Габит Шуйтенов – кандидат педагогических наук, ассоциированный профессор, Esil University, Казахстан, Астана; e-mail: shuitenov.g@esil.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9905-7247.

Серик Атаконысулы Алтынбек – PhD, ассоцированный профессор кафедры «Информационные системы и технологии» Esil University, Астана, Казахстан; e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Авторлар туралы мәліметтер

Тұрсынхан Саятұлы Жылқыбаев* – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Алма Фазылагзамовна Даутова – педагогика ғылымдарының магистрі, «Тарих» кафедрасының оқытушы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: dautova_alma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1608-1488.

Дана Серіккызы Жұмашева – техника ғылымдарының магистрі, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Шәкәрім университеті, Семей қ., Қазақстан; e-mail: d.zhumasheva@shakarim.kz.

Ғабит Шуйтенов – педагогика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Esil University, Қазақстан, Астана; e-mail: shuitenov.g@esil.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9905-7247.

Серік Атаконысұлы Алтынбек – PhD, «Ақпараттық жүйелер және технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Esil University, Астана, Қазақстан; e-mail: Serik_aa@bk.ru**.** ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Information about the authors

Tursynkhan Zhylkybayev* – master of technical sciences, lecturer of Department of Automation and Information Technologies, Shakarim university, Semey c., Kazakhstan; e-mail: tursynhan.jylqybaev@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8918-527X.

Alma Dautova – Master of Pedagogical Sciences, Shakarim University, Lecturer at the Department of History, Semey, Kazakhstan; e-mail: dautova_alma@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1608-1488.

Dana Zhumasheva – Master of Technical Sciences, lecturer of the Department «Automation and information technologies», Shakarim University, Semey c., Kazakhstan; e-mail: d.zhumasheva@shakarim.kz.

Gabit Shuitenov – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Esil University, Kazakhstan, Astana; e-mail: shuitenov.g@esil.edu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9905-7247.

Serik Atakonyssuly Altynbek – PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Esil University, Astana, Kazakhstan; e-mail: Serik_aa@bk.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8435-7773.

Received 01.06.2026
Revised 28.06.2026
Accepted 03.07.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-18

ҒТАХР: 50.43.19

CC BY 4.0
Check for updates

А. Асет[1], Е.А. Оспанов[2]*, А.М. Ахметова[1], Н.С. Сарсенбаев[3], А.А. Бейсембаев[3]
[1]Әл-фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
050040, Қазақстан, Алматы, әл-фараби даңғылы 71
[2]Шәкәрім университеті, 071410, Қазақстан, Семей, Глинки көшесі 20 А
[3]Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050040, Қазақстан, Алматы, Сәтбаев көшесі 22в
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

СУМЕН ЖАБДЫҚТАУДЫ АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ ДИСПЕТЧЕРЛЕУГЕ АРНАЛҒАН ЖОҒАРЫ ТИІМДІ, ЖОҒАРЫ СЕНІМДІ ТАРАТЫЛҒАН ЖҮЙЕЛЕРДІ МОДЕЛЬДЕУ

Аңдатпа: *Сумен жабдықтауды автоматтандыру және диспетчерлеуге арналған таратылған жүйелерді модельдеу қазіргі кездегі су тапшылығы проблемасы мен апаттық жағдайды дер кезінде болдырмау, сонымен бірге апаттық жағдайды алдын ала болжау,*

©А. Асет, Е.А. Оспанов, А.М. Ахметова, Н.С. Сарсенбаев, А.А. Бейсембаев, 2026

заманауи датчиктер мен цифрлық құрылғыларды қолдану арқылы диспетчердің жүктемесін азайту мәселелерін шешуге бағытталған.

Бұл жұмыстың мақсаты – жүйені нақты енгізбей тұрып, оның қалай жұмыс істейтінін алдын ала тексеру, оңтайландыру және тәуекелді азайту.

Ғылыми мақалада тербелмелі және бірінші ретті апериодикалық буын қолдана отырып, су қысымы үшін күшейту коэффициенті қарастырылып, k=5 және T параметрлері бойынша салыстырмалы талдау жасалынған. Сонымен қатар, имитациялық модельдеу және параметрлік талдау әдістері қолданылып, беріліс функциясы негізінде интерполяция тәсілі арқылы жүйенің динамикалық сипаттамалары бағаланған.

Зерттеу нәтижелері су қысымын тұрақтандыру, жүйенің сенімділігін арттыру, жоғарғы қабаттардағы гидравликалық шығындарды азайту және сумен жабдықтау жүйесін тиімді басқару үшін инженерлік шешімдер ұсынуға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсіл ресурстарды үнемдеуге, апат қаупін төмендетуге, басқару сапасын жақсартуға және көпқабатты тұрғын үй кешендеріндегі су тарату процестерін автоматтандырудың тиімділігін арттыруға негіз болады. Бұл әдіс практикалық енгізуге дейін жүйе параметрлерін дәл таңдауға көмектеседі.

Түйін сөздер: *бағдарламалық логикалық бақылаушы, микроконтроллер, Қымсым датчигі, ПИ реттеуіш, имитациялық модельдеу.*

Кіріспе

Сумен жабдықтау жүйесінің дамуы адамзат өркениетінің дамуымен тығыз байланысты. Ежелгі Мысыр, Месопотамия, Үндістан және Қытайда алғашқы су арналары, құдықтар мен су қоймалары пайда болды. Ежелгі Римде акведуктар арқылы қалаларға су жеткізудің дамыған жүйесі қалыптасты. Орта ғасырларда сумен жабдықтау баяу дамып, негізінен құдықтар, су мұнаралары және табиғи су көздерінен су тасу қолданылды. Ал Андалусия мен Бағдатта күрделі су жүйелері жұмыс істеді. XVI-XIX ғасырларда қала халқының өсуіне байланысты металл құбырлар, сорғылар және резервуарлар енгізіліп, су жүйелері күрделене түсті. XIX ғасырдың соңы мен XX ғасырдың басында орталықтандырылған су жүйелері қалыптасып, суды сүзу мен хлорлау сияқты тазарту әдістері енгізілді. Қазіргі кезеңде автоматтандырылған басқару, SCADA жүйелері, қашықтан мониторинг, су мен энергияны үнемдеу, қайта пайдалану технологиялары дамуда. Болашақта smart water supply, жасанды интеллект, деректерді талдау және климаттық өзгерістерге бейімделген шешімдер кеңінен қолданылмақ. Осыған байланысты зерттеу жұмысында Қазақстандағы су тапшылығы және тұрғын үй кешендеріндегі су жүйесіндегі физикалық әрі көрінерлік жоғалтуларды азайту жолдары қарастырылады [1].

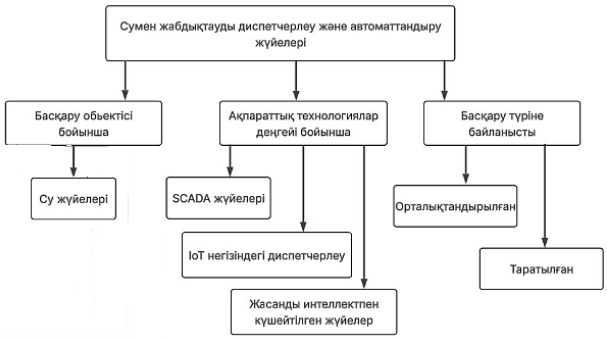
Материалдар мен тәсілдер

Нысанды басқару үшін жүйеде суық және жылы су тұтынушыларының саны өте көп екенін ескеру қажет, сондықтан жеке пәтердің су тұтынуының математикалық моделі салыстырмалы түрде қарапайым болғанымен, көптеген пәтерлерді ескерген жағдайда модель әлдеқайда күрделі болады. Бұл мақалада көптеген біртекті, бірақ параметрлері әртүрлі модельдерден тұратын объектіні жуық түрде сол модельге ұқсас модельмен сипаттауға болатыны жөніндегі гипотеза тексеріледі.Бұрын жазылған әдебиеттерде талдау жүргізілген, ал менің ғылыми мақаламда параметрлер сандық оңтайландыру арқылы таңдалып, график түрінде айқын көрсетілді [2].

Қазіргі SCADA жүйесінің артықшылықтары жұмыс режимі тәулік бойы онлайн бақыланады (операторсыз жұмыс істей береді), апаттардың алдын алады (қысым түссе, автоматты түрде сигнал береді), су сапасын бақыланады, шығындарды азайтады, деректерді автоматты түрде сақтап және есеп береді (мысалы, ай сайынғы су тұтыну есебі) және 1-суретте сумен жабдықтау автоматтандыру жүйелерінің құрылымдық сұлбасы көрсетілді.

Компоненттік база және модельдеу параметрлері

Тұрғын үй кешендеріне су желісін жүргізу бойынша сызықты жүйе қарастырылып [3], талдау жүргізу бағытында ғылыми жұмысқа зерттеу жасаумыз керек, яғни ғылыми зерттеу жұмысында сумен жабдықтау диспетчерлеу жүйесінде таратылған бірнеше объектілерді жуықтату әдісін қолданамыз, бұл әдіс нақты сумен жабдықтау жүйесіндегі әртүрлі физикалық объектілерді (мысалы, сорғылар, резервуарлар, құбырлар, клапандар және т.б.) автоматтандыру және басқару жүйесі үшін қарапайым математикалық модельдерге айналдыру үдерісі. Бұл тәсіл – күрделі, кең ауқымды (таратылған) жүйелерді басқаруды жеңілдету үшін қолданылады [4].



Сурет 1 – Сумен жабдықтау автоматтандыру жүйелерінің құрылымдық сұлбасы

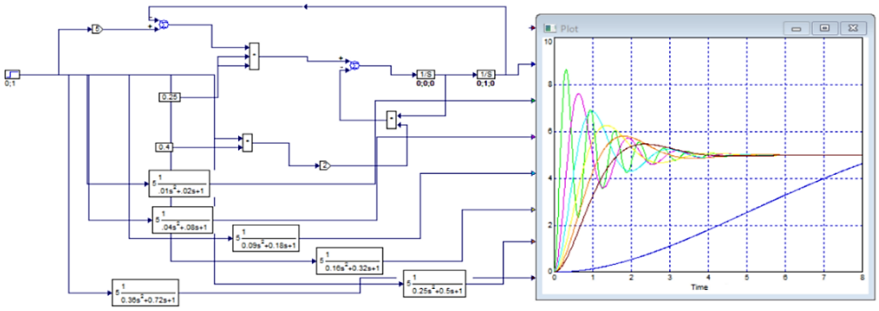
Жуықтау (аппроксимациялау) арқылы модельдер қарапайым беріліс функциялар түрінде сипатталады, сумен жабдықтау жүйесінде гидравликалық резонаныстық жиіліктер болады, ол жүйенің тұрақтылығына әсер етеді, бұл жиіліктер жүйедегі су қысымына, ағынына, жылдамдығына байланысты есептелінеді, гидравликалық резонанстық жиілік деп су желісіндегі сорғының пульсациясын немесе клапан сорғыға жақын орналасса су қысымы артып, тербелістер күшейіп, сорғы станциясында шу, діріл және жиілік жоғарлағанда апаттық жағдай туындауы мүмкін, гидравликалық резонанстық жиілік төмен болса, құбыр дірілдейді, су желісінде гидросоққы пайда болады, құбыр мерзімінен бұрын тозады, жүйе тұрақсыз болады, сол себепті сумен жабдықтау диспетчерлік жүйесінде суық су қысымының су желісіндегі гидравликалық соққыға әсерін азайту үшін Манхэттен тұрғын үй кешеніндегі таратылған су жүйесіне зерттеу нысаны ретінде қарастырып, 20 қабатты тұрғын үйдің үш аумаққа (зона) бөліп, 1, 7, 8, 14, 15, 20-қабаттағы суық су қысымына талдау жасаймыз, бағарламалық логикалық бақылаушы, ПИ реттеуіш, микроконтроллер және аумақ (зона) үшін арнайы су желісіне су қысымы датчиктері қолданылып, көрсеткіштерге сүйене отырып модельдейміз, ол үшін Vis Sim бағдарлама ортасында сызықты модель арқылы талдау жасау үшін төмендегідей тербелмелі буынның өтпелі функцияны құрамыз:

$$W(s) = \frac{k}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1} \quad (1)$$

Мұндағы: $W(s)$ -суық су қысымының беріліс функциясы, суық су қысымы (Лаплас түрлендіру аргументі ретінде алынған мән), k- күшейткіш коэффициенті (Су жүйенің қысымның өзгеріс амплитудасы бойынша алынған мән яғни диспетчерлік пункіттегі БЛБ сигналы), k – беріліс коэффициенті су қысымына әсер ететін элементтің сезімталдығын сипаттайды, Физикалық мағынасы: кіріс қысымындағы немесе клапан ашылуындағы өзгеріске қатысты шығу қысымының (немесе сигналдың) шамасын анықтайды. $T_{\text{р}}$ – инерция уақыты (Су жүйендегі суық су қысымның баяу өзгеруі бойынша k=5, Т1 $= 0.1\text{сек.}, 0.2\text{сек.}, 0.3\text{сек.}, 0.4\text{сек.}, 0.5\text{сек.}, 0.6\text{сек.}, \text{Т}_2 = 0.02\text{сек.}, 0.08\text{сек.}, 0.18\text{сек.}, 0.32\text{сек.}, 0.5\text{сек.}, 0.72\text{сек.}, s = 1 \ldots 6\frac{1}{\text{сек}}$.) Т – уақыт тұрақтылығы ,Буынның инерциясын сипаттайды, яғни жүйенің кіріс әсеріне жауап беру жылдамдығын көрсетеді. Мағынасы: егер су қысымын өзгерту керек болса, жүйе жаңа тепе-теңдік күйіне жетеді, Т уақыт диапазоны Жүйенің қысым орнығу уақытын берілді, суық су жүйесіндегі параметрлер «Алматы су» шаруашылық жүргізу құқығындағы мемлекеттік коммуналдық мемлекеттік коммуналдық кәсіпорынның соңғы үш жылғы су жүйесі деректер қорына негізделіп алынды [5]. 2-Суретте суық су қысымын автоматты реттеу жүйесінің тербелмелі буын бойынша құрылған динамикалық моделі көрсетілген.

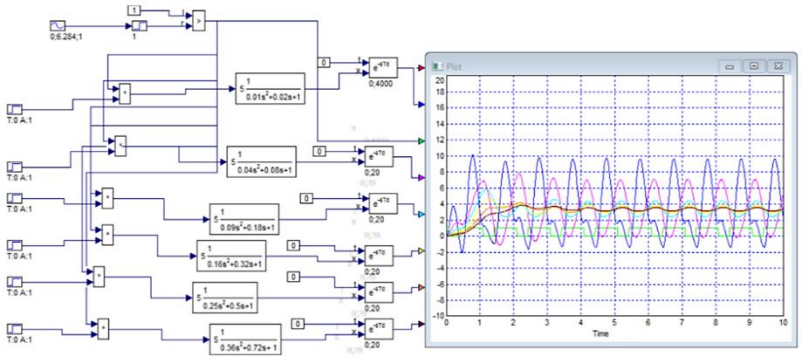
Модель Simulink ортасында жасалған және су жүйесіндегі қысымның уақыт бойынша өзгерісін сипаттайды. суық су қысымын тұрақты деңгейде ұстау мақсатында реттеу жүйесі құрастырылған. Мұндағы негізгі мақсат – қысымның артық тербелісін азайту және берілген мәнге (мысалы, 4-6 бар) тез әрі тұрақты түрде жету. Бұл буындар гидравликалық жүйедегі судың инерциясын және құбырлардағы серпімділікті модельдейді [6]. Мұндай буындарда қысым бірден емес, уақыт өте келе қалыптасады және бастапқыда тербеліс байқалады – яғни қысым жоғарылап, төмендеп, біртіндеп орнығады. Бұл буындар гидравликалық жүйедегі судың инерциясын және құбырлардағы серпімділікті модельдейді. Мұндай буындарда қысым

бірден емес, уақыт өте келе қалыптасады және бастапқыда тербеліс байқалады – яғни қысым жоғарылап, төмендеп, біртіндеп орнығады [4]. 2-ші суреттегі оң жақтағы оцилограф терезесінде әртүрлі түсті қисықтар уақыт бойынша қысымның өзгерісін көрсетеді, яғни бастапқы секундтарда қысым тез өсіп, тербелістер байқалады. Кейін жүйе тұрақталуға бет алады. Түрлі түсті қисықтар – бұл әртүрлі параметрлер (мысалы, әртүрлі реттеу коэффициенттері) кезінде жүйенің реакциялары. График бойынша кейбір қисықтарда тербеліс көп – бұл реттегіштің тым жоғары күшейту коэффициентін көрсетеді. Басқаларында жүйе баяу, бірақ тұрақты – бұл жүйенің инерциясы көп екенін білдіреді, сонымен бірге 2 - суреттегі суық су қысымын автоматты реттеу жүйесінің тербелмелі буындар бойынша құрылған динамикалық модель [7-8] ғылыми жұмыстарда көрсетілген.

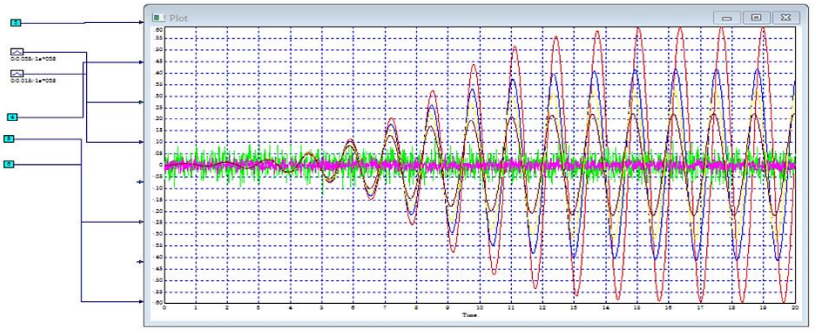


Сурет 2 – Суық су қысымын автоматты реттеу жүйесінің тербелмелі буындар бойынша құрылған динамикалық модель сұлбасы

3-ші суретте көрсетілген тербелмелі буындардың параметрлеріне байланысты өтпелі процестердің динамикасы бойынша модель құрудың мақсаты суық су қысымының уақыт бойынша өзгерісін әр түрлі инерцияны талдау. Осы арқылы инженер жүйенің орнықтылығын және қажетті реттеуіш негізінде параметрлер таңдай алады. 3-суреттегі тербелмелі буындардың әр түрлі параметрлері бойынша графиктер [9-10] ғылыми жұмыстарда көрсетілген. 3 Суретте тербелмелі буындардың әр түрлі параметрлері бойынша график тұрғызылды [3]. 4-ші суретте тербелмелі буын бойынша динамикалық жүйелердегі гармоникалық кіріс сигналдарына беретін амплитуда-фазалық реакциясы көрсетілген.



Сурет 3 – Тербелмелі буындардың әр түрлі параметрлері бойынша график



Сурет 4 – Тербелмелі буын бойынша динамикалық жүйелердегі гармоникалық кіріс сигналдарына беретін амплитуда-фазалық реакциясы

Жоғарыда суретте уақыт бойынша бірнеше түрлі түспен берілген қисықтар бар. Олар – әр түрлі аймақтардағы су қысымының уақыт бойынша өзгерісі (өтпелі процесс) көрсетілген, бұл модель – суық су қысымының уақыт бойынша өтпелі процесін сипаттайды, екінші ретті динамикалық жүйеге негізделген және құбырдағы су қысымының тербелісін, инерция мен кешігу әсерін, жүйенің орнықтылығын көрсетеді. Мұндағы қызыл сызық – Сорғы шығысындағы бірінші қабаттағы суық су қысымы, көк сызық- бесінші қабаттағы суық су қысымы, қоңыр сызық- онынші қабаттағы суық су қысымы, Жаслы сызық – он бесінші қабаттағы, күлгін сызық – жирманшы қабаттағы суық су қысымы [11-12].

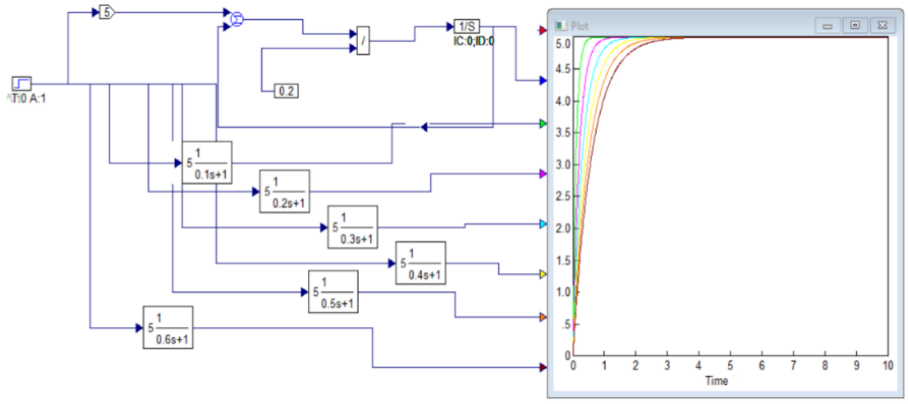
3-сурет пен 4-суреттегі көпқабатты тұрғын үйдің суық су қысымын автоматты реттеу жүйесіне жүргізілген модельдік зерттеу нәтижелері қысымның динамикалық сипаттамалары ғимарат биіктігіне тікелей тәуелді екенін ғылыми тұрғыда дәлелдеді. Әр қабаттағы гидравликалық жағдайлар қысымның өсу жылдамдығына, тербеліс амплитудасына және жүйенің орнығу уақытына нақты әсер ететіні көрсетілді [13-14]. Төменгі қабаттарда (1-7 қабат) қысымның өтпелі процесі жоғары тұрақтылықпен ерекшеленеді. Тербеліс амплитудасы өте төмен, гидравликалық шығындар минималды, реттеу жүйесі ең тиімді режимде жұмыс істейді. Бұл аймақта жүйенің динамикалық көрсеткіштері толық демпфирленген сипатта болады. Орта қабаттарда (8-14 қабаттар) гидравликалық инерция күшейе бастайды. Тербеліс амплитудасы орташа деңгейде болып, қысымның шың мәні 5-6 бар аралығында өзгереді. Жүйе 1-2 секунд ішінде орнығып, функционалды тұрақты режимге өтеді. Бұл қабаттарда басқару жүйесінің динамикалық жүктемесі өседі, бірақ тұрақтылық сақталады. Жоғарғы орта қабаттар (15-20 қабаттар) тербелмелі сипаттың айқындылығымен ерекшеленеді. Тербеліс амплитудасы едәуір жоғары, қысым 7-8 барға дейін көтеріледі, ал орнығу уақыты 3-4 секундқа созылады. Бұл қабаттарда гидравликалық шығындардың бірден артуы жүйенің орнығу қабілетін төмендетіп, динамикалық тұрақтылықты әлсіретеді, ал ең жоғарғы қабатта (20-қабат) гидравликалық инерция максималды болып, қысымның өсу сипаттамасы сызықты және баяу түрде қалыптасады. Тербеліс байқалмайды, бірақ жүйе 8 секунд ішінде тек 3.5-4.0 бар деңгейіне ғана жете алады. Бұл нәтиже сорғы станциясының қуатының жеткіліксіздігін немесе жоғарғы қабатқа дейінгі гидравликалық жолдағы энергия шығынының шектен тыс көп екенін дәлелдейді. Жалпы алғанда, модель нәтижелері көпқабатты ғимараттағы су қысымын автоматты реттеу жүйесінің динамикалық қасиеттері қабат биіктігі артқан сайын нашарлай түсетінін және жоғарғы қабаттарда қосымша инженерлік шешімдерді қажет ететінін анық көрсетті. Зерттеу нәтижелері жүйенің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету үшін қысым зоналарын бөлу, бустерлік сорғыларды қолдану, реттеу клапандарының параметрлерін оңтайландыру және адаптивті реттеу алгоритмдерін енгізу қажеттігін ғылыми негіздейді, Яғни 4-суреттегі Тербелмелі буын бойынша динамикалық жүйелердегі гармоникалық кіріс сигналдарына беретін амплитуда-фазалық реакциясы [15-16] ғылыми жұмыста көрсетілген.

Суық су қысымын автоматты реттеу жүйесінде өтпелі функция құрудың басты мақсаты көп қабатты тұрғын үйдегі суық су жүйесінің динамикалық қасиеттерін (реакциясын) математикалық түрде сипаттау. Сондықтан төмендегідей операдикалық буынның өтпелі функцияны құрамыз:

$$W(s) = \frac{k}{T_s+1} \quad (2)$$

Мұндағы:$W(s)$ – суық су қысымының беріліс функциясы, S-суық су қысымы (Лаплас түрлендіру аргументі ретінде алынған мән), k – күшейткіш коэффициенті, k – беріліс коэффициенті су қысымына әсер ететін элементтің сезімталдығын сипаттайды, Физикалық мағынасы: кіріс қысымындағы немесе клапан ашылуындағы өзгеріске қатысты шығу қысымының (немесе сигналдың) шамасын анықтайды. T_s – инерция уақыты (Су жүйендегі суық су қысымның баяу өзгеруі бойынша k=5, $T_s = 0.1\text{сек.}, 0.2\text{сек.}, 0.3\text{сек.}, 0.4\text{сек.}, 0.5\text{сек.}, 0.6\text{сек.}, s = 1 \ldots 6\frac{1}{\text{сек}}.$) Т – уақыт тұрақтылығы, Буынның инерциясын сипаттайды, яғни жүйенің кіріс әсеріне жауап беру жылдамдығын көрсетеді. Мағынасы: егер су қысымын өзгерту керек болса, жүйе жаңа тепе-теңдік күйіне жетеді, Т уақыт диапазоны Жүйенің қысым орнығу уақыты берілді, суық су жүйесіндегі параметрлер «Алматы су» шаруашылық жүргізу құқығындағы мемлекеттік коммуналдық мемлекеттік коммуналдық кәсіпорынның соңғы үш жылғы су жүйесі деректер қорына негізделіп алынды [17-18]. 5-ші

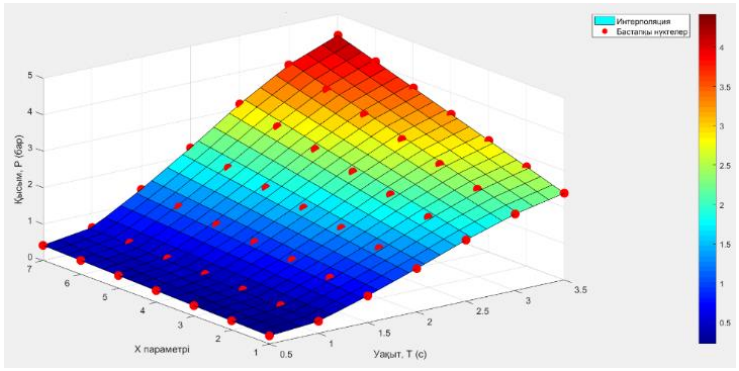
суретте суық су қысымын реттеу жүйесінің (бірінші ретті апериодтық буындар негізінде жасалған) динамикалық моделі көрсетілген.



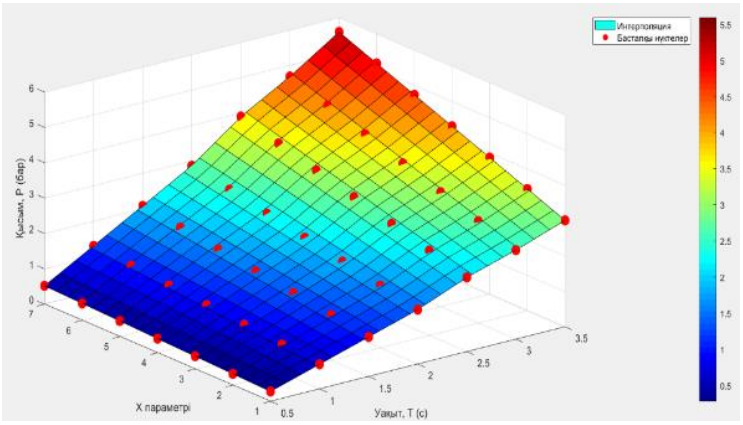
Сурет 5 – Суық су қысымын реттеу жүйесінің (бірінші ретті апериодтық буындар негізінде жасалған) динамикалық моделі

Тәтижелер мен талқылаулар

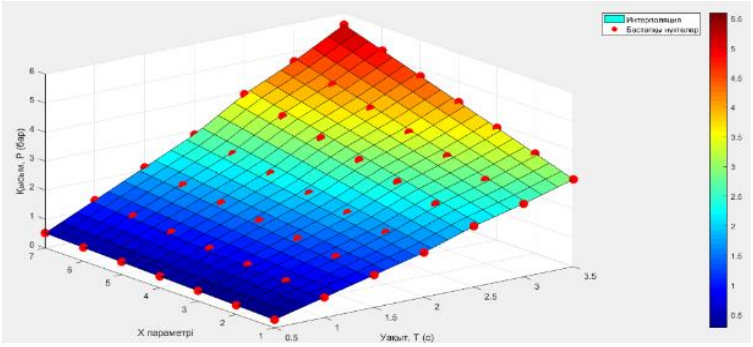
Vis sim бағдарламасында құрылған 5-ші суретте көрсетілген суық су қысымын оңтайлы басқаруға арналған тербелмелі буын үшін бірінші аумақ (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – қабаттар) және екінші аумақ (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 – қабаттар) бойынша, ал бірінші ретті апериодикалық буын үшін үшінші аумақ (14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 – қабаттар) модель бойынша суық су қысымы датчиктерінің параметрлерлерге сүйене отырып, үш аумақ бойынша суық су қысымы деректеріне сүйене отырып, интерполяция әдісі бойынша 6, 7, 8 суретте модель құрылған.



Сурет 6 – Интерполяция әдісімен модельдеу (а)



Сурет 7 – Интерполяция әдісімен модельдеу (2-аумақ үшін)



Сурет 8 – Интерполяция әдісімен модельдеу (3-аумақ үшін)

Тұрғын үйді сумен жабдықтауда автоматты реттеу жүйесіне тербелмелі және бірінші ретті апериодикалық буындар негізінде модель құрылып, әр қабаттағы қысымның уақыт бойынша өтпелі сипаттамалары анықталды, яғни төменгі (1-7) қабаттарда жүйе жоғары тұрақтылықпен ерекшеленеді. Қысымның көтерілуі тез, тербеліс амплитудасы өте төмен және орнығу уақыты минималды. Бұл су бағанының биіктігі аз болған бөлікте гидравликалық шығындардың төмендігін көрсетті. Орта қабаттар (8-14) уақыттық кешігулердің артуымен және тербеліс амплитудасының өсуімен сипатталады. Бұл бөлікте қысымның нақты мәндері 5.5-6.5 бар аралығында болып, жүйе 3-4 секунд ішінде орнығады. Мұндай динамика құбыр желісінің ұзара бастағанын және гидравликалық инерцияның артып жатқанын көрсетті. 14-15 қабаттарда тербеліс айқын көрінеді. Қысым шыңы 7-8 барға дейін жетіп, тербелу ұзақтығы 4-5 секундқа созылады. Бұл қабаттарда гидравликалық шығындар күрт артады және қысымды реттеу процессі күрделі жүйелік динамикамен сипатталып, Жоғарғы 20 қабаттарда қысымның орнығу уақыты ұзағырақ, тербеліс баяу бәсеңдейді. Орныққан қысым шамамен 4.6-4.7 бар деңгейінде тұрақтайды. Бұл инерциялық құбылыстардың басым екенін көрсетті. 20-қабатта жүйе мүлде басқа динамикалық мінез-құлық танытады. Қысым өте баяу артады, дерлік тербеліс байқалмайды. 8 секунд ішінде қысым тек 3.5-4 бар деңгейіне ғана жетеді. Бұл су бағанының ең жоғарғы нүктесінде гидравликалық шығындардың максималды екенін көрсетеді.

Қорытынды

Сумен жабдықтауды автоматтандыру және диспетчерлеуге арналған жоғары тиімді, жоғары сенімді таратылған жүйелерді модельдеу бойынша бұл мақалада жүргізілген зерттеу нәтижелерінде суық су қысымның көрсеткіштері тұрғын үйдің биіктігіне тікелей тәуелді екенін көрсетеді. Әр қабаттағы гидравликалық жағдайлар қысымның өсу жылдамдығына, тербеліс амплитудасына және жүйенің орнығу уақытына нақты әсер ететіні көрсетілді. Бірінші аумақта қабаттарда қысымның өтпелі процесі жоғары тұрақтылықпен ерекшеленеді. Тербеліс амплитудасы өте төмен, гидравликалық шығындар минималды, реттеу жүйесі ең тиімді режимде жұмыс істейді. Бұл бөлікте жүйенің динамикалық көрсеткіштері толық демпфирленген сипатта болады. Екінші аумақта) гидравликалық инерция күшейе бастайды. Тербеліс амплитудасы орташа деңгейде болып, қысымның мәні 5-6 бар аралығында өзгереді, үшінші аумақтагидравликалық инерция максималды болып, қысымның өсу сипаттамасы сызықты және баяу түрде қалыптасады.

Әдебиеттер тізімі

1. Вострова Р.Н. Мероприятие по снижению потерь в системе водоснабжения / Р.Н. Вострова, Е.А. Пехота // Казахстан Су Арнасы. – 2023. – № 9 236). – С. 16-17.
2. Пахомов А.А. Применение гидравлических средств регулирования водоподачи и водоучета для сооружений водохозяйственного строительства / А.А. Пахомов, Н.А. Колобанова // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2012. – № 3(07). – С. 137-144.
3. Investigation of linear models for control of water flow and temperature in a water supply system / A. Asset et all // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2024. – Vol. 35, № 1. – P. 113-123.
4. Automation in drinking water supply distributed system and testing of water / P. Prashant et al // IOSR Journal of Electronics & Communication Engineering (IOSR-JECE). – 2013. – Vol. 1. – P. 36-38.

5. Normey-Rico J.E. Control of Dead-Time Processes / J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho. – London: Springer, 2007. – (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing).
6. Carlos D. Analysis of hybrid demand pattern on a water distribution network with transition from intermittent to continuous water supply in Riberas de Sacramento, Chihuahua / D. Carlos, G. Mendoza, C.J.N.G. Carmen // Water Practice & Technology. – 2020. – Vol. 15, № 1. https://doi.org/10.2166/wpt.2020.013.
7. Intelligent system for control of water distribution networks / G. Emânuel et al // Water Science & Technology: Water Supply. – 2018. – Vol. 18, № 4. – P. 1270-1281. https://doi.org/10.2166/ws.2017.188.
8. Nadirbek Y. Development and Improvement of Systems of Automation and Management of Technological Processes and Manufactures / Y. Nadirbek, A. Farukh, E. Farkhod // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – 2017. – Vol. 11, № 3.
9. Smart two-tank water quality and level detection system via IoT / C.O. Samuel et al // Heliyon. – 2021. – Vol. 7. – Article e07651.
10. Каландаров П.И. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения / П.И. Каландаров, С.М. Логунова, С.М. Андреев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2023. – Т. 11, № 2. – С. 31-35.
11. Research and Design of a Water Supply Dispatching System in a Certain Area Based on Big Data Technology / Zh. L. De et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 474, № 6. – Art. 062005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/6/062005.
12. Eswaran P. Conceptual Design and Development of Water Metering System for Multiple Family Residential Buildings / P. Eswaran, A. Kumar // International Journal of Advanced Computer Research. – 2012. – Vol. 2, № 4(6). – P. 501-505.
13. Ernest A.E. Improving equity in intermittent water supply systems / A.E. Ernest, M. Fayyaz, B. Josef // AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society. – 2013. https://doi.org/10.2166/aqua.2013.065.
14. Suresh B.Ch. Efficient Design and Deployment of Aqua Monitoring Systems Using WSNs and Correlation Analysis / B.Ch. Suresh, E.R. Sreenivasa, D.L. Rajya // International Journal of Computers Communications & Control. – 2015. – Vol. 10, № 4. – P. 471-479.
15. Automatic Water Distribution System using PLC / S. Rote et al // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2017. – Vol. 6, Iss. 4. – P. 535-540. https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS040435.
16. Doan P. Performance Evaluation of River Water Quality Monitoring Using LoRa Connectivity with Fuzzy Algorithm / P. Doan, J. Nguyen, A. Ibnu // International Journal of Computers Communications & Control. – 2021. – Vol. 16, № 4. – Art. 4226. https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.4.4226.
17. Гируцкий И.И. Микропроцессорная техника систем автоматизации. Лабораторный практикум: учебно-методическое пособие / И.И. Гируцкий, А.Г. Сеньков. – Минск: БГАТУ, 2017. – 136 с.
18. Сети водоснабжения Республики Казахстан [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://data.egov.kz/ (дата обращения: 02.04.2026).

References

1. Vostrova R.N. Meropriyatie po snizheniyu poter' v sisteme vodosnabzheniya / R.N. Vostrova, E.A. Pekhota // Kazakhstan Su Arnasy. – 2023. – № 9 236). – S. 16-17. (In Russian).
2. Pakhomov A.A. Primenenie gidravlicheskikh sredstv regulirovaniya vodopodachi i vodoucheta dlya sooruzhenii vodokhozyaistvennogo stroitel'stva / A.A. Pakhomov, N.A. Kolobanova // Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii. – 2012. – № 3(07). – S. 137-144. (In Russian).
3. Investigation of linear models for control of water flow and temperature in a water supply system / A. Asset et all // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2024. – Vol. 35, № 1. – P. 113-123. (in English).
4. Automation in drinking water supply distributed system and testing of water / P. Prashant et al // IOSR Journal of Electronics & Communication Engineering (IOSR-JECE). – 2013. – Vol. 1. – P. 36-38. (in English).
5. Normey-Rico J.E. Control of Dead-Time Processes / J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho. – London: Springer, 2007. – (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). (in English).

6. Carlos D. Analysis of hybrid demand pattern on a water distribution network with transition from intermittent to continuous water supply in Riberas de Sacramento, Chihuahua / D. Carlos, G. Mendoza, C.J.N.G. Carmen // Water Practice & Technology. – 2020. – Vol. 15, № 1. https://doi.org/10.2166/wpt.2020.013. (in English).
7. Intelligent system for control of water distribution networks / G. Emânuel et al // Water Science & Technology: Water Supply. – 2018. – Vol. 18, № 4. – P. 1270-1281. https://doi.org/10.2166/ws.2017.188. (in English).
8. Nadirbek Y. Development and Improvement of Systems of Automation and Management of Technological Processes and Manufactures / Y. Nadirbek, A. Farukh, E. Farkhod // Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems. – 2017. – Vol. 11, № 3. (in English).
9. Smart two-tank water quality and level detection system via IoT / C.O. Samuel et al // Heliyon. – 2021. – Vol. 7. – Article e07651. (in English).
10. Kalandarov P.I. Avtomatizatsiya sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya / P.I. Kalandarov, S.M. Logunova, S.M. Andreev // Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsial'noi sferakh. – 2023. – T. 11, № 2. – S. 31-35. (In Russian).
11. Research and Design of a Water Supply Dispatching System in a Certain Area Based on Big Data Technology / Zh. L. De et al // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 474, № 6. – Art. 062005. https://doi.org/10.1088/1755-1315/474/6/062005. (in English).
12. Eswaran P. Conceptual Design and Development of Water Metering System for Multiple Family Residential Buildings / P. Eswaran, A. Kumar // International Journal of Advanced Computer Research. – 2012. – Vol. 2, № 4(6). – P. 501-505. (in English).
13. Ernest A.E. Improving equity in intermittent water supply systems / A.E. Ernest, M. Fayyaz, B. Josef // AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society. – 2013. https://doi.org/10.2166/aqua.2013.065. (in English).
14. Suresh B.Ch. Efficient Design and Deployment of Aqua Monitoring Systems Using WSNs and Correlation Analysis / B.Ch. Suresh, E.R. Sreenivasa, D.L. Rajya // International Journal of Computers Communications & Control. – 2015. – Vol. 10, № 4. – P. 471-479. (in English).
15. Automatic Water Distribution System using PLC / S. Rote et al // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2017. – Vol. 6, Iss. 4. – P. 535-540. https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS040435. (in English).
16. Doan P. Performance Evaluation of River Water Quality Monitoring Using LoRa Connectivity with Fuzzy Algorithm / P. Doan, J. Nguyen, A. Ibnu // International Journal of Computers Communications & Control. – 2021. – Vol. 16, № 4. – Art. 4226. https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.4.4226. (in English).
17. Girutskii I.I. Mikroprotsessornaya tekhnika sistem avtomatizatsii. Laboratornyi praktikum: uchebno-metodicheskoe posobie / I.I. Girutskii, A.G. Sen'kov. – Minsk: BGATU, 2017. – 136 s. (In Russian).
18. Seti vodosnabzheniya Respubliki Kazakhstan [Ehlektronnyi resurs]. – Rezhim dostupa: https://data.egov.kz/ (data obrashcheniya: 02.04.2026). (In Russian).

А. Асет[1], Е.А. Оспанов[2]*, А.М. Ахметова[1], Н.С. Сарсенбаев[3], А.А. Бейсембаев[3]
[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, проспект Аль-Фараби, 71
[2]Шәкәрім университет, 071410, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
[3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева,
050040, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22В
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ И ВЫСОКОНАДЁЖНЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Моделирование распределённых систем для автоматизации и диспетчеризации водоснабжения направлено на решение актуальной проблемы дефицита воды, своевременное предотвращение аварийных ситуаций, а также их предварительное прогнозирование и снижение нагрузки на диспетчера за счёт применения современных датчиков и цифровых устройств.

Цель данной работы – предварительно проверить, как будет функционировать система до её реального внедрения, выполнить её оптимизацию и снизить риски.

В научной статье рассматривается коэффициент усиления для давления воды с использованием колебательного звена и апериодического звена первого порядка, а также проводится сравнительный анализ по параметрам k = 5 и T. Кроме того, применены методы имитационного моделирования и параметрического анализа, а динамические характеристики системы оценены с использованием метода интерполяции на основе передаточной функции.

Результаты исследования позволяют предложить инженерные решения для стабилизации давления воды, повышения надёжности системы, снижения гидравлических потерь на верхних этажах и эффективного управления системой водоснабжения. Предложенный подход создаёт основу для экономии ресурсов, снижения риска аварий, повышения качества управления и увеличения эффективности автоматизации процессов распределения воды в многоэтажных жилых комплексах. Данный метод также помогает точно подобрать параметры системы до её практического внедрения.

Ключевые слова: *программируемый логический контроллер, микроконтроллер, датчик давления, ПИ-регулятор, имитационное моделирование.*

A. Asset[1], Y.A. Ospanov[2]*, A.M. Akhmetova[1], N.S. Sarsenbayev[3], A.A.Beisembayev[3]
[1]Al-Farabi Kazakh National University,
71 Al-Farabi Avenue, Almaty 050040, Republic of Kazakhstan
[2]Shakarim University, 20 A Glinki Street, Semey 071410, Republic of Kazakhstan
[3]Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev,
22V Satpayev Street, Almaty 050040, Republic of Kazakhstan
*e-mail: y.ospanov@shakarim.kz

MODELING OF HIGHLY EFFICIENT AND HIGHLY RELIABLE DISTRIBUTED SYSTEMS FOR WATER SUPPLY AUTOMATION AND DISPATCHING

Modeling distributed systems for water supply automation and dispatching is aimed at addressing the current problem of water scarcity, ensuring timely prevention of emergency situations, enabling their early prediction, and reducing dispatcher workload through the use of modern sensors and digital devices.

The purpose of this work is to preliminarily evaluate how the system will function before its actual implementation, optimize it, and reduce associated risks.

The scientific paper examines the gain coefficient for water pressure using an oscillatory element and a first-order aperiodic element, and also provides a comparative analysis for the parameters k = 5 and T. In addition, simulation modeling and parametric analysis methods were applied, and the dynamic characteristics of the system were evaluated using an interpolation method based on the transfer function.

The research results make it possible to propose engineering solutions for stabilizing water pressure, improving system reliability, reducing hydraulic losses on upper floors, and ensuring efficient control of the water supply system. The proposed approach provides a basis for saving resources, reducing accident risk, improving control quality, and increasing the efficiency of automating water distribution processes in multi-storey residential buildings. This method also helps to accurately determine system parameters prior to practical implementation.

Key words: *programmable logic controller, microcontroller, pressure sensor, PI controller, simulation modeling.*

Авторлар туралы ақпарат

Асхат Асет – докторант, аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: asset.askhat.81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8842-328X.

Ербол Аманғазыұлы Оспанов* – PhD, доцент, Шәкәрім университеті, Семей; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.

Ардақ Мергенбайқызы Ахметова – phD, доцент, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы; e-mail: ardak_66@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8360-5504.

Нұрлан Садуақасұлы Сарсенбаев – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы; e-mail: n_sarsenbayev 75@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8640-7175.

Акамбай Агыбайұлы Бейсембаев – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы; e-mail: akambaybeisembayev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4763-0769.

Сведения об авторах

Асхат Асет – докторант, старший преподаватель, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы; e-mail: asset.askhat.81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8842-328X.

Ербол Амангазович Оспанов* – PhD, доцент, Университет Шәкәрім, Семей; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.
Ардақ Мергенбаевна Ахметова – phD, доцент, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы;e-mail: ardak_66@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8360-5504.
Нурлан Садуакасович Сарсенбаев – кандидат технических наук, доцент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, Алматы; e-mail: n_sarsenbayev75@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8640-7175.
Акамбай Агыбайович Бейсембаев – кандидат технических наук, доцент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. Сатпаева, Алматы; e-mail: akambaybeisembayev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4763-0769.

Information about the authors

Askhat Asset – PhD doctoral student, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: asset.askhat.81@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8842-328X.
Yerbol Ospanov* – PhD, Associate Professor, Shakarim University, Semey; e-mail: y.ospanov@shakarim.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5342-274X.
Ardak Mergenbaevna Akhmetova – PhD, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty; e-mail: ardak_66@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8360-5504.
Nurlan Saduakasovich Sarsenbayev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev, Almaty; e-mail: n_sarsenbayev75@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8640-7175.
Akambay Agybayovich Beisembaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. Satpayev, Almaty; e-mail: akambaybeisembayev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4763-0769.

Редакцияға енуі 06.04.2026
Өңдеуден кейін түсуі 17.08.2026
Жариялауға қабылданды 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-19

МРНТИ: 81.93.29

A.T. Kerimbayeva
Satbayev University,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev St.
e-mail: aygerim744@gmail.com

MATHEMATICAL MODEL AND COMPUTATIONAL ANALYSIS OF A LIGHTWEIGHT LATTICE-BASED SIGNATURE FOR IOT DEVICES

Abstract: *This paper details a mathematical model and a performance evaluation of FALCON-M, a novel, lightweight post-quantum signature scheme specifically engineered for Internet of Things (IoT) applications. The importance of this contribution is underscored by the imperative to secure IoT devices from future quantum attacks, a challenge not adequately met by existing standards like Falcon and Dilithium, which are too demanding for resource-constrained settings owing to their use of rejection sampling and floating-point computations. Our study seeks to close the gap between theoretical post-quantum cryptographic solutions and their feasible integration into embedded systems.*

The proposed scheme is based on a lattice-based signature defined over the ring $R_q = \mathbb{Z}_q[x]/(x^n + 1)$ *with parameters* $n = 512$, $q = 12289$, $\sigma = 4.0$, $\tau = 60$. *A key feature is the complete absence of rejection sampling, which guarantees deterministic execution time and inherent resistance to timing side-channel attacks.*

Analysis reveals that the scheme achieves notably small key sizes: the public key is 928 bytes, the secret key is 256 bytes, and the signature is 973 bytes. Projections for performance on an ARM Cortex-M4 processor operating at 100 MHz indicate a signing duration of 7.4 ms. This speed is comparable to established post-quantum cryptography methods, yet it provides superior resilience against side-channel vulnerabilities.

©A.T. Kerimbayeva, 2026