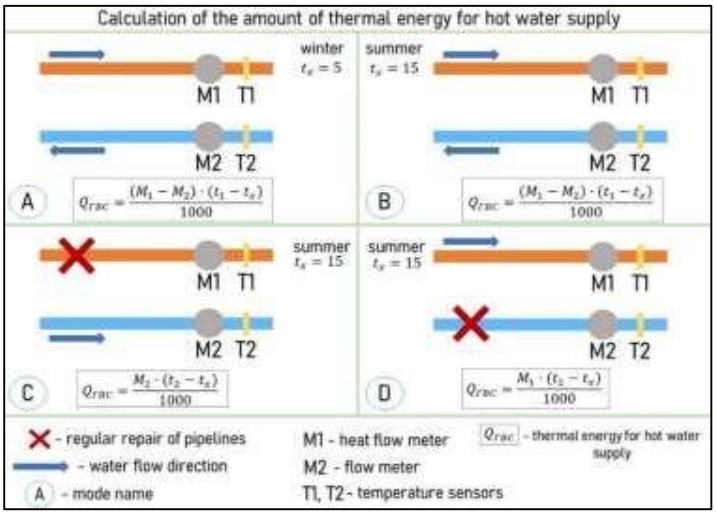
Жазғы маусымда:

- жылу тасымалдағыштың (m1_flow_meter и m2_flow_meter) шығынын өлшеу мәні нолге тең еместігі тексеріледі. Егер екі мән де нолге тең болмаса, шығындар мен температураның әр түрлілігінің (t1_temp_sensor - tx_summer) негізінде ыстық судың шығыны (Q_gvs) есептеледі;

- егер тек m1_flow_meter нолге тең болмаса, ыстық судық өлшемі (Q_gvs) m1_flow_meter мәні мен температураны әртүрлілігінің (t1_temp_sensor - tx_summer) негізінде есептеледі;

- егер тек m2_flow_meter нолге тең болмаса, ыстық судық өлшемі (Q_gvs)

m2_flow_meter мәні мен температураны әртүрлілігінің (t2_temp_sensor - tx_summer) негізінде есептеледі.



Сурет 4.5 – Жазғы уақытта тұтынылатын ыстық судың жылу энергиясын есептеу терезесі

Қысқы маусымда:

- ыстық судың шығыны (Q_gvs) әртүрлі шығындар және температуралар (m1_flow_meter-m2_flow_meter және t1_temp_sensor-tx_winter) негізінде есептеледі;

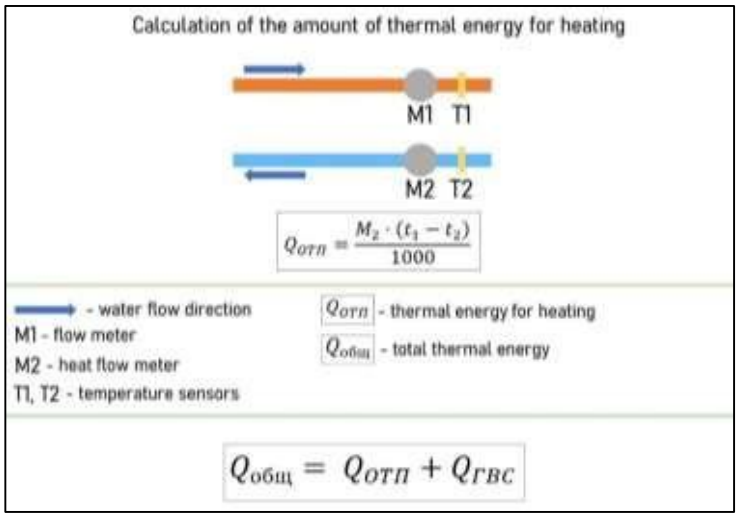
- m2_flow_meter мәні мен температураны әртүрлілігінің (t1_temp_sensor - t2_temp_sensor) жылу шығыны (Q_otp) есептеледі;

- жалпы жөнелтілген энергия (Q_total) ыстық су шығынының қосындысына және жылу шығынына (Q_otp) тең.

Осы кодтың орындалу нәтижесінде *Q*общ айнымалысы жылу тасымалдағыш пен уақыт мезгіліне тәуелді температуралық датчиктердің өлшем мәндерінң негізінде есептелен шығынның жалпы берілген энергиясынан тұрады. Төменде әзірленетін жылу санауыш үшін жылытудың жылу энергиясын тұтынуды және (ЫСЖ-ГВС) есептеу үшін Python тілінде әзірленген бағдарлама коды ұсынылған (Қосымша Г).

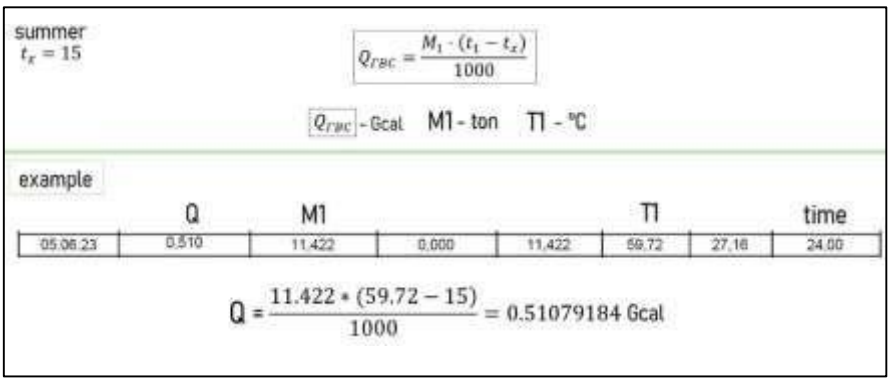
Берілген код әзірленетін жылу санауышын пайдаланала отырып, жылытудың жылу энергиясын тұтынуды және (ЫСЖ) есептеу алгоритмімен сәйкес жазылған. Әр түрлі айнымалылар мен даталар жыл мезгілін және сәйкес коэффициенттер мен есептеуге арналған параметрлер таңдауын пайдаланады.

Сәйкес сұлбалар мен қысқы маусым үшін есептік формулалар 4.6-суретте келтірілген.



Сурет 4.6 – Қысқы маусымдағы тұтынылатын жылу энергиясын есептеу терезесі

4.7-суретте көрсетілген мысалда бірінші шығын өлшегіш (M1) мен температура мәндері ($T1$ және $T2$) бар жазғы маусымдағы жағдай қарастырылады. Бұл кезде екінші расходометр нолге тең деп алынады, ол жүйенің циркуляцияланбайтынын және M2 нолге тең болғандағы формуланың қолданылатынын білдіреді.



Сурет 4.7 – Жылытудың тұтынылатын жылу энергиясын және ыстық сумен жабдықтауды есептеу мысалы

Шығыс мәндер:

- $M1$ (бірінші расходометрдің шығыны) = 11,422 Гкал;
- $M2$ (екінші расходометрдің шығыны) = 0 Гкал;
- $T1$ (беріліс температурасы) = 52,72 °C;
- $T2$ (кері қайтару температурасы) = 27,16 °C;

Жөнелтілген энергияның (Q) гигокалориямен (Гкал) санын есептеу формула арқылы орындалады:

$$Q = M1 \cdot (T1 - T_x)/1000 \quad (4.7)$$

мұндағы: $M1$ – ыстық судың шығыны, Гкал; $M2$ – беріліс температурасы, °С; T_x – жазғы маусымдағы берілген температура °С (бұл жағдайда 15 °С); Q – жөнелтілген энергия саны, Гкал.

Шығыс деректерді (1) формулаға қоя отырып, төмендегі мән алынады:

$$Q = 1{,}422 \cdot \frac{(52{,}72 - 15)}{1000} \approx 0{,}5107984 \text{ Гкал}$$

Демек, берілген мысалда өлшемдер мен берілген ыстық су мен температураны шығын параметрлерін электромагнитті жылу санауышты пайдалана отырып, жазғы маусымда 0,51079184 Гкал көлемде жөнелтілген энергияның мәні алынды. Бұл мән берілген мезгілде ыстық сумен жабдықтау жүйесінен берілген жылу санын бағалауға мүмкіндік береді.

Берілген зерттеу нәтижесінде электромагнитті жылу санауыштың зертханалық үлгісі дайындалды (4.8-сурет). Электромагнитті жылу санауыштың жұмысы электромагнитті индукция қағидасына негізделген. Ол екі катушкалы секциядан тұрады, оларды бірі жылутасымалдағыштың берілісінде, екіншісі кері жолақта орнатылған. Жылу тасымалдағыш секциялар арқылы өткен кезде электромагнитті өріс туындайды және олардың өзара әсері ағындық жылу тасымалдағыш көлеміне пропорционал болатын сигналды құрады.



Сурет 4.8 – «Сайман-АУЭС» жылу есептеуіш құралы

Электромагнитті жылу санауыштардың көмегімен жылу тасымалдауыш көлемі, беріліс және кері қайтару температурасы сияқты параметрлерді өлшеуге және жылыту немесе суыту жүйесі арқылы жөнелтілген жылу санын есептеуге де болады. Әдетте, олардың ағындық жылу тұтынуы мен басқа ақпараттарды бейнелейтін дисплейі болады.

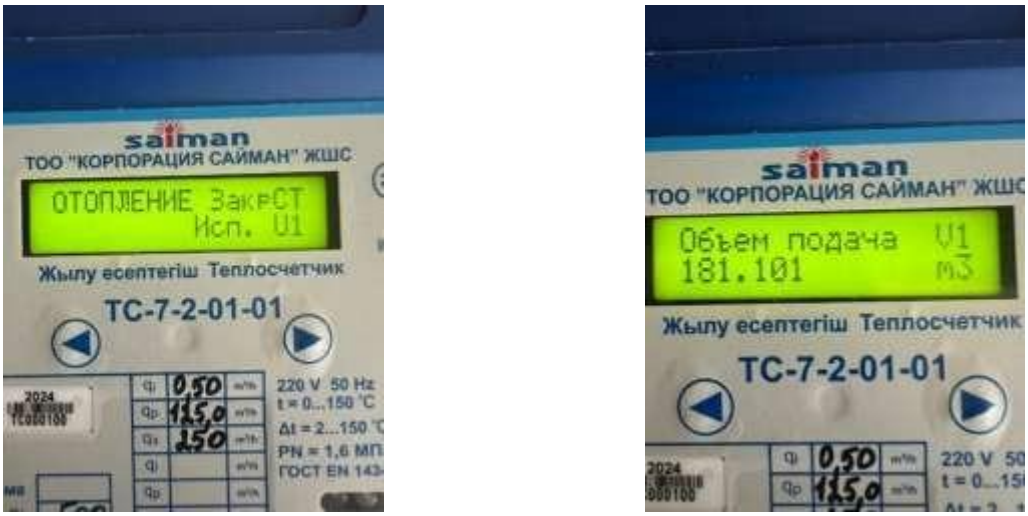
Электромагнитті жылу санауыштар (кейде электромагнитті өлшеу қағидасына негізделген жылу санауыштары деп те аталады) жылыту және суыту жүйелерінде жөнелтілген жылу энергиясының санын анықтау және жылу

тасмылдауыштың шығынын өлшеу үшін пайдаланылады. Олар коммерциялық және тұрғын үй ғимараттарында жылу тұтынуды есепке алу үшін кеңінен қолданылады.

Электромагнитті жылу санауыштардың жетістіктері өлшемнің жоғарғы дәлдігінен, әр түрлі пайдалану шарттарында тұрақты жұмыстан, қызмет көрсетуді талап ететін жылжымалы құрамның болмауы мен жылутасымалдағыш ағынының төмен кедергісінен тұрады. Олар су немесе гликоль сияқты әр түрлі жылу тасымалдағыштарда жүйелердегі жылу энергиясының шығынын өлшеу үшін қолданыла алады.

Әдетте электромагнитті жылу санауыштар кәсіби орнатуды және нақты өлшемдерді қамтамасыз ету үшін баптауларды талап етеді. Бұдан басқа, олар сенімділік пен дәлдіке кепілдеме беру үшін жиі жиі тексерістен өтуі қажет.

4.9-суретте сұйыққристалды индикатор (СКИ) күйі көрсетілген.



а) ә)

Сурет 4.9 – Жылу есептеуіш құралы СКИ күйі:
а) «0» орнату; ә) өлшеу

Сынақ шарттары: төменде келтірілген формула бойынша ақаулықтарды анықтау:

$$\text{Пайызбен көрсетілген ақаулық} = \frac{\text{санауыш көрсеткіші}}{\text{нақты көрсеткіш}} \cdot 100 \qquad (4.8)$$

Сынақ нәтижесі пайызбен көрсетіледі.

Тексеру.

Нақты көрсеткіш 180,960 м^3.

Санауыш көрсеткіші 181,101 м^3, яғни өлшем ақаулығы 0,141 м^3 құрайды.

$$\text{Пайызбен көрсетілген ақаулық} = \frac{181.101 - 180.960}{0.989} \cdot 100 = 0{,}0778\ \%$$

Сынақ кезінде алынған мән бұйым құжатында берілген ақаулық шегінен аспайды.

Берілген және басқа сынақ нәтижелерінде әзірленген жылу санауышына ТС-7-Х-ХХ-ХХ типті өлшеу құралы ретінде оны растайтын және Қазақстан Республикасының аумағында айналымға жіберілетін 28.12.2023 ж. «Техникалық реттеу және метрология Комитеті» РММ №2459 сертификаты алынды.

Төртінші бөлім бойынша қорытынды

Екінші бөлімді ұсынылған цифрлық егіз архитектурасы алты аномалияны анықтау алгоритмімен толықтырылды. 30 тәулікке арналған синтетикалық уақыттық қатарда көпшілік шешімі precision 92,26%, recall 98,06% және F1 95,07% көрсетті. Ол ең жақсы жеке модель Elliptic Envelope нәтижесінен F1 бойынша 3,41 пайыздық тармаққа жоғары болды. Беру температурасының төмендеуі, қысым айырмасының азаюы, ағып кету имитациясы және датчик ақауы толық анықталды, ал 120% жүктеме сценарийі 95,19% деңгейінде табылды.

Ұсынылған нәтиже Python негізіндегі аномалия детекторын OPC UA және термогидравликалық модельмен біріктірудің техникалық орындылығын көрсетеді. Диссертациядағы қорытынды шағын әрі нақты шектеумен берілуі тиіс: есептеу тәжірибесі әдістемені апробациялайды, бірақ нақты жылу желісіндегі диагностикалық дәлдікті дәлелдемейді. Соңғы ғылыми қорытынды үшін өндірістік архив, оқиғалар журналы және уақыт бойынша тәуелсіз тест қажет.

