Нұрдаулет Мұратбекұлы Тешебаев – докторант, специальность «Интеллектуальные системы управления» кафедры Искусственного интеллекта и Big Data, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Республика Казахстан; e-mail: nurdaulettеshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Information about the authors

Ansar Nurzhanovich Bakytzhanov* – PhD student in Automation and Control, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: bakytzhanovansar4@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-8210-9323.

Dana Karimtaevna Satybaldina – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Acting Professor of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: satybaldina_dk@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5445-4516.

Aina Zhanuzakovna Zakarina – PhD, Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zakarina_azh@enu.kz. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3875-2883.

Nurbol Beibitovich Shmitov – PhD student in Automation and Control, Department of Systems Analysis and Control, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurbol-970817@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6402-9633.

Nurdaulet Muratbekuly Teshebayev – PhD student in Intelligent Control Systems, Department of Artificial Intelligence and Big Data, Al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nurdaulettеshebaev@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6560-6578.

Редакцияға енуі 01.06.2026
Өңдеуден кейін түсуі 07.07.2026
Жариялауға қабылданды 17.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-12

МРТИ: 50.43.19

Б. Копабаева, А. Золотов*, И. Карымсакова, Д. Мясоедов, Р. Назаров
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ВТОРОГО ПОДЪЕМА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА И ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация: *В статье рассматриваются вопросы математического моделирования и оптимизации режимов работы насосных станций второго подъёма в условиях переменного водопотребления городских систем водоснабжения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности, снижения потерь воды и обеспечения стабильности гидравлических параметров в условиях неравномерного потребительского спроса. В качестве объекта исследования выбран водозабор «Смычка» города Семей. Разработана динамическая математическая модель системы водоснабжения, включающая насосную станцию второго подъёма, резервуары чистой воды и хлорирования, трубопроводную сеть, модель водопотребления и цифровой двойник объекта. Для повышения точности оценки состояния системы использован фильтр Калмана, а прогнозирование водопотребления реализовано на основе нейронной сети LSTM. Предложена архитектура интеллектуального управления, основанная на консультативном модельно-предиктивном управлении (Advisory MPC), интегрированном с существующей инфраструктурой PLC/SCADA без вмешательства в действующие контуры автоматизации. Эффективность разработанного подхода исследована в трёх эксплуатационных сценариях: номинальном режиме, режиме пикового водопотребления и аварийной перегрузке. Результаты моделирования показали повышение устойчивости системы, снижение энергопотребления на 20-30%, уменьшение числа переключений насосов и улучшение качества поддержания давления. Полученные результаты подтверждают перспективность применения*

©Б. Копабаева, А. Золотов, И. Карымсакова, Д. Мясоедов, Р. Назаров, 2026

цифровых двойников и прогнозирующего управления для модернизации действующих систем водоснабжения.

Ключевые слова: *насосная станция второго подъёма, водоснабжение, математическое моделирование, цифровой двойник, модельно-предиктивное управление, MPC, фильтр Калмана, LSTM; прогнозирование водопотребления.*

Введение

В условиях глобального изменения климата и истощения природных ресурсов, обеспечение устойчивого функционирования систем городского водоснабжения становится одной из наиболее критических задач для мирового сообщества. Согласно прогнозам Организации Объединенных Наций, к 2050 году более 68% населения планеты будет проживать в городах, что создаст беспрецедентную нагрузку на существующую инженерную инфраструктуру [1]. В этом контексте вода перестает рассматриваться просто как товар и переходит в категорию стратегического ресурса, управление которым требует внедрения инновационных подходов и высокотехнологичных решений. Мировая практика показывает, что традиционные методы эксплуатации водопроводных сетей, основанные на реактивном подходе (устранение аварий по факту их возникновения), более не являются эффективными. Современные мегаполисы и индустриальные центры сталкиваются с комплексом взаимосвязанных проблем:

• Высокий уровень потерь воды, достигающий в некоторых регионах 30-50% [2].

• Чрезмерное энергопотребление насосных станций, составляющее до 40% от общих операционных расходов коммунальных предприятий.

• Физический и моральный износ распределительных сетей и оборудования.

• Необходимость обеспечения строгих стандартов качества воды в условиях меняющегося состава исходных источников.

Традиционно водозаборные и насосные станции оснащаются локальными системами автоматизации, основанными на ПИД-регуляторах, релейной логике или простых алгоритмах регулирования давления, реализованных в программируемых логических контроллерах (ПЛК). Эти системы в первую очередь предназначены для поддержания заданного уровня давления или уровня воды в резервуаре с использованием информации обратной связи от полевых датчиков.

Хотя такие решения широко применяются на практике благодаря своей простоте и надежности, в современных условиях эксплуатации они имеют существенные ограничения.

Во-первых, городские системы водоснабжения работают в условиях существенной неопределенности, вызванной постоянным изменением потребительского спроса. Суточный спрос, сезонные колебания, колебания промышленного потребления, аварийный отбор воды и утечки в сети приводят к возникновению крайне нестационарных гидравлических условий. Во многих муниципалитетах почасовая потребность может отличаться на 30-60% по сравнению со средними значениями, в то время как кратковременные периоды пикового потребления приводят к резким перепадам давления во всей сети.

Во-вторых, гидравлические возмущения распространяются по обширным трубопроводным системам, характеризующимся нелинейными потерями напора, изменяющимися рабочими точками и запоздалой реакцией. Следовательно, управляющие воздействия, применяемые на насосных станциях, могут повлиять на сеть только после значительных временных задержек, что затрудняет регулирование в режиме реального времени.

В-третьих, значительная часть действующей в настоящее время инфраструктуры водоснабжения была введена в эксплуатацию несколько десятилетий назад. На многих насосных станциях по-прежнему используются устаревшие насосы, приводы с регулируемой частотой вращения, изношенные трубопроводные системы и устаревшие архитектуры PLC/SCADA. В таких условиях полная замена инфраструктуры автоматизации зачастую экономически нецелесообразна.

В-четвертых, рост цен на энергоносители и ужесточение требований к экологичности превратили энергоэффективность в одну из основных задач эксплуатации. Поскольку на долю насосных станций приходится значительная доля общего потребления энергии муниципальными водоканалами, даже небольшие улучшения в управлении могут принести существенную экономическую выгоду.

Помимо технологических ограничений, станции второго водозабора сталкиваются с практическими проблемами эксплуатации.

Гидравлические удары. Из-за быстрого срабатывания клапанов и внезапных изменений расхода, на станциях второго водозабора часто возникают гидравлические удары, которые создают волны давления, распространяющиеся по системе. Эти волны могут достигать давлений, в несколько раз превышающих номинальное давление системы, что может привести к повреждению оборудования и утечкам в трубопроводах [3].

Нестабильность давления. Из-за переменного спроса и ограничений оборудования, давление в системе часто колеблется значительно. Это может привести к неудовлетворению потребителей (когда давление слишком низкое) или к повреждению оборудования (когда давление слишком высокое).

Энергонеффективность. Традиционные системы управления часто работают неоптимально с точки зрения энергопотребления. Например, система может поддерживать давление выше необходимого, чтобы гарантировать надежное водоснабжение, что приводит к избыточному энергопотреблению.

Утечки и потери воды. Из-за высокого давления и гидравлических ударов, в системе часто возникают утечки.

Современные системы управления должны одновременно:

– поддерживать требуемое давление и надежность подачи воды;
– удовлетворять эксплуатационным требованиям насосов и резервуаров;
– минимизировать потребление энергии;
– учитывать неопределенность спроса;
– работать в рамках существующей инфраструктуры промышленной автоматизации.

Обычные контроллеры с обратной связью не предназначены специально для решения таких задач многоцелевой оптимизации. Системы на основе ПИД-регуляторов реагируют только после возникновения отклонений и не учитывают в явном виде изменение спроса в будущем, гидравлические ограничения или прогнозируемые сбои. В результате часто происходит чрезмерное переключение насоса, ненужное потребление энергии, колебания давления и неоптимальное использование резервуара.

Исследования, опубликованные в научных журналах, подчеркивают, что переход к адаптивному управлению давлением является наиболее экономически эффективным способом борьбы с потерями воды в изношенных городских сетях [4, 5].

Однако, несмотря на значительный прогресс в исследованиях ПДК, практическое применение в муниципальных системах водоснабжения остается ограниченным. Большинство опубликованных исследований предполагают наличие современной инфраструктуры автоматизации и прямого доступа контроллера к полевому оборудованию. В отличие от этого, многие существующие насосные станции работают с устаревшими системами PLC/SCADA, где замена нижнего уровня управления потребовала бы значительных капиталовложений, обширных работ по вводу в эксплуатацию и повышенного эксплуатационного риска.

Таким образом, целью исследования является разработка интеллектуальной архитектуры управления, способной обеспечить преимущества прогнозирующего управления при сохранении существующей инфраструктуры промышленной автоматизации.

Для решения этой задачи в данной работе предлагается консультативная платформа MPC, интегрированная с цифровым двойником системы водоснабжения. Вместо прямой замены существующих контроллеров PLC, уровень MPC работает на диспетчерском уровне и генерирует оптимальные рекомендации по эксплуатации на основе прогнозируемого спроса, гидравлических условий и ограничений оборудования. Существующие контуры управления на базе ПЛК остаются неизменными, обеспечивая эксплуатационную надежность и облегчая постепенное внедрение в реальных промышленных условиях.

Для разработки предлагаемой стратегии управления необходимо создать математическую модель системы водоснабжения, включающая насосную станцию второго подъема, резервуары чистой воды, трубопроводную сеть и систему обеззараживания, обеспечивающая описание гидравлических и технологических процессов в динамике.

Республика Казахстан, являясь страной с дефицитом водных ресурсов и огромной территорией, сталкивается с уникальным набором проблем в секторе водоснабжения. Государственная политика Казахстана, отраженная в «Концепции попереходу к зеленой экономике» и национальном проекте «Сильные регионы – драйвер развития страны», ставит амбициозные цели по 100% обеспечению населения качественной питьевой водой к 2025-2026 годам [6].

В этом контексте город Семей представляет собой характерный пример крупного индустриально-административного центра, где проблемы водоснабжения требуют немедленного научного и инженерного вмешательства.

Объект исследования: Водозабор «Смычка» в г. Семей. Город Семей, расположенный в области Абай, является одним из ключевых узлов Восточного Казахстана. Его система водоснабжения базируется на нескольких крупных водозаборах, среди которых «Смычка» играет ведущую роль, обеспечивая водой значительную часть правобережной зоны города. Техническое состояние сетей Семея характеризуется высоким уровнем износа (64,5%), что приводит к частым авариям и значительным потерям воды [7].

Водозабор «Смычка», оснащенный насосными станциями первого и второго подъемов, является критическим объектом, от стабильности работы которого зависит жизнеобеспечение десятков тысяч граждан.

В последние годы на водозаборе «Смычка» были предприняты шаги по автоматизации: внедрена система АСУ ТП на базе контроллеров СТК-500 и установлены частотные преобразователи для мощных насосов Д1250-63 [8, 9]. Однако, несмотря на наличие аппаратной базы, потенциал системы используется не полностью. Отсутствие динамической математической модели, которая связывала бы режимы работы насосов с гидравлическим состоянием городской сети, не позволяет реализовать полноценное прогностическое управление.

Материалы и методы исследования. В работе использованы методы математического и имитационного моделирования, теория автоматического управления, модельно-предиктивное управление (MPC), фильтрация состояния на основе фильтра Калмана, методы машинного обучения (LSTM), технология цифровых двойников, сравнительный и сценарный анализ. Исследования выполнены в среде MATLAB/Simulink на основе разработанной динамической модели насосной станции второго подъёма системы городского водоснабжения.

Система водоснабжения представлена как взаимосвязанный набор динамических компонентов, состоящий из:

- насосных агрегатов насосной станции второй ступени;
- резервуар для хранения чистой воды;
- резервуар для хлорирования;
- трубопроводная сеть с учетом гидравлических потерь;
- модель потребительского спроса**.**

Для повышения точности цифрового двойника и обеспечения устойчивой работы MPC-регулятора в условиях шумов измерений в структуру системы управления включён фильтр Калмана. Фильтр выполняет оценивание вектора состояния объекта на основе математической модели и данных датчиков, обеспечивая подавление измерительных шумов, компенсацию неопределённостей и синхронизацию цифрового двойника с реальным объектом. Использование фильтра Калмана позволяет повысить точность прогнозирования состояний системы и улучшить качество модельно-предиктивного управления в условиях изменяющейся гидравлической нагрузки.

Структурная схема данной модели, состоящая из стандартных блоков Simulink MatLab представлена на рисунке 1.

Получаем следующую логику взаимодействия блоков в единой системе

1. Фильтр Калмана непрерывно вычисляет x^(t) по измерениям и модели.
2. Блок обнаружения утечек анализирует x^(t) и/или сырые расходы, вычисляя ΔQ, формирует leak_flag и dQ.
3. Сигнализация реагирует на leak_flag, оповещая оператора и записывая событие.
4. LSTM принимает x^(t) и dQ и выдаёт прогноз $ypred$.

5. Регулятор (MPC,ПИД) использует *ypred* для упреждающей коррекции управляющих воздействий.

Таким образом, система приобретает свойства интеллектуального цифрового двойника, способного не только оценивать текущее состояние, но и предвидеть будущие проблемы, активно на них реагируя.

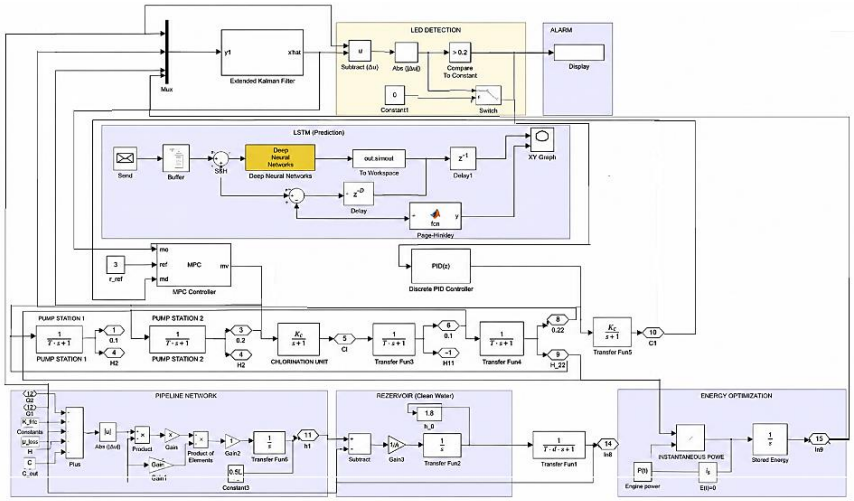


Рисунок 1 – Структурная схема системы водоснабжения

Цифровой двойник представляет собой математическую копию насосной станции.

На вход модели поступают:

$Q_{demand}(t)$ – текущее потребление воды,

f(t) – частота вращения насосов,

H(t) – измеренное давление.

На выходе вычисляются:

H^(t) – прогнозируемое давление,

Q^(t) – прогнозируемый расход,

P^(t) – ожидаемое энергопотребление.

Цифровой двойник позволяет прогнозировать поведение системы до фактического возникновения изменений режима.

Для прогнозирования будущего водопотребления используется LSTM-модель.

На её вход поступают:

- архив расхода воды из Excel файла;
- временные характеристики;
- сезонные факторы;
- статистика потребления.

На выходе формируется прогноз:

$Q_{forecast}(t+i)$ на горизонт прогнозирования.

Полученный прогноз является измеряемым возмущением для MPC-регулятора.

Центральным элементом интеллектуальной системы является MPC-регулятор.

Однако в предлагаемой архитектуре MPC не имеет прямого доступа к исполнительным механизмам.

На вход MPC поступают:

- текущее состояние системы;
- данные цифрового двойника;
- прогноз водопотребления;
- эксплуатационные ограничения.

На каждом шаге MPC решает задачу оптимизации

$$\min J = \sum_{k=1}^{N_p}(H(t+k) - H_{ref}(t+k))^2 + \lambda \sum_{k=0}^{N_c}(\Delta u(t+k))^2 \quad (1)$$

Где N_p горизонт прогноза,

N_c – горизонт управления

t – текущий момент времени, сек

H – уровень воды в резервуаре, м,

H_{ref}=2 м, эталонное значение уровня,

Δu – изменение частоты вращения насоса, об/сек,

λ – весовой коэффициент.

Весовой коэффициент λ, определяет влияние изменения управляющего воздействия на значение целевой функции MPC, выбирается на основании серии вычислительных экспериментов.

Для городской насосной станции с ЧРП и целью энергосбережения обычно выбирают λ=0,5-2 [10]. Анализ показал, что при λ=1 достигается наилучший компромисс между точностью поддержания давления и энергопотреблением насосных агрегатов. При меньших значениях наблюдались чрезмерно частые изменения частоты вращения насосов, тогда как увеличение λ свыше 2 приводило к заметному ухудшению качества регулирования давления. Поэтому во всех дальнейших исследованиях использовалось значение λ=1.

Функционал качества включает:

- отклонение уровня от заданного значения;
- энергопотребление насосов;
- плавность изменения управления.

Результатом решения является не управляющее воздействие на насосы, а рекомендуемая уставка рекомендации MPC регулирования частоты вращения насосов:

$$f_{set}^{MPC}$$

Информационный обмен в системе осуществляется следующим образом.

От объекта к цифровому двойнику

Передаются:

- давление;
- расход;
- состояние насосов;
- энергопотребление.

От цифрового двойника к MPC

Передаются:

- прогноз состояний;
- оценка гидравлического режима;
- ожидаемые ограничения.

От нейросети к MPC

Передаются:

$Q_{forecast}$ – прогноз будущего спроса.

От MPC к оператору

Передаются:

- рекомендуемые уставки;
- ожидаемое энергопотребление;
- прогноз давления;
- рекомендации по работе насосов.

От оператора к PLC

Передаются только подтверждённые уставки.

После подтверждения оператором новая уставка поступает в существующий ПИД-регулятор PLC.

Таким образом MPC функционирует как интеллектуальный советующий модуль.

Он анализирует состояние системы, прогнозирует развитие ситуации и предлагает оптимальные действия, но окончательное управление остаётся за существующей системой автоматизации.

Данное решение имеет принципиальное практическое значение.

Водозабор в городе Семей эксплуатируют: контроллеры Owen

Полная замена автоматизированной системы управления требует:

- остановки объекта;
- перепроектирования автоматики;

• повторной сертификации;
• значительных финансовых затрат.

Поэтому прямое внедрение MPC экономически нецелесообразно.

В предлагаемой работе интеллектуальный уровень располагается поверх существующей автоматизации и не требует изменения:

• PLC-программ;
• ПИД-контуров;
• схем электроснабжения;
• алгоритмов аварийной защиты.

Фактически модернизации подвергается только уровень поддержки принятия решений.

Ключевой особенностью разработанной системы является разделение функций прогнозирования и непосредственного управления.

MPC не управляет насосами напрямую.

Насосами по-прежнему управляет существующий PLC с традиционными ПИД-регуляторами.

MPC выполняет более высокий уровень интеллектуального управления:

• прогнозирует изменение спроса;
• рассчитывает оптимальный режим работы;
• оценивает энергопотребление;
• формирует рекомендации оператору.

Благодаря этому достигаются преимущества прогнозирующего управления – снижение энергопотребления, уменьшение числа переключений насосов и повышение стабильности давления – при полном сохранении существующей промышленной инфраструктуры и без вмешательства в критически важные контуры автоматизации. Именно это обстоятельство является главным практическим вкладом предлагаемой работы и обеспечивает её применимость для модернизации действующих систем водоснабжения.

Формирование сценариев испытаний

После разработки математической модели водозабора, цифрового двойника и алгоритма Advisory MPC необходимо оценить эффективность предложенной архитектуры в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации городской системы водоснабжения.

Водозаборы функционируют в условиях постоянно изменяющегося водопотребления, неравномерного гидравлического режима и возможных аварийных ситуаций. Поэтому для объективной оценки работоспособности разработанной системы был сформирован набор сценариев, охватывающих основные режимы эксплуатации станции второго подъёма.

Выбранные сценарии позволяют последовательно исследовать поведение системы управления при нормальных условиях работы, при существенных изменениях нагрузки и при возникновении нештатных ситуаций. Такой подход обеспечивает оценку не только качества регулирования давления, но и способности системы сохранять энергоэффективность и устойчивость при различных внешних воздействиях.

Сценарий 1 – Номинальный режим эксплуатации

Первый сценарий соответствует штатной работе станции при среднесуточном водопотреблении.

В данном режиме расход воды изменяется незначительно и находится в пределах проектных значений. Основная задача эксперимента заключается в проверке способности системы поддерживать требуемое давление при минимальном энергопотреблении насосного оборудования.

Номинальный режим является базовым сценарием, относительно которого впоследствии оценивается влияние более сложных эксплуатационных условий. Кроме того, именно в этом режиме определяется исходный уровень энергопотребления и качество регулирования, используемые в дальнейшем для сравнительного анализа. Изменение параметров представлено на рисунке 2.

Сценарий 2 – Пиковое потребление воды

Второй сценарий моделирует характерные для городских систем водоснабжения утренние и вечерние пики водоразбора (рис. 3).

Согласно эксплуатационным данным водоканалов, в отдельные периоды суток расход воды может превышать среднее значение на 40–60 %. Подобные изменения приводят к быстрому снижению давления в распределительной сети и требуют оперативной коррекции режима работы насосов.

Цель данного сценария заключается в оценке способности системы управления компенсировать резкие изменения потребительского спроса без нарушения требований по давлению и без избыточного увеличения энергопотребления.

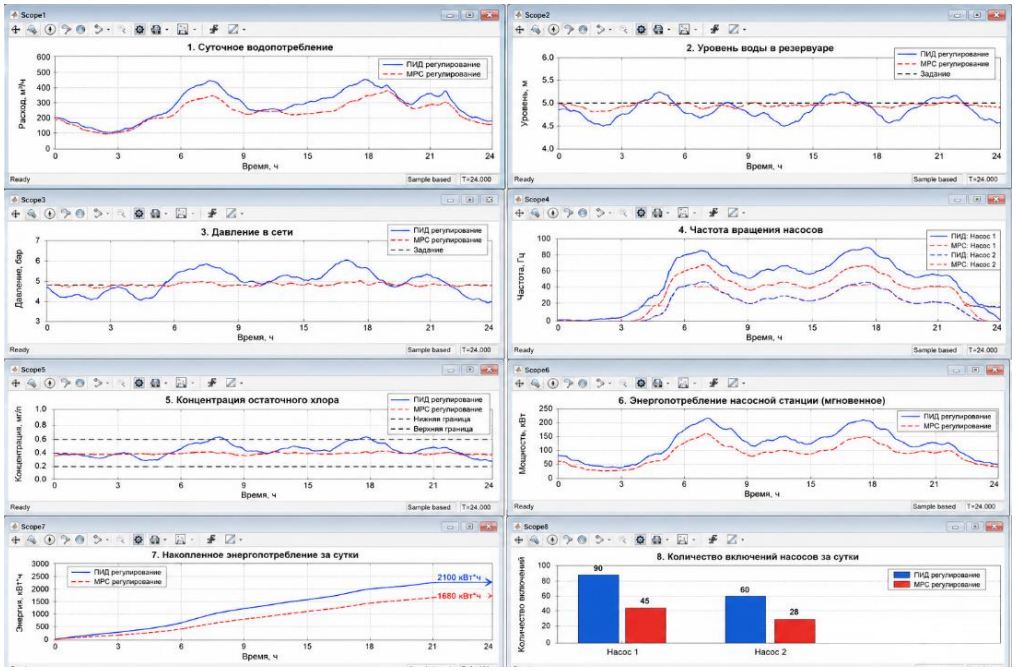


Рисунок 2 – Работа стации в номинальном режиме

Особый интерес представляет сравнение реактивного управления на основе ПИД-регулятора и прогнозирующего управления MPC, использующего информацию о будущем изменении нагрузки.

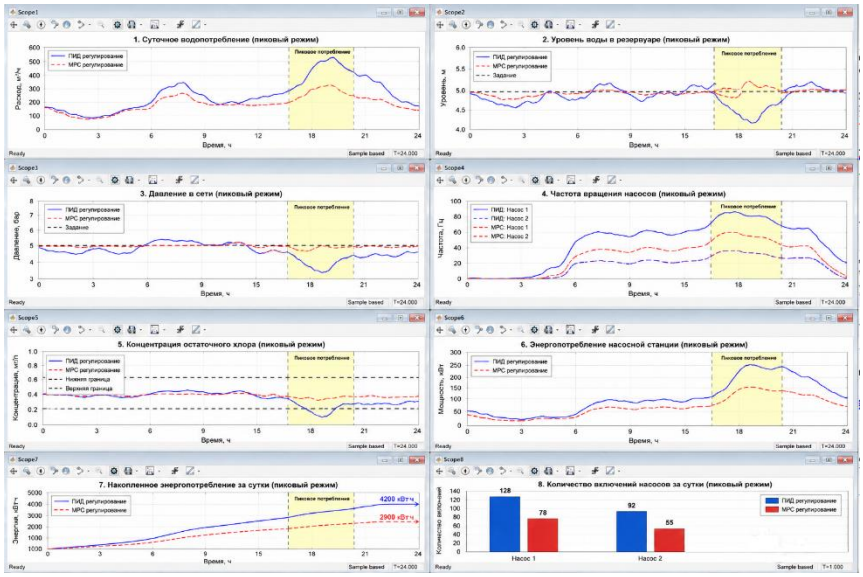


Рисунок 3 – Исследование работы интеллектуальной насосной станции второго подъёма в режиме пикового водопотребления

Сценарий 3 – Аварийная перегрузка

Третий сценарий предназначен для исследования устойчивости системы в условиях нештатных режимов эксплуатации (рис. 4).

В рамках моделирования рассматривается резкое увеличение потребления воды, сопровождающееся существенным отклонением гидравлических параметров от номинального режима. Подобные ситуации могут возникать при авариях на сетях, пожаротушении, технологических нарушениях или резком изменении схемы водоснабжения.

Аварийная перегрузка представляет собой наиболее сложный режим работы системы, поскольку одновременно требует поддержания допустимого давления, соблюдения ограничений насосного оборудования и предотвращения чрезмерного роста энергопотребления.

Результаты данного сценария позволяют оценить робастность предложенной архитектуры управления и определить её границы применимости в условиях значительных возмущений.

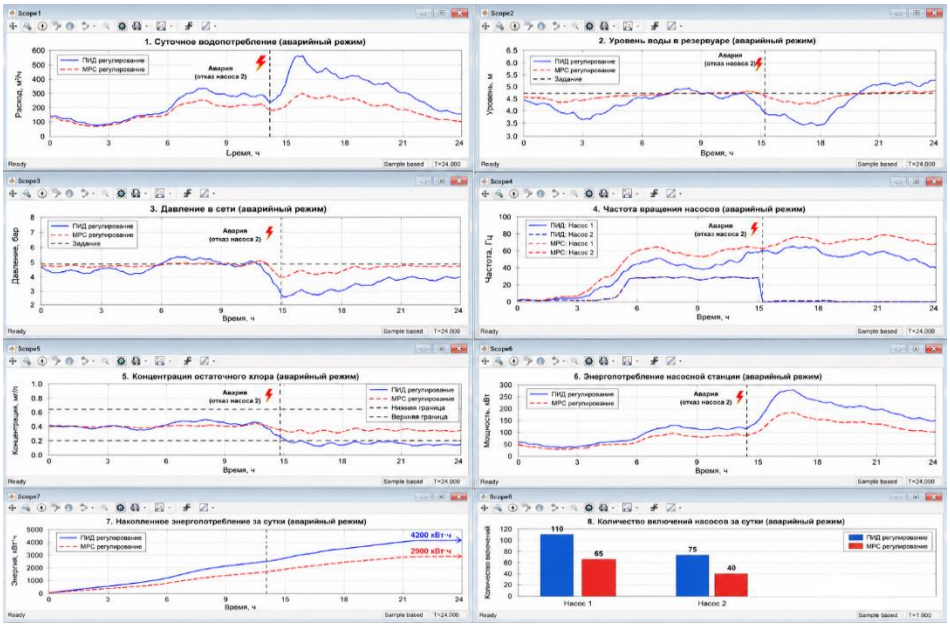


Рисунок 4 – Аварийный режим работы станции

Обсуждение результатов исследования.

Проведённые исследования интеллектуальной системы управления насосной станцией второго подъёма позволили оценить эффективность применения модельно-предиктивного управления (MPC) в различных режимах эксплуатации системы водоснабжения. Анализ результатов выполнен для трёх характерных сценариев функционирования: номинального суточного режима, режима пикового водопотребления и аварийного режима, связанного с отказом одного из насосных агрегатов.

Полученные результаты показывают, что эффективность системы управления существенно зависит от способности алгоритма учитывать будущие изменения нагрузки. В отличие от традиционного ПИД-регулятора, реагирующего только на уже возникшую ошибку регулирования, MPC использует математическую модель объекта и прогноз изменения водопотребления, что позволяет формировать управляющие воздействия заблаговременно.

В условиях нормального суточного режима оба алгоритма обеспечивают выполнение основных технологических требований. Однако даже в этом случае MPC демонстрирует более высокое качество регулирования. Колебания уровня воды в резервуаре уменьшаются в несколько раз, давление в сети поддерживается ближе к заданному значению, а частота вращения насосов изменяется более плавно. Это приводит к снижению количества коммутаций насосного оборудования и уменьшению механического износа агрегатов. Кроме того, за счёт оптимизации режимов работы насосов достигается снижение суточного энергопотребления примерно на 20 % по сравнению с традиционным управлением.

Наиболее заметные преимущества MPC проявляются в режиме пикового водопотребления. В данном сценарии нагрузка на насосную станцию возрастает на 50 %, что приводит к значительным возмущениям гидравлического режима. ПИД-регулятор реