8D07103 – «Автоматтандыру және басқару» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға арналған «Үлкен деректердегі ауытқуларды анықтау негізінде ауданның жылумен жабдықтау жүйесінің отын тұтынуын оңтайландыру әдістерін зерттеу және өңдеу» тақырыбындағы
Сейтбекова Айнагуль Манарбековнаның диссертациялық жұмысына

АҢДАТПА

Зерттеудің өзектілігі. Қазақстанның орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелері елдің энергетикалық және әлеуметтік инфрақұрылымының негізгі элементтерінің бірі болып табылады. Жылыту кезеңінің ұзақтығы, сыртқы ауа температурасының күрт өзгеруі, тұтынушылар жүктемесінің тәуліктік және маусымдық сипаты жылу энергиясын өндіру, тасымалдау және тұтыну процестерін дәл үйлестіруді талап етеді. Диссертацияда қарастырылған статистикалық деректер бойынша жылу желілерінің жалпы ұзындығы 13,4 мың км-ге жетеді; 2025 жылы 323 км желі жөнделіп және қайта жаңғыртылған, 2026 жылға 377 км желіні жаңарту жоспарланған, ал 2029 жылға дейін 1,6 мың км желіні жаңғырту көзделген. 2025 жылы жылумен жабдықтау көздерінің саны 2688 бірлікті құраған. Бұл көрсеткіштер саланың ауқымын және техникалық жай-күйін тұрақты бақылаудың маңызын көрсетеді.

Желілер мен жабдықтардың тозуы, нормативтен жоғары жылу шығындары, өлшеу арналарының жеткіліксіздігі, ақпараттық жүйелердің өзара үйлеспеуі және технологиялық деректердің әртүрлі платформаларда бытыраңқы сақталуы отынды тиімді пайдалануды шектейді. Температура, қысым, жылу тасымалдағыш шығыны, жылу қуаты, сыртқы ауа температурасы және жабдық күйі туралы деректер толық әрі синхронды болмаған жағдайда диспетчерлік шешімдердің жеделдігі төмендейді. Датчиктің ығысуы, сигналдың қатып қалуы немесе байланыс үзілуі нақты технологиялық ақауға ұқсас көрінуі мүмкін; ал жүктеменің заңды өзгеруі аномалия ретінде қате белгіленуі ықтимал. Сондықтан өлшеулерді тек шекті мәндер бойынша тексеру жеткіліксіз.

Қазақстан Республикасының жылу энергетикасын цифрландыру жөніндегі міндеттері деректерді жинау, өңдеу, мониторингтеу және талдау жүйелерін дамытуға, нақты уақыт режимінде температура мен қысымды бақылауға, жылу энергиясын есепке алу нәтижелерін біріктіруге және Big Data негізінде ресурстарды тұтынуды болжауға бағытталған. Осы талаптарды орындау үшін физикалық модельдерді, бағдарламаланатын логикалық контроллерді, SCADA жүйесін, архивтік деректерді, машиналық оқыту алгоритмдерін және оңтайландыру құралдарын бір есептік-басқару контурында біріктіру қажет.

Мәселенің зерттелу дәрежесі және ғылыми қайшылық. Қолданыстағы зерттеулерде жылу-гидравликалық есептеу, автоматтандырылған басқару, цифрлық егіздер, аномалияларды анықтау және отын шығынын оңтайландыру бағыттары едәуір дамыған. Мамандандырылған бағдарламалар желі топологиясын, стационарлық және динамикалық режимдерді, қысым мен температураның таралуын және жылу шығындарын есептеуге мүмкіндік береді. Машиналық оқытуда статистикалық шектер, оқшаулау әдістері, біркластық жіктеуіштер, автоэнкодерлер және уақыттық модельдер қолданылады. Алайда бұл міндеттер көбіне бір-бірінен бөлек шешіледі: физикалық модель басқару жүйесінен оқшауланады, ал деректерге негізделген детектор технологиялық заңдылықтар мен режимдік контексті толық ескермейді.

Нақты ақаулар туралы таңбаланған өндірістік деректердің аздығы, әртүрлі датчиктердің дискреттеу жиіліктері, маусымдық өзгерістер және өлшеу сапасының біркелкі болмауы алгоритмдерді сенімді бағалауды қиындатады. Сонымен бірге аномалияны анықтау өздігінен отын үнемін қамтамасыз етпейді: диагностикалық белгі жылу көзінің қуатын, беру температурасын, дифференциалдық қысымды, сорғы режимін немесе жүктемені бөлу тәсілін өзгерту жөніндегі қауіпсіз шешімге айналуы тиіс. Осы қайшылық диссертацияның бағытын айқындады: физикалық заңдылықтарды, технологиялық деректерді және интеллектуалды талдауды біріктіретін, шешімді нақты жабдыққа жібергенге дейін Software-in-the-Loop ортасында тексеретін кешенді әдіс қажет.

Зерттеудің мақсаты, объектісі және пәні. 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. Мақсат аномалияны тек тіркеумен шектелмей, оның жылу өндіру, желідегі қысым мен температура, тұтынушыға жеткізілетін қуат және отын шығынына ықпалын есептік түрде бағалауды көздейді.

Зерттеу объектісі – жылу энергиясының көзін, беру және кері құбырларды, сорғы жабдықтарын, жылу пункттерін, тұтынушыларды, өлшеу құралдарын және автоматтандырылған басқару жүйесін қамтитын аудандық жылумен жабдықтау жүйесі. Зерттеу пәні – технологиялық деректерді жинау, синхрондау және алдын ала өңдеу процестері; қалыпты және қалыптан тыс режимдердің заңдылықтары; жылу-гидравликалық модельдер; аномалияларды анықтау алгоритмдері; жылумен жабдықтау сапасы мен қауіпсіздік шектеулері жағдайында отын тұтынуды азайту тәсілдері.

Зерттеу міндеттері. Мақсатқа жету үшін Қазақстандағы жылу энергетикасының қазіргі жағдайы мен цифрландыру деңгейі талданды; отын шығынына әсер ететін сыртқы ауа температурасы, жүктеме, беру және кері су температурасы, қысым, шығын, желілік жылу шығыны және жабдық тиімділігі сияқты факторлар анықталды; БЛК, SCADA, архив және есептік модель деректерін біріктіретін цифрлық егіз архитектурасы әзірленді; нақты желі телімінің Fluidit Heat моделі құрылды; MATLAB/Simulink/Simscape ортасында тәуелсіз физикалық модель жасалды; Software-in-the-Loop контурында қалыпты режим, жоғары жүктеме, датчик ақауы, байланыс үзілуі және процестік ауытқу сценарийлері тексерілді; UPPAAL көмегімен компоненттердің логикалық және уақыттық үйлесімділігі верификацияланды; алты аномалия детекторы салыстырылып, көпшілік шешімі қалыптастырылды; жылу энергиясын есептеу алгоритмі мен жылу есептегіштің зертханалық үлгісі әзірленді.

Зерттеу әдістері және эксперименттік база. Жұмыста жүйелік талдау, масса мен энергия баланстары, Дарси–Вейсбах теңдеуі бойынша гидравликалық кедергіні бағалау, Колбрук–Уайт тәуелділігі, жылу алмасуды есептеу, сорғы сипаттамалары, имитациялық модельдеу, статистикалық өңдеу, салыстырмалы талдау, машиналық оқыту және уақыттық автоматтар әдістері қолданылды. Диагностикалық белгілер өлшенген және есептелген параметрлер арасындағы қалдықтардан, масса мен энергия баланстарының үйлеспеуінен және көпөлшемді уақыттық қатарлардың қалыпты құрылымынан ауытқудан қалыптастырылды.

Эксперименттік Software-in-the-Loop ортасы TIA Portal V20, CPU 1513F-1 ретінде конфигурацияланған виртуалды SIMATIC S7-1500 контроллері, S7-PLCSIM Advanced V7.0, WinCC Runtime Advanced V20, OPC UA, Python және Fluidit Heat 2.8 құралдарын біріктірді. Python қабаты OPC UA арқылы БЛК тегтерін оқып, олардың типін, өлшем бірлігін, толықтығын, уақыт белгісін және инженерлік диапазонын тексерді; кірістерді Fluidit Heat параметрлерімен сәйкестендіріп, есептеуді іске қосты; нәтижелерді өңдеп, контроллерге кері жазды. MATLAB/Simulink/Simscape моделі тәуелсіз кросс-тексеру үшін, ал UPPAAL басқару логикасы мен дедлайндарды формалды бағалау үшін пайдаланылды.

Зерттеу нәтижелерінің сенімділігі екі тәуелсіз физикалық модельді салыстырумен, бірдей конфигурациядағы қайталама SIL сынақтарымен, барлық детекторларды бір оқыту және тест бөлуінде бағалаумен, формалды верификациямен және өлшеу құралының зертханалық сынағымен қамтамасыз етілді. Сонымен қатар диссертацияда нәтижелердің қолданылу шектері ашық көрсетілді: аномалия детекторлары синтетикалық деректерде тексерілді, сондықтан өндірістік дәлдік пен нақты отын үнемі толық жылыту маусымының архиві және бақыланатын далалық сынақтар арқылы растауды талап етеді.

Диссертацияның негізгі мазмұны. Диссертация кіріспеден, төрт бөлімнен, қорытындыдан, 115 пайдаланылған дереккөзден және төрт қосымшадан тұрады; жұмыста 45 сурет пен 21 кесте берілген. Зерттеу логикасы саланың жай-күйін бағалаудан цифрлық егізді құруға, одан математикалық және имитациялық модельдерді тексеруге, кейін аномалияларды анықтау мен басқару шешімдерін негіздеуге өтеді.

Бірінші бөлімнің мазмұны. Бірінші бөлімде әлемдік және қазақстандық жылу энергетикасының даму үрдістері, төртінші және бесінші буындағы аудандық жылыту тұжырымдамалары, желілерді цифрландыру, интеллектуалды есепке алу және болжамдық басқару бағыттары қарастырылды. Қазақстандағы жылу өндіру, беру және тұтыну

көрсеткіштеріне статистикалық талдау жүргізіліп, желі тозуы, жылу шығындары, жөндеу көлемі, жылумен жабдықтау көздерінің саны және өлшеу инфрақұрылымының жай-күйі жүйеленді.

Талдау жылумен жабдықтау режимінің сыртқы ауа температурасына, ғимараттардың жылу инерциясына, тұтыну кестесіне, құбырлардың техникалық күйіне, сорғы жұмысына және жылу өндіруші жабдықтың пайдалы әсер коэффициентіне тәуелді екенін көрсетті. Бұл факторлардың өзара әсері қалыпты режимнің уақыт бойынша өзгеруіне әкеледі. Сондықтан бір ғана тұрақты шекті қолдану жалған дабылдарды көбейтеді; температура, қысым, шығын, жылу қуаты және жабдық күйін бірлесіп бағалау қажет.

Әдеби шолу цифрлық егіздің нақты жүйемен деректер алмасуы, модель параметрлерін өлшеулер бойынша бейімдеу, ағып кетуді модельдік қалдықтар арқылы табу, машиналық оқыту және модельдік-болжамдық басқарудың тиімділігін көрсетті. Сонымен бірге физикалық модель, автоматтандыру жүйесі, аномалия детекторы және отын шығынын оңтайландыру модулі бір жабық контурда сирек біріктірілетіні анықталды. Осы қорытынды екінші бөлімдегі архитектуралық шешімге негіз болды.

Екінші бөлімдегі цифрлық егіз архитектурасы. Екінші бөлімде аудандық жылумен жабдықтау жүйесінің функционалдық цифрлық егізі әзірленді. Архитектура физикалық процесс деңгейін, БЛК мен SCADA деңгейін, Python интеграциялық-аналитикалық сервисін, SQL архивін және Fluidit Heat термогидравликалық ядросын қамтиды. Экспериментте өндірістік контроллердің функцияларын PLCSIM Advanced-тағы виртуалды БЛК орындады. WinCC параметрлерді визуализациялап, командаларды және орындалу мәртебесін көрсетті; OPC UA нақты уақыттағы негізгі арна ретінде қолданылды, ал архив ұзақ мерзімді трендтер мен кейінгі оқытуға арналды.

Екібағытты алмасу үшін БЛК-да жұмыс параметрлерін сақтайтын шығыс деректер блогы және модельдеу нәтижелерін қабылдайтын кіріс деректер блогы құрылды. Python міндетті айнымалыларды тексеріп, БЛК тегтерін Fluidit Heat шекаралық шарттарымен сәйкестендірді. Сәтті есептеуден кейін қысым, температура, шығын, жеткізілген жылу, жылу тапшылығы және желілік жылу шығыны контроллерге қайтарылды. Дерек толық емес, диапазоннан тыс немесе есептеу нәтижесі технологиялық шектеулерге сәйкес келмеген жағдайда жазу бұғатталып, қате коды қалыптастырылды.

Ұсынылған жұмыс үрдісі нақты контроллерді виртуалды БЛК-мен алмастырғанда ақпараттық алмасу құрылымын өзгертпейді. Нақты объектіге көшу үшін контроллер адрестерін, технологиялық тегтер картасын және желі моделінің параметрлерін бейімдеу жеткілікті. Осылайша архитектура нақты жабдыққа әсер етпей, диспетчерлік командаларды, ақаулық сценарийлерін және оңтайландыру нәтижелерін қауіпсіз тексеруге мүмкіндік береді.

Екінші бөлімнің есептік және эксперименттік нәтижелері. Fluidit Heat моделінде алты режим зерттелді: кеңістікті жылыту, ыстық сумен жабдықтау, біріктірілген жылыту мен ыстық су, беру температурасы 90 °C-қа төмендетілген режим, дифференциалдық қысымы 3 бар режим және сұранысы 120% жоғарылаған режим. Базалық біріктірілген режимде тұтынушыларға 2369,84 кВт жылу жеткізілді, көздің қуаты 2377,14 кВт, шығын 12,288 л/с, ең төмен қысым айырмасы 4,0 бар, желілік жылу шығыны 7,298 кВт болды және жылу тапшылығы анықталмады.

Беру температурасы 90 °C болғанда жеткізілген қуат 2369,83 кВт деңгейінде сақталып, шығын 13,664 л/с-қа өсті, ал желілік жылу шығыны 6,820 кВт-қа төмендеді. 120% сұраныс кезінде жеткізілген жылу 2843,79 кВт, көз қуаты 2850,80 кВт және шығын 14,737 л/с болды; желілік шығын 6,996 кВт, жылу тапшылығы нөлге тең қалды. Жүктеме өскенде таңдалған бағыттағы ағын жылдамдығы шамамен 19,2%-ға, қысымның меншікті жоғалуы 41,5%-ға артты. Абсолюттік желілік шығын шамамен тұрақты болғандықтан, оның салыстырмалы үлесі 0,307%-дан 0,245%-ға азайды. Бұл нәтиже энергия тиімділігін тек бір көрсеткішпен емес, жылу және гидравликалық шектеулерді бірге бағалау қажеттігін көрсетті.

Software-in-the-Loop циклі бірдей конфигурацияда он рет қайталанды. Орташа цикл ұзақтығы 23,509 с, стандарттық ауытқуы 0,907 с болды. Жалпы уақыттың шамамен 98,5%-ын Fluidit Heat симуляциясы алды, ал OPC UA оқу, деректерді тексеру және сәйкестендіру, кейінгі өңдеу мен БЛК-ға кері жазу бірге 1,5%-ға жуық болды. Демек өнімділікті арттырудың

негізгі резерві байланыс хаттамасында емес, модельді жүктеу мен есептеу кезеңінде орналасқан.

Формалды верификация нәтижелері. UPPAAL моделінде Scenario, Plant, PLC, HMI, Archive, Integration, Twin және Observer компоненттерінен тұратын параллель уақыттық автоматтар желісі құрылды. Датчик ақауы, OPC UA арнасының үзілуі, архивтің қолжетімсіздігі, Fluidit есептеу сервисінің істен шығуы және процестік ақау сценарийлері қарастырылды. Команда дедлайны, жауапты растау уақыты және модель есептеуінің жоғарғы шегі символдық уақыт параметрлерімен берілді.

Верификация берілген шарттарда жүйенің қауіпсіз күйге ауысуын, жарамсыз деректер кезінде оңтайландырылған команданың бұғатталуын, есептеу немесе байланыс ақауында қауіпсіз команданың берілуін және тығырықтық күйлердің болмауын растады. Бұл нәтиже аномалия детекторының статистикалық дәлдігін емес, TIA Portal–Python–Fluidit Heat компоненттерінің өзара әрекеттесу логикасы мен уақыттық тәртібін негіздейді. Формалды модель нақты секундтық өлшемдердің орнына жобалық шектерді тексеретіндіктен, оны SIL уақыт өлшемдерімен бірге қолдану қажет.

Үшінші бөлімдегі математикалық модель. Үшінші бөлімде берілген жылу жүктемесін қамтамасыз етіп, температура, қысым және қызмет сапасы шектеулерін сақтай отырып отын тұтынуды азайтатын математикалық модель құрылды. Желі бағытталған граф түрінде берілді; түйіндерде масса балансы, құбырларда гидравликалық кедергі мен жылу жоғалуы, араластыру түйіндерінде энергия балансы, жылу пункттерінде энтальпия айырмасы және көзде пайдалы жылу мен отын шығыны арасындағы байланыс сипатталды. Сорғының айналу жиілігі, клапан кедергісі, желілік су температурасы, қысым және тұтынушы жүктемесі басқарылатын немесе шектелетін айнымалылар ретінде қарастырылды.

Оңтайландыру критерийі жылу көздерінің пайдалы әсер коэффициентін және отынның жану жылуын ескере отырып жиынтық отын шығынын азайтуға бағытталды. Шектеулер тұтынушылардың жылуға сұранысын, беру температурасының рұқсат етілген диапазонын, минималды дифференциалдық қысымды, құбырдағы жылдамдықты, сорғы мен арматураның жұмыс аймағын және жылу тапшылығының болмауын қамтыды. Физикалық ақаулар қосымша ағып кету, кедергінің немесе жылу өткізгіштіктің өзгеруі және жабдық тиімділігінің төмендеуі арқылы, ал өлшеу ақаулары жеке ығысу мен шу арналары арқылы берілді. Бұл бөлу датчик ақауын технологиялық бұзылыспен теңестірмеуге мүмкіндік береді.

Үшінші бөлімдегі модельдерді кросс-тексеру. MATLAB/Simulink/Simscape ортасында құбырлар, жылу тасымалдағыштың ағыны, қысым жоғалуы, жылу беру және тұтынушы жүктемелері бар тәуелсіз модель жасалды. Ол Fluidit Heat нәтижелерімен 100% және 120% жүктеме кезінде салыстырылды. Жеткізілген жылу қуатының салыстырмалы айырмасы 0,003%-дан аспады, жылу көзі қуаты бойынша 0,025%-дан төмен болды. Шығын мен жылу тасымалдағыш жылдамдығының MAPE көрсеткіші 1,92–1,99%, тұтынушылардағы қысым айырмасы бойынша 0,25%-дан аз болды.

Қысымның нақты жоғалуы бойынша MATLAB нәтижесі Fluidit Heat-тен шамамен 5,6% төмен болды. Желілік жылу шығыны MATLAB моделінде 100% жүктемеде 6,21%-ға, 120% жүктемеде 10,81%-ға жоғары шықты. Айырмашылық жылу алмасу теңдеулерінің қойылымы, топырақ температурасы және модель параметрлерінің сәйкестендірілуімен түсіндірілді. Нәтиже негізгі гидравликалық және энергетикалық көрсеткіштердің үйлесімділігін растады, сонымен бірге өндірістік қолданар алдында жылу беру параметрлерін калибрлеу қажеттігін көрсетті.

Төртінші бөлімдегі аномалияларды анықтау әдістемесі. Төртінші бөлімде цифрлық егіз алты бақылаусыз немесе біркластық алгоритммен толықтырылды: Z-score, Isolation Forest, One-Class SVM, Local Outlier Factor, Elliptic Envelope және MLP-автоэнкодер. Зерттеу бірлігі 15 минуттық интервалдағы бір тұтынушының күйі болды. Белгілер векторына жылыту және ыстық су жүктемесі, беру және кері қысым, беру және кері температура, көлемдік шығын енгізілді. Әр тұтынушыға жеке модель үйретіліп, белгілер оқыту жиынының параметрлері бойынша стандартталды.

Бес тұтынушы үшін 30 тәуліктік синтетикалық қатар жасалды: барлығы 14 400 бақылау, оның 10 080-і қалыпты оқыту жиыны, 4320-сы тест жиыны болды. Тестке 669

басқарылатын аномалия енгізілді: беру температурасының шамамен 90 °C-қа төмендеуі, дифференциалдық қысымның 3 барға азаюы, жүктеменің 120%-ға өсуі, ағып кетуге ұқсас ауытқу және датчик ақауы. Жоғары сұраныс статистикалық ауытқу ретінде белгіленгенімен, оның өзі міндетті түрде технологиялық бұзушылық емес екені ескерілді.

Z-score үшін үш стандарттық ауытқу шегі, Isolation Forest үшін 250 ағаш және contamination 0,03, One-Class SVM үшін RBF ядросы мен nu 0,03, LOF үшін 35 көрші, Elliptic Envelope үшін support fraction 0,90 қолданылды. MLP-автоэнкодер 7–14–4–14–7 архитектурасымен, tanh белсендіруімен және ерте тоқтатумен үйретілді. Z-score-дан басқа модельдердің шешім шегі оқыту балдарының 97-процентилі бойынша қойылды. Қорытынды белгі кемінде төрт алгоритмнің келісімімен қалыптастырылды.

Аномалияларды анықтау нәтижелері. Көпшілік шешімі 4320 тест бақылауында precision 92,26%, recall 98,06%, F1 95,07% және ROC AUC 99,58% көрсетті; 55 жалған дабыл және 13 өткізіп алынған аномалия тіркелді. Ең жақсы жеке модель Elliptic Envelope F1 91,66% нәтижесіне жетті, сондықтан біріктірілген тәсілдің өсімі 3,41 пайыздық тармақ болды. Z-score F1 91,06%, MLP-автоэнкодер 90,34%, LOF 90,23%, One-Class SVM 89,68%, Isolation Forest 73,11% көрсетті. Алгоритмдердің әртүрлі математикалық қағидалары бірін-бірі толықтырып, сезімтал модельдердің артық жалған дабылдарын азайтты.

Қателер матрицасы 3596 қалыпты және 656 аномалиялық бақылаудың дұрыс жіктелгенін көрсетті. Өндірістік жүйеде 13 өткізіп алынған оқиғаның қауіпсіздік құны мен 55 жалған дабылдың оператор жүктемесіне әсері бөлек бағалануы тиіс. Сондықтан модель шешімі автоматты басқару командасына тікелей айналдырылмайды: алғашқы кезеңде ол операторға кеңес беретін белгі ретінде қолданылып, кейін Fluidit Heat сценарийі арқылы ықтимал ақаудың қысымға, температураға, шығынға және жылу тапшылығына әсері тексеріледі.

Жылу энергиясын есепке алу нәтижелері. Төртінші бөлімде маусым мен жұмыс режимін ескеретін жылу энергиясын есептеу алгоритмі және «Сайман-АУЭС» электромагниттік жылу есептегішінің зертханалық үлгісі әзірленді. Сынақта бақылау көлемі 180,960 м³, аспап көрсеткіші 181,101 м³, айырма 0,141 м³ болды және рұқсат шегінен аспады; өлшеу құралының түрі 2023 жылғы 28 желтоқсандағы №2459 сертификатпен бекітілді.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы. Біріншіден, OPC UA, Python, Fluidit Heat және UPPAAL құралдарын бір Software-in-the-Loop контурында біріктіретін гетерогенді бағдарламалық-аппараттық үйлестіру тәсілі әзірленді. Ол екібағытты алмасуды, сценарийді орындауды, нәтижені тексеруді және қауіпсіз команданы қалыптастыруды қамтиды.

Екіншіден, физикалық модель нәтижелері мен автоэнкодердің қайта құру қатесін модельдік қалдықтар арқылы байланыстыратын гибридті аномалия анықтау тәсілі ұсынылды. Бұл өлшеу ақауы мен технологиялық өзгерісті ажыратып, статистикалық ескертуді физикалық сценариймен тексеруге мүмкіндік береді.

Үшіншіден, көздердің ПӘК-ін, отынның жану жылуын және гидравликалық шығындарды ескеріп, шектеулер жағдайында жүктемені бөлу арқылы отынды азайтатын модель негізделді. Төртіншіден, Fluidit Heat пен MATLAB/Simulink/Simscape модельдерін жылу қуаты, шығын, жылдамдық, қысым және жылу жоғалту бойынша салыстыратын кросс-верификация әдісі әзірленді.

Практикалық маңыздылығы, сенімділігі және шектеулері. Практикалық нәтижелер: цифрлық егіз, WinCC интерфейсі, Python сервисі, аномалияларды анықтау модулі, жылу энергиясын есептеу алгоритмі және жылу есептегіш үлгісі. Жекелеген нәтижелер «Корпорация Сайман» ЖШС жұмыстарында қолданылды; кешен режимдерді салыстыруға, қауіпсіз сценарийді тексеруге және өлшемдердің модельден ауытқуын бағалауға мүмкіндік береді.

Аномалия метрикалары синтетикалық деректерге жатады және өндірістік дәлел емес. Енгізу үшін толық жылыту маусымының архиві, датчик сапасының метадеректері, расталған ақаулар мен оператор әрекеттерінің журналы, уақыт бойынша бөлінген оқыту, валидация және тәуелсіз тест қажет. Нақты отын үнемі бірдей жағдайдағы базалық және өзгертілген басқаруды бақыланатын салыстырумен бағалануы тиіс.

Автордың жеке үлесі және нәтижелерді апробациялау. Автор мақсат пен

міндеттерді қалыптастырды, деректерді талдады, цифрлық егіз бен интеграцияны әзірледі, Fluidit Heat және MATLAB/Simulink/Simscape модельдерін салыстырды, SIL сынақтарын, UPPAAL верификациясын және аномалия детекторларын бағалауды орындады. Зерттеу AP25795155 жобасы аясында жүргізілді.

Тақырып бойынша 6 жұмыс жарияланды: біреуі Scopus басылымында, бесеуі уәкілетті комитет ұсынған басылымдарда; халықаралық конференция материалы да бар. Екі авторлық құқық куәлігі және «Жылуды интеллектуалды есепке алуға арналған аппараттық-бағдарламалық кешен» пайдалы моделіне №9014 патент алынды.

Қорытынды. Зерттеу нәтижелері жылумен жабдықтау жүйесінің физикалық моделін, автоматтандыру құралдарын және деректерді интеллектуалды талдауды бірыңғай контурда үйлестіру техникалық тұрғыдан іске асатынын көрсетті. Ұсынылған шешім аномалияны ерте белгілеуге, оның ықпалын модельдеуге және басқарушы әсерді нақты объектіге жібергенге дейін тексеруге мүмкіндік береді. Келесі кезеңнің негізгі міндеті – өндірістік архивтерде уақыт бойынша тәуелсіз валидация жүргізу және бақыланатын далалық сынақтарда отын үнемінің нақты шамасын анықтау.