Жылу санауыштың зертханалық үлгісінің сынақ нәтижелері сынақтың жүру процедурасын толық сипаттайтын, деректер мен нәтижелер талдауынан тұратын хаттама түрінде көрсетілген. Хаттама дайындау уақытының сәтті аяқталғанын және үлгінің сынағын, сонымен қатар оның жоғары жұмыс қабілеттігі мен сенімдігін көрсетеді. Алынған нәтижелер зертханалық үлгінің техникалық талаптар мен стандарттарға сәйкестігін растайды, ол өз кезегінде оның сәйкес пайдалану шарттарында ары қарай қолдану үшін жарамдығын көрсетеді.

Өңделген жылу санағышына 28.12.2023 ж. «Техникалық реттеу және метрология Комитеті» РММ №2459 сертификаты алынды, ол оны КО-7-Х-ХХ-ХХ типті өлшеу құралы ретінде бекітеді және Қазақстан Республикасының аумағында айналымға жіберетіндігі көрсетілген.

Қазақстан Республикасының жылу секторының барлық талаптарын ескеретін жылу энергиясын есептеу жүйесін құружылу энергиясының тұтыну тиімдігін арттыруға және импортқа тәуелдікті төмендетуге алып келеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық жұмыста ауданның орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесіндегі режимдік ауытқуларды анықтау және отын тұтынуды оңтайландыруға бағытталған басқару шешімдерін негіздеу үшін цифрлық модельдеу мен технологиялық деректерді талдауды қолдану тәсілі зерттелді. Жүргізілген зерттеу нәтижесінде келесі ғылыми және практикалық нәтижелер алынды.

1. Жылумен жабдықтау жүйелерін жетілдіру қажеттілігі негізделді. Қазақстандағы жылу энергетикасының қазіргі жағдайы, жылу өндіру мен тұтыну көрсеткіштері және цифрландыру бағыттары талданды. Жылу желілерінің тозуы, жылу шығындары, өлшеу деректерінің жеткіліксіздігі мен ақпараттық жүйелердің бытыраңқылығы тиімді басқаруды шектейтін негізгі факторлар ретінде анықталды. Осы мәселелерді шешу үшін физикалық модельдерді, автоматтандыру құралдарын және деректерді талдау әдістерін өзара байланысты қолдану қажеттігі көрсетілді.

2. Цифрлық егіздің бағдарламалық архитектурасы әзірленді. TIA Portal, виртуалды SIMATIC S7-1500 контроллері, WinCC, Python және Fluidit Heat құралдары Software-in-the-Loop контурында біріктірілді. OPC UA арқылы технологиялық параметрлерді оқу, деректерді тексеру, модельдеуді іске қосу және есептеу нәтижелерін контроллерге қайтару ұйымдастырылды. Бірдей конфигурацияда орындалған он қайталама сынақта SIL циклінің орташа ұзақтығы 23,509 секундты, стандарттық ауытқуы 0,907 секундты құрады. Нәтижелер бағдарламалық деректер алмасуы мен модельдеу циклінің жұмыс қабілетін көрсетті.

3. Жылу желісінің математикалық және термогидравликалық сипаттамасы құрылды. Масса мен энергия баланстары, құбырлардың гидравликалық кедергісі, жылу алмасу, тұтынушылардың жүктемесі және жылу көзінің отын шығыны арасындағы байланыстар сипатталды. Fluidit Heat ортасында нақты желі учаскесінің деректері негізінде алты жұмыс сценарийі зерттелді. Беру температурасы 90 °C болатын сценарийде есептік желілік жылу шығыны базалық режимдегі 7,298 кВт-тан 6,820 кВт-қа төмендеді, ал жылутасымалдағыш шығыны 12,288 л/с-тан 13,664 л/с-қа артты. Бұл режимдерді таңдауда жылулық және гидравликалық көрсеткіштерді бірге ескеру қажеттігін көрсетті.

4. Басқару компоненттерінің өзара әрекеттесу логикасы формалданды. UPPAAL ортасында уақыттық автоматтар желісі құрылып, датчик ақауы, OPC UA байланысының бұзылуы, Fluidit есептеу қызметінің істен шығуы және процестік ақау сценарийлері қарастырылды. Модельде берілген шарттар шеңберінде қауіпсіз басқаруға өту, рұқсат етілмеген командаларды бұғаттау, тығырықтық күйлердің болмауы және жауап беру мерзімдерін сақтау талаптары тексерілді. Алынған нәтиже бағдарламалық компоненттерді үйлестірудің логикалық және уақыттық дұрыстығына қатысты.

5. Имитациялық модельдің есептеу нәтижелері салыстырмалы түрде бағаланды. MATLAB/Simulink/Simscape ортасында әзірленген тәуелсіз модель Fluidit Heat нәтижелерімен 100% және 120% жүктемелерде салыстырылды.

Жеткізілген жылу қуатының салыстырмалы ауытқуы 0,003%-дан аспады, жылу көзі қуатының ауытқуы 0,025%-дан төмен болды. Шығын мен жылутасымалдағыш жылдамдығының орташа абсолютті пайыздық қатесі 1,92–1,99% аралығында, тұтынушылардағы қысым айырмасы бойынша қате 0,25%-дан аспады. Желілік жылу шығындары бойынша 6,21% және 10,81% айырмашылықтар анықталып, жылу алмасу параметрлерін әрі қарай нақтылау қажеттігі көрсетілді.

6. Аномалияларды анықтау алгоритмдері іске асырылып, салыстырылды. Z-score, Isolation Forest, One-Class SVM, Local Outlier Factor, Elliptic Envelope және MLP-автоэнкодер алгоритмдері зерттелді. Синтетикалық уақыттық қатарларға беру температурасының төмендеуі, қысым айырмасының азаюы, жүктеменің 120%-ға өсуі, ағып кетуге ұқсас ауытқу және датчик ақауы енгізілді. Кемінде төрт модельдің келісіміне негізделген көпшілік шешімі 4320 тестілік бақылауда precision = 92,26%, recall = 98,06% және F1 = 95,07% нәтижесін көрсетті. Ең жоғары жеке F1 көрсеткішін берген Elliptic Envelope әдісімен салыстырғанда өсім 3,41 пайыздық тармақты құрады. Алынған көрсеткіштер синтетикалық деректердегі есептеу тәжірибесіне қатысты.

7. Жылу энергиясын есепке алу құралдары әзірленді. Жазғы және қысқы жұмыс кезеңдерін ескеретін жылыту мен ыстық сумен жабдықтаудың жылу энергиясын есептеу алгоритмі ұсынылды. Жылу есептегіштің зертханалық үлгісі дайындалып, сынақ нәтижелері хаттамамен рәсімделді. 28.12.2023 жылғы №2459 сертификатпен өлшеу құралының түрі бекітіліп, оның Қазақстан Республикасы аумағында айналымға жіберілуі рәсімделді. Бұл нәтиже жылу тұтынуын өлшеу мен есепке алудың аспаптық негізін толықтырады.

8. Нәтижелерді қолдану аясы мен әрі қарай тексеру бағыттары айқындалды. Ұсынылған архитектура мен модельдер режимдік параметрлерді бақылауға, ауытқуларды анықтауға және диспетчерлік шешімдерді есептік тұрғыдан негіздеуге арналған. Аномалияларды анықтаудың өндірістік сапасын растау үшін нақты өлшеулер, расталған ақаулар журналы және уақыт бойынша тәуелсіз тексеру қажет. Отын үнемдеудің өндірістік әсерін бағалау бірдей жылу жүктемесі мен сыртқы жағдайларда базалық және өзгертілген басқару режимдерінің отын шығынын салыстыруды талап етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕККӨЗДЕР ТІЗІМІ

1. Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаевтың «Әділетті мемлекет. Біртұтас ұлт. Берекелі қоғам» атты Қазақстан халқына Жолдауы [Электрондық ресурс] // Қазақстан Республикасы Президентінің ресми сайты. – 2022. – 1 қыркүйек. – URL: https://www.akorda.kz/kz/memleket-basshysy-kasym-zhomart-tokaevtyn-kazakstan-halkyna-zholdauy-181416 (қаралған күні: 26.09.2026).

2. Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаевтың «Әділетті Қазақстанның экономикалық бағдары» атты Қазақстан халқына Жолдауы [Электрондық ресурс] // Қазақстан Республикасы Президентінің ресми сайты. – 2023. – 1 қыркүйек. – URL: https://www.akorda.kz/kz/memleket-basshysy-kasym-zhomart-tokaevtyn-adiletti-kazakstannyn-ekonomikalyk-bagdary-atty-kazakstan-halkyna-zholdauy-18333 (қаралған күні: 26.09.2026).

3. Мемлекет басшысы Қасым-Жомарт Тоқаевтың «Жасанды интеллект дәуіріндегі Қазақстан: өзекті мәселелер және оны түбегейлі цифрлық өзгерістер арқылы шешу» атты Қазақстан халқына Жолдауы [Электрондық ресурс] // Қазақстан Республикасы Президентінің ресми сайты. – 2025. – 8 қыркүйек. – URL: https://www.akorda.kz/kz/memleket-basshysy-kasym-zhomart-tokaevtyn-kazakstan-halkyna-zholdauy-zhasandy-intellekt-dauirindegi-kazakstan-ozekti-maseleler-zhane-ony-tubegeyli-cifrlyk-ozgerister-arkyly-sheshu-881957 (қаралған күні: 26.09.2026).

4. International Energy Agency. *Renewables 2025: Renewable Heat*. Paris: IEA, 2025. https://www.iea.org/reports/renewables-2025/renewable-heat.

5. UNEP; GlobalABC. *Global Status Report for Buildings and Construction 2024–2025*. Paris, 2025. https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/47261.

6. International Energy Agency. *Renewables in District Energy*. Paris: IEA, 2026. https://www.iea.org/reports/renewables-in-district-energy.

7. International Renewable Energy Agency. *World Energy Transitions Outlook 2024: 1.5°C Pathway*. Abu Dhabi: IRENA, 2024. https://www.irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024.

8. International Energy Agency. *Heat Pump Monitor 2026*. Paris: IEA, 2026. https://www.iea.org/reports/heat-pump-monitor-2026.

9. Lund, H.; Werner, S.; Wiltshire, R.; et al. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems. *Energy*. 2014, 68, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089.

10. Buffa, S.; Cozzini, M.; D'Antoni, M.; Baratieri, M.; Fedrizzi, R. 5th Generation District Heating and Cooling Systems: A Review of Existing Cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, 104, 504–522. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059.

11. International Energy Agency. Opportunities for District Heating in the Changing Energy Landscape. Paris: IEA, 2025. https://www.iea.org/commentaries/opportunities-for-district-heating-in-the-changing-energy-landscape.

12. Zheng, X.; Shi, Z.; Wang, Y.; Zhang, H.; Tang, Z. Digital Twin Modeling for District Heating Network Based on Hydraulic Resistance Identification and Heat Load

Prediction. *Energy*. 2024, 288, 129726. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129726.

13. Saloux, E.; Runge, J.; Zhang, K. Operation Optimization of Multi-Boiler District Heating Systems Using Artificial Intelligence-Based Model Predictive Control: Field Demonstrations. *Energy*. 2023, 285, 129524. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129524.

14. О Программе развития электроэнергетики до 2030 года: постановление Правительства Республики Казахстан от 9 апреля 1999 года № 384. URL: https://old.adilet.zan.kz/rus/docs/P990000384_ (дата обращения: 26.09.2026).

15. Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2023 жылғы 28 наурыздағы №263 қаулысы. Қазақстан Республикасының электр энергетикасы саласын дамытудың 2023–2029 жылдарға арналған тұжырымдамасын бекіту туралы. Қолжетімді: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2300000263 (қаралған күні: 26.09.2026).

16. Қазақстан Республикасы Стратегиялық жоспарлау және реформалар агенттігінің Ұлттық статистика бюросы. Қазақстан Республикасының отын-энергетикалық балансы (2024 ж.). 01.08.2025. Қолжетімді: https://stat.gov.kz/industries/business-statistics/stat-energy/publications/330203/ (қаралған күні: 26.09.2026).

17. Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігі. Қазақстанда 377 км жылу желісі жаңартылады. 2026. Қолжетімді: https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/press/news/details/1196031 (қаралған күні: 26.09.2026).

18. Қазақстан Республикасы Премьер-министрінің ресми ақпараттық ресурсы. 2024–2025 жылдардағы жылыту маусымының қорытындысы. 14.04.2025. Қолжетімді: https://primeminister.kz/news/2024-2025-zhyldardagy-zhylytu-mausymynyn-korytyndysy-29916 (қаралған күні: 26.09.2026).

19. Қазақстан Республикасының Заңы. Жылу энергетикасы туралы: 2024 жылғы 8 шілдедегі №120-VIII ҚРЗ. Қолжетімді: https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z2400000120 (қаралған күні: 26.09.2026).

20. Қазақстан Республикасы Премьер-министрінің ресми ақпараттық ресурсы. Мәжілісте Үкімет әзірлеген «Жылу энергетикасы туралы» заң жобасы мақұлданды. Қолжетімді: https://primeminister.kz/news/kuryltai/mazhiliste-ukimet-azirlegen-zhylu-energetikasy-turaly-zan-zhobasy-makuldandy-28585 (қаралған күні: 26.09.2026).

21. Қазақстан Республикасы Премьер-министрінің ресми ақпараттық ресурсы. Қазақстанда энергетикалық және коммуналдық секторларды жаңғырту бойынша ауқымды жұмыстар жүргізіледі. 28.07.2026. Қолжетімді: https://primeminister.kz/news/press/kazakstanda-energetikalyk-zhane-kommunaldyk-sektorlardy-zhangyrtu-boyynsha-aukymdy-zhumystar-zhurgiziledi-31711 (қаралған күні: 26.09.2026).

22. Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Табиғи монополияларды реттеу комитеті. «Ақылды» есептегіштер: орнат та, аз төле! Қазақстанда «интеллектуалды» есептеу құралдарын енгізу қалай жүзеге асады? Қолжетімді: https://www.gov.kz/memleket/entities/krem/press/news/details/1117862 (қаралған күні: 26.09.2026).

23. Antoni, O.; Baviere, R.; Blesl, M.; et al. Guidebook for the Digitalisation of

District Heating. IEA DHC Annex TS4 Final Report, 2023.

24. Қазақстан Республикасы Үкіметі. «Энергетикалық және коммуналдық секторларды жаңғырту» ұлттық жобасын бекіту туралы. 2024 жылғы 25 желтоқсандағы №1102 қаулы.

25. Қазақстан Республикасының 2024 жылғы 8 шілдедегі №120-VIII «Жылу энергетикасы туралы» Заңы.

26. Zheng, X.; Shi, Z.; Wang, Y.; Zhang, H.; Tang, Z. Digital twin modeling for district heating network based on hydraulic resistance identification and heat load prediction. Energy, 2024, 288, 129726. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129726.

27. Manservigi, L.; Bahlawan, H.; Losi, E.; Morini, M.; Spina, P.R.; Venturini, M. A diagnostic approach for fault detection and identification in district heating networks. Energy, 2022, 251, 123988. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123988.

28. Losi, E.; Manservigi, L.; Spina, P.R.; Venturini, M. Data-driven approach for the detection of faults in district heating networks. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 101355. DOI: 10.1016/j.segan.2024.101355.

29. Madsen, F.W.; Bank, T.; Søndergaard, H.A.N.; Mortensen, L.K.; Shaker, H.R. Digital Twin-Based Fault Detection and Prioritisation in District Heating Systems: A Case Study in Denmark. 2024, pp. 277–291. DOI: 10.1007/978-3-031-48652-4_18.

30. Leiria, D.; Andersen, K.H.; Melgaard, S.P.; et al. Towards automated fault detection and diagnosis in district heating customers: Generation and analysis of a labeled dataset with ground truth. Building Simulation 2023, 2023, 18, 3620–3628. DOI: 10.26868/25222708.2023.1576.

31. Roelofs, C.M.A.; Guevara Bastidas, E.; Hugo, T.; Faulstich, S.; Cadenbach, A. Enabling Predictive Maintenance in District Heating Substations: A Labelled Dataset and Fault Detection Evaluation Framework Based on Service Data. 2025.

32. Rose, M.; Gernandt, H.; Machado, J.E.; Schiffer, J. Model Predictive Control of District Heating Grids Using Stabilizing Terminal Ingredients. European Control Conference, 2024. DOI: 10.23919/ECC64448.2024.10591109.

33. Sibeijn, M.; Ahmed, S.; Khosravi, M.; Keviczky, T. Economic Nonlinear Model Predictive Control of Prosumer District Heating Networks. 2025, arXiv:2501.17597.

34. Wei, Z.; Ren, F.; Yue, B.; Ding, Y.; Zheng, C.; Li, B.; Zhai, X.; Wang, R. Data-Driven Application on the Optimization of a Heat Pump System for District Heating Load Supply: A Validation Based on Onsite Test. Energy Conversion and Management 2022, 266, 115851, doi:10.1016/j.enconman.2022.115851.

35. Wang, H.-C.; Jiao, W.-L.; Zou, P.-H.; Liu, J.-C. Analysis of an Effective Solution to Excessive Heat Supply in a City Primary Heating Network Using Gas-Fired Boilers for Peak-Load Compensation. Energy and Buildings 2010, 42, 2090–2097, doi:10.1016/j.enbuild.2010.06.020.

36. Sun, C.; Yan, H.; Yuan, L.; Cao, S.; Ma, W.; Suo, C.; Qi, C.; Wu, X. A Refined Classification Method of Heat Customers to Improve Inter-Household Thermal Balance Intelligent Control and Regulation. Energy 2024, 304, 132220, doi:10.1016/j.energy.2024.132220.

37. Government of the Republic of Kazakhstan. Concept for the Development of the Fuel and Energy Sector of the Republic of Kazakhstan for 2023–2029. Available

online: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1400000724 (accessed on 31 August 2026).

38. Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. Energy Statistics: Publications. Available online: https://stat.gov.kz/industries/business-statistics/stat-energy/publications (accessed on 31 August 2026).

39. On Approval of the National Strategy for Large-Scale Digitalization and Total Implementation of Artificial Intelligence Technologies “Digital Qazaqstan” through 2029. Decree of the President of the Republic of Kazakhstan No. 1311, 9 June 2026. Available online: https://adilet.zan.kz/rus/docs/U2600001311 (accessed on 31 August 2026).

40. Revesz, A.; Jones, P.; Dunham, C.; Davies, G.; Marques, C.; Matabuena, R.; Scott, J.; Maidment, G. Developing Novel 5th Generation District Energy Networks. Energy 2020, 201, 117389, doi:10.1016/j.energy.2020.117389.

41. Yao, S.; Wu, J.; Qadrdan, M. A State-of-the-Art Analysis and Perspectives on the 4th/5th Generation District Heating and Cooling Systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2024, 202, 114729, doi:10.1016/j.rser.2024.114729.

42. Villa, G.; Famiglietti, J.; Dénarié, A.; Aprile, M.; Motta, M. Life Cycle Cost Assessment of a Positive Energy District Featuring a 5th-Generation Heating and Cooling Network: An Italian Residential and Light Commercial Case Study. Energy and Buildings 2025, 347, 116299, doi:10.1016/j.enbuild.2025.116299.

43. Sameti, M.; Fan, T.; Volkova, A.; Li, Z. Large-Scale Climate-Neutral District Heating and Cooling: Integration of Local Mi-crogrids for Thermal Distribution. Energy Conversion and Management: X 2026, 30, 101552, doi:10.1016/j.ecmx.2026.101552.

44. Saini, P.; Huang, P.; Fiedler, F.; Volkova, A.; Zhang, X. Techno-Economic Analysis of a 5th Generation District Heating System Using Thermo-Hydraulic Model: A Multi-Objective Analysis for a Case Study in Heating Dominated Climate. Energy and Buildings 2023, 296, 113347, doi:10.1016/j.enbuild.2023.113347.

45. Chicherin, S.; Zhuikova, Y.; Pyanykh, T.; Zhuikov, A.; Baidyussenov, G.; Abildinova, S. The First Fifth-Generation District Heating and Cooling System in Kazakhstan: Planning and Design. Energies 2024, 17, 6169, doi:10.3390/en17236169.

46. Valentini, L.V.; Forndran, S.; Ochs, F.; Thür, A.; Streicher, W. District Heating Modeling Tools: A Review Based on Design and Simulation of Renewable District Heating Networks. Energy Conversion and Management: X 2026, 29, 101414, doi:10.1016/j.ecmx.2025.101414.

47. Schmidt, D.; Yang, Q.; Vanhoudt, D.; Widl, E.; Langroudi, P.; Vallee, M.; Jallal, M.-A.; Muschick, D.; Gölles, M.; Kaisermayer, V.; et al. The Current State and Future Outlook of Digitalization for the Operation of District Heating Systems: A Review. Energy 2026, 344, 140086, doi:10.1016/j.energy.2026.140086.

48. Grieves, M.; Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems; Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alves, A., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2017; pp. 85–113 ISBN 978-3-319-38754-3.

49. Tao, F.; Zhang, H.; Liu, A.; Nee, A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Trans. Ind. Inf. 2019, 15, 2405–2415, doi:10.1109/TII.2018.2873186.

50. Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C.; Barlow, C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access 2020, 8, 108952–108971, doi:10.1109/ACCESS.2020.2998358.

51. Semeraro, C.; Lezoche, M.; Panetto, H.; Dassisti, M. Digital Twin Paradigm: A Systematic Literature Review. Computers in Industry 2021, 130, 103469, doi:10.1016/j.compind.2021.103469.

52. Yu, W.; Patros, P.; Young, B.; Klinac, E.; Walmsley, T.G. Energy Digital Twin Technology for Industrial Energy Management: Classification, Challenges and Future. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2022, 161, 112407, doi:10.1016/j.rser.2022.112407.

53. Wright, L.; Davidson, S. How to Tell the Difference between a Model and a Digital Twin. Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci. 2020, 7, 13, doi:10.1186/s40323-020-00147-4.

54. Zheng, X.; Shi, Z.; Wang, Y.; Zhang, H.; Tang, Z. Digital Twin Modeling for District Heating Network Based on Hydraulic Resistance Identification and Heat Load Prediction. Energy 2024, 288, 129726, doi:10.1016/j.energy.2023.129726.

55. Nigro, L.; La Bella, A.; Casella, F.; Scattolini, R. Control-Oriented Modeling, Simulation, and Predictive Control of District Heating Networks. IEEE Trans. Automat. Sci. Eng. 2025, 22, 7064–7079, doi:10.1109/TASE.2024.3460173.

56. Bahlawan, H.; Ferraro, N.; Gambarotta, A.; Losi, E.; Manservigi, L.; Morini, M.; Saletti, C.; Ruggero Spina, P.; Venturini, M. Detection and Identification of Faults in a District Heating Network. Energy Conversion and Management 2022, 266, 115837, doi:10.1016/j.enconman.2022.115837.

57. O'Dwyer, E.; Pan, I.; Charlesworth, R.; Butler, S.; Shah, N. Integration of an Energy Management Tool and Digital Twin for Coordination and Control of Multi-Vector Smart Energy Systems. Sustainable Cities and Society 2020, 62, 102412, doi:10.1016/j.scs.2020.102412.

58. Lee, C.; Kwon, H.; Lee, Y.I. OPC UA-Based Three-Layer Architecture for Aggregated Microgrids Integrating Edge Cloud Computing and IEC 62264. Journal of Industrial Information Integration 2025, 48, 100965, doi:10.1016/j.jii.2025.100965.

59. Carballo, J.A.; Bonilla, J.; Fernández-Reche, J.; Avila-Marin, A.L.; Díaz, B. Modern SCADA for CSP Systems Based on OPC UA, Wi-Fi Mesh Networks, and Open-Source Software. Energies 2024, 17, 6284, doi:10.3390/en17246284.

60. De Giuli, L.B.; La Bella, A.; Scattolini, R. Physics-Informed Neural Network Modeling and Predictive Control of District Heating Systems. IEEE Trans. Contr. Syst. Technol. 2024, 32, 1182–1195, doi:10.1109/TCST.2024.3355476.

61. Boghetti, R.; Kämpf, J.H. Verification of an Open-Source Python Library for the Simulation of District Heating Networks with Complex Topologies. Energy 2024, 290, 130169, doi:10.1016/j.energy.2023.130169.

62. Lohmeier, D.; Cronbach, D.; Drauz, S.R.; Braun, M.; Kneiske, T.M. Pandapipes: An Open-Source Piping Grid Calculation Package for Multi-Energy Grid Simulations. Sustainability 2020, 12, 9899, doi:10.3390/su12239899.

63. Elomari, Y.; Aspetakis, G.; Mateu, C.; Shobo, A.; Boer, D.; Marín-Genescà, M.; Wang, Q. A Hybrid Data-Driven Co-Simulation Approach for Enhanced Integrations of Renewables and Thermal Storage in Building District Energy Systems.

Journal of Building Engineering 2025, 104, 112405, doi:10.1016/j.jobe.2025.112405.

64. Tijani, O.E.; Serra, S.; Lanusse, P.; Malti, R.; Viot, H.; Reneaume, J.-M. Grey-Box Modelling of District Heating Networks Using Modified LPV Models. Energies 2025, 18, 1626, doi:10.3390/en18071626.

65. Rodrigue, D.; Mabrouk, M.T.; Pasdeloup, B.; Meyer, P.; Lacarrière, B. Flexible Clustering of Substations for Accurate and Rapid Hybrid Simulation of District Heating. Energy Inform 2026, 9, 60, doi:10.1186/s42162-026-00664-3.

66. Nykolaychuk, M.; Zamikhovskyi, L.; Levitskyi, I.; Kopei, V.; Ropyak, L. Development of a Simulation Model of a PID Controller Based on Simatic S7 Hardware-Software Tools and "Digital Twin" Technology. Automation 2026, 7, 74, doi:10.3390/automation7030074.

67. Siemens AG. S7-1500/S7-1500T Motion Control Overview: Function Manual (Version 9.0, A5E03879256-AK). 2024. Available online: https://support.industry.siemens.com/dl/files/347/109974347/att_1306975/v1/s71500_s71500t_motion_control_overview_function_manual_en-US_en-US.pdf (accessed on 31 August 2026).

68. Siemens AG. Sales and Delivery Release of TIA Portal V20; Siemens: 2024. Available online: https://support.industry.siemens. com/cs/document/109963848 (accessed on 31 August 2026).

69. Siemens AG. S7-PLCSIM Advanced Function Manual (V 8.0, 11/2025, A5E37039512-AK) [PDF]. Siemens Industry Online Support. 2025. Available online: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109997788/s7-plcsim_advanced_ function_manual_en-US_en-US.pdf (accessed on 31 August 2026).

70. Python 3.14.7 documentation. Available online: https://docs.python.org/3/ (accessed on 31 August 2026).

71. Fluidit Support. Available online: https://support.fluidit.com/ (accessed on 27 31 August 2026).

72. Microsoft Corporation. Microsoft SQL Server. Available online: https://www.microsoft.com/en-us/sql-server/ (accessed on 31 August 2026).

73. OPC 10000-11; OPC Unified Architecture - Part 11: Historical Access. OPC Foundation: Scottsdale, AZ, USA, 2024.

74. Neumayer, M.; Stecher, D.; Grimm, S.; Maier, A.; Bücker, D.; Schmidt, J. Fault and Anomaly Detection in District Heating Substations: A Survey on Methodology and Data Sets. Energy 2023, 276, 127569, doi:10.1016/j.energy.2023.127569.

75. van Dreven J., Boeva V., Abghari S., Grahn H., Al Koussa J., Motoasca E. Intelligent Approaches to Fault Detection and Diagnosis in District Heating: Current Trends, Challenges, and Opportunities // Electronics. 2023. Vol. 12, No. 6. Art. 1448. https://doi.org/10.3390/electronics12061448.

76. Chandola V., Banerjee A., Kumar V. Anomaly Detection: A Survey // ACM Computing Surveys. 2009. Vol. 41, No. 3. Art. 15. https://doi.org/10.1145/1541880.1541882.

77. Liu F.T., Ting K.M., Zhou Z.-H. Isolation Forest // 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining. Pisa: IEEE, 2008. P. 413–422.

https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17.

78. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. P. 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

79. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735–1780. https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735.

80. Malhotra P., Vig L., Shroff G., Agarwal P. Long Short Term Memory Networks for Anomaly Detection in Time Series // Proceedings of ESANN 2015. Bruges, 2015. P. 89–94.

81. Kingma D.P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes // Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Representations (ICLR). 2014. arXiv:1312.6114.

82. Ruff L., Vandermeulen R., Görnitz N., Deecke L., Siddiqui S.A., Binder A., Müller E., Kloft M. Deep One-Class Classification // Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning. PMLR 80, 2018. P. 4393–4402.

83. Zhang F., Fleyeh H. Anomaly Detection of Heat Energy Usage in District Heating Substations Using LSTM Based Variational Autoencoder Combined with Physical Model // 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2020. P. 153–158. https://doi.org/10.1109/ICIEA48937.2020.9248108.

84. Månsson S., Davidsson K., Lauenburg P., Thern M. Automated Statistical Methods for Fault Detection in District Heating Customer Installations // Energies. 2019. Vol. 12, No. 1. Art. 113. https://doi.org/10.3390/en12010113.

85. Farouq S., Byttner S., Bouguelia M.-R., Gadd H. A Conformal Anomaly Detection Based Industrial Fleet Monitoring Framework: A Case Study in District Heating // Expert Systems with Applications. 2022. Vol. 201. Art. 116864. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116864.

86. Farouq S., Byttner S., Bouguelia M.-R., Nord N., Gadd H. Large-Scale Monitoring of Operationally Diverse District Heating Substations: A Reference-Group Based Approach // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2020. Vol. 90. Art. 103492. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103492.

87. Madsen F.W., Bank T., Søndergaard H.A.N., Mortensen L.K., Shaker H.R. Digital Twin-Based Fault Detection and Prioritisation in District Heating Systems: A Case Study in Denmark // Energy Informatics. LNCS 14468. Cham: Springer, 2024. P. 277–291. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48652-4_18.

88. Guelpa E., Verda V. Automatic Fouling Detection in District Heating Substations: Methodology and Tests // Applied Energy. 2020. Vol. 258. Art. 114059. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114059.

89. Park S., Moon J., Hwang E. Explainable Anomaly Detection for District Heating Based on Shapley Additive Explanations // 2020 IEEE International Conference on Data Mining Workshops. 2020. P. 762–765. https://doi.org/10.1109/ICDMW51313.2020.00111.

90. Roelofs C.M.A., Guevara Bastidas E., Hugo T., Faulstich S., Cadenbach A. Enabling Predictive Maintenance in District Heating Substations: A Labelled Dataset and Fault Detection Evaluation Framework Based on Service Data // Energy. 2026.

Art. 141178. https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.141178.

91. Lundberg S.M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems 30. 2017. P. 4765–4774.

92. Saito T., Rehmsmeier M. The Precision–Recall Plot Is More Informative than the ROC Plot When Evaluating Binary Classifiers on Imbalanced Datasets // PLoS ONE. 2015. Vol. 10, No. 3. e0118432. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118432.

93. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017. P. 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

94. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A.Y.C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415. https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186.

95. Dänschel H., Mehrmann V., Roland M., Schmidt M. Adaptive Nonlinear Optimization of District Heating Networks Based on Model and Discretization Catalogs // SeMA Journal. 2024. Vol. 81. P. 81–112. https://doi.org/10.1007/s40324-023-00332-6.

96. Buffa S., Soppelsa A., Pipiciello M., Henze G., Fedrizzi R. Fifth-Generation District Heating and Cooling Substations: Demand Response with Artificial Neural Network-Based Model Predictive Control // Energies. 2020. Vol. 13, No. 17. Art. 4339. https://doi.org/10.3390/en13174339.

97. Svensen J.L. Peak Shaving in District Heating Utilizing Adaptive Predictive Control // Energies. 2022. Vol. 15, No. 22. Art. 8555. https://doi.org/10.3390/en15228555.

98. MathWorks. Simscape Fluids Documentation. Available online: https://www.mathworks.com/help/hydro/ (accessed on 22 September 2026).

99. Siemens AG. S7-PLCSIM Advanced: Function Manual. SIMATIC STEP 7 / TIA Portal Documentation. Available online: https://support.industry.siemens.com/ (accessed on 22 September 2026).

100. Fluidit. Data Sources: Fluidit Support Documentation. Available online: https://support.fluidit.com/projects/simulators/wiki/Data_Sources (accessed on 22 September 2026).

101. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python // Journal of Machine Learning Research. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.

102. ISO 23247-1:2021. Automation Systems and Integration — Digital Twin Framework for Manufacturing — Part 1: Overview and General Principles. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.

103. Xue P., Jiang Y., Zhou Z., Chen X., Fang X., Liu J. Machine Learning-Based Leakage Fault Detection for District Heating Networks // Energy and Buildings. 2020. Vol. 223. Art. 110161. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110161.

104. Kim R., Hong Y., Choi Y., Yoon S. System-Level Fouling Detection of District Heating Substations Using Virtual-Sensor-Assisted Building Automation System // Energy. 2021. Vol. 227. Art. 120515.

https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120515.

105. Shi X. et al. Investigation of a new kind of in-situ measurement method of thermal resistance of building envelope //Energy and Buildings. – 2022. – Т. 258. – С. 111803.

106. Reynolds M., Adamson J. Retrofitting heat networks to maximise performance and enable low carbon technologies //Building Services Engineering Research & Technology. – 2025. – Т. 46. – №. 1. – С. 133-149.

107. Sun Z. et al. Development of urban building energy models for Wellington city in New Zealand with detailed survey data on envelope thermal characteristics //Energy and Buildings. – 2024. – Т. 321. – С. 114647.

108. Ren H. et al. Design of a high-precision heat flow meter to characterize the thermoelectric module //Measurement Science and Technology. – 2023. – Т. 34. – №. 12. – С. 125151.

109. Самигуллина Ю.Б., Купоросов А.В., Сидоров А.Е. Разработка автоматизированной системы управления приборами учета тепловой энергии и теплоносителя с использованием языков стандарта МЭК 61131-3 //Диспетчеризация и управление в электроэнергетике. – 2020. – С. 78-81.

110. Seitbekova A., Utepbergenov I., Abzhanova L., Julayeva Z., Skliarova I., Orunbekov M. Development and Software-in-the-Loop Validation of a Digital Twin Architecture for District Heating Networks. Applied Sciences. 2026. Vol. 16. Article 10206. https://doi.org/10.3390/app162010206

111. Liu F. T., Ting K. M., Zhou Z.-H. Isolation Forest. Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Data Mining. 2008. P. 413-422. DOI 10.1109/ICDM.2008.17.

112. Schölkopf B., Platt J. C., Shawe-Taylor J., Smola A. J., Williamson R. C. Estimating the Support of a High-Dimensional Distribution. Neural Computation. 2001. Vol. 13. No. 7. P. 1443-1471. DOI 10.1162/089976601750264965.

113. Breunig M. M., Kriegel H.-P., Ng R. T., Sander J. LOF Identifying Density-Based Local Outliers. Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. 2000. P. 93-104. DOI 10.1145/342009.335388.

114. Rousseeuw P. J., Van Driessen K. A Fast Algorithm for the Minimum Covariance Determinant Estimator. Technometrics. 1999. Vol. 41. No. 3. P. 212-223. DOI 10.1080/00401706.1999.10485670.

115. Hinton G. E., Salakhutdinov R. R. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks. Science. 2006. Vol. 313. No. 5786. P. 504-507. DOI 10.1126/science.1127647.

ҚОСЫМША А

Диссертациялық жұмыс тақырыбы бойынша зияткерлік меншік объектілері

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 9014

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

(21) 2023/1093.2

(22) 02.11.2023

(45) 19.04.2024

(54) Жылуды интеллектуалды есептеуге арналған аппараттық-бағдарламалық кешен
Программно-аппаратный комплекс интеллектуального учета тепла
Software and hardware complex of intelligent heat metering

(73) «Корпорация Сайман» жауапкершілігі шектеулі серіктестігі (KZ)
Товарищество с ограниченной ответственностью «Корпорация Сайман» (KZ)
«Saiman Corporation» limited liability partnership (KZ)

(72) Зікірбай Қуаныш Ерғарауұлы (KZ)
Тойбаева Шара Джолдаспековна (KZ)
Сейтбекова Айнагуль Манарбековна (KZ)

Zikirbay Kuanysh Yergarauly (KZ)
Toibayeva Shara Joldaspekovna (KZ)
Seitbekova Ainagul Manarbekovna (KZ)

ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

А. Артыкова
А. Артыкова
A. Artykova

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директорының м.а.
И.о. директора РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Executive director of RSE «National institute of intellectual property»

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

КУӘЛІК

2022 жылғы «27» қаңтар № 23091

Автордың (лардың) жөні, аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):
СЕЙТБЕКОВА АЙНАГУЛЬ МАНАРБЕКОВНА, Утепбергенов Ирбулат Туремуратович

Авторлық құқық объектісі: **ғылыми туынды**

Объектінің атауы: **МОДЕЛЬ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ РАЙОНОВ ГОРОДА**

Объектіні жасаған күні: **10.01.2022**

РҚИ «Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК
РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК

Құжат тұпнұсқалығын http://www.kazpatent.kz/ru сайтының "Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады https://copyright.kazpatent.kz

Подлинность документа возможно проверить на сайте kazpatent.kz в разделе «Авторское право» https://copyright.kazpatent.kz

ЭЦҚ қол қойылды

Н.Абулкаиров

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

КУӘЛІК

2025 жылғы «18» маусым № 59930

Автордың (лардың) жөні, аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):
СЕЙТБЕКОВА АЙНАГУЛЬ МАНАРБЕКОВНА, УТЕПБЕРГЕНОВ ИРБУЛАТ ТУРЕМУРАТОВИЧ, АБЖАНОВА ЛАУЛАСЫН КАСЫЛГАНОВНА

Авторлық құқық объектісі: **ғылыми туынды**

Объектінің атауы: **СПОСОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ И АНАЛИЗА АНОМАЛИЙ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Объектіні жасаған күні: **13.05.2025**

ҚР «Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК
РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности» МЮ РК

Құжат түпнұсқалығын http://www.kazpatent.kz/ru сайтының "Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады https://copyright.kazpatent.kz

Подлинность документа возможно проверить на сайте kazpatent.kz в разделе «Авторское право» https://copyright.kazpatent.kz

ЭЦҚ қол қойылды

С. Ахметов

ҚОСЫМША Б

Зерттеу нәтижелерін енгізу актісі

г. Алматы «28» 09 2026 г.

АКТ
внедрения и практического использования результатов научно-исследовательской работы

Настоящим актом подтверждается, что отдельные результаты диссертационной работы Сейтбековой А.М. на тему «Исследование и разработка методов оптимизации потребления топлива системы теплоснабжения района на основе обнаружения аномалий в больших данных» использованы в научно-технической, опытно-конструкторской и лабораторно-испытательной деятельности ТОО «Корпорация Сайман» при разработке системы автоматизированного учета тепловой энергии на базе электромагнитного теплосчётчика «Сайман-АУЭС».

1. Результаты, принятые к практическому использованию

В рамках указанной работы применены следующие научно-технические результаты:

1. Алгоритм расчёта потреблённой тепловой энергии по значениям расхода теплоносителя и температур в подающем и обратном трубопроводах с учётом сезонного режима работы.

2. Программная реализация алгоритма на языке Python, обеспечивающая обработку измерительных данных и автоматический выбор расчётных параметров в зависимости от календарного периода.

3. Подход к формированию массива измерительных данных для учёта тепловой энергии, мониторинга режима теплоснабжения и последующего анализа отклонений в работе системы.

2. Форма и область внедрения

Внедрение осуществлено в форме использования разработанных алгоритмических и программных решений при изготовлении и лабораторной апробации опытного образца теплосчётчика. В ходе испытаний проверены измерение объёма теплоносителя, обработка температурных и расходных параметров, расчёт количества тепловой энергии, накопление и отображение результатов. Полученная погрешность измерения не превысила предела, установленного паспортом изделия.

3. Практический результат

Практическим результатом является автоматизация расчёта и учёта тепловой энергии, а также подготовка структурированных измерительных данных, которые могут применяться для анализа режимов теплоснабжения. Использованные решения создают основу для дальнейшего совершенствования приборов учёта, цифрового мониторинга и разработки методов раннего обнаружения аномальных режимов.

Научная апробация указанных результатов представлена в статье И.Т. Утепбергенова и А.М. Сейтбековой «Исследование и разработка системы учёта тепловой энергии», опубликованной в журнале «Вестник КазАТК», № 4 (139), 2025, с. 282–291, DOI: 10.52167/1609-1817-2025-139-4-282-291.

4. Заключение

ТОО «Корпорация Сайман» подтверждает практическое использование перечисленных результатов при разработке и проведении лабораторных испытаний системы учёта тепловой энергии. На дату получения настоящего акта изготовлено 249 теплосчётчиков и получен сертификат об утверждении типа № KZ.02.01.02459-23.

Полученные результаты представляют практический интерес для дальнейшего совершенствования приборов учёта и цифровых средств мониторинга энергоресурсов.

Область применения настоящего акта ограничивается научно-техническими, опытно-конструкторскими и лабораторно-испытательными работами. Решения о серийном производстве и промышленной эксплуатации принимаются организацией отдельно.

ТОО «Корпорация Сайман»
Зам.директора по ИиИТ **Зікірбай Қ.Е.**



ҚОСЫМША В

Humboldt-Innovation Academy (Берлин) оқу курсын бітіргені туралы сертификат



HUMBOLDT-INNOVATION ACADEMY BY HUMBOLDT-UNIVERSITY BERLIN

HUMBOLDT INNOVATION
CONNECTING SCIENCE AND SOCIETY

HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN

CERTIFICATE

№ 047-2026

Ainagul Seitbekova

has successfully completed the advanced professional training programme

Intelligent Automation of District Heating Systems Using Artificial Intelligence Methods

The program included the following topics:

- Architecture of modern district heating systems;
- Automation of heating substations and pumping stations;
- Collection and processing of process data using SCADA, PLC, and IIoT technologies;
- Machine learning methods for anomaly detection;
- Prediction of emergency situations and equipment failures;
- Intelligent decision support for system operators;
- Enhancement of the energy efficiency and reliability of district heating systems.

Organized by Humboldt-Innovation GmbH of Humboldt-University zu Berlin, from June, 23 to June, 30 2026

Date:	30.06.2026
Location:	Berlin, Germany
Authorized signature:	Dr. Katrin Schütz
Position:	Head of Humboldt-Innovation Academy
Institution/Organization:	Humboldt-Innovation GmbH by Humboldt-University Berlin

HUMBOLDT-INNOVATION GmbH
Ziegelstraße 30 / 10117 Berlin
Tel.: +49 (30) 2093-70782
E-Mail: info@humboldt-innovation.de

Ескертпе: *Сертификат түпнұсқасы Диссертациялық кеңесінде тексеруге ұсынылған.*

ҚОСЫМША Г

Жылытудың жылу энергиясын тұтынуымен ЫСЖ есептеу алгоритмі

```
1:  from datetime import datetime, date
2: def check_summer_date():
3: today = date.today()
4: current_year = datetime.now().year
5: start_date = date(current_year, 4, 15)
6: end_date = date(current_year, 10, 14)
7: return start_date<=today<=end_date
8:  tx_summer=15 # Жазғы маусымдағы температура
9:  tx_winter=5  # Қысқы маусымдағы тмпература
10:  m1_flow_meter = None  # 1 ағын санауышы
11: m2_flow_meter = None  # 2 ағын санауышы
12:  t1_temp_sensor = None # 1 температура датчигі
13:  t2_temp_sensor = None # 2 температура датчигі
14:  if check_summer_date():
15:   if m1_flow_meter!=0 and m2_flow_meter!=0:
16:   Q_gvs=((m1_flow_meter - m2_flow_meter) * (t1_temp_sensor - tx_summer)) /  1000
17:   elsif m1_flow_meter!=0:
18:   Q_gvs = (m1_flow_meter * (t1_temp_sensor - tx_summer)) / 1000
19:   else:
20:   Q_gvs = (m2_flow_meter * (t2_temp_sensor - tx_summer)) / 1000
21:   Q_total = Q_gvs
22:   else:
23:   Q_gvs=((m1_flow_meter - m2_flow_meter) * (t1_temp_sensor - tx_winter))  / 1000
24:   Q_otp = (m2_flow_meter * (t1_temp_sensor - t2_temp_sensor)) / 1000
25:   Q_total = Q_gvs + Q_otp
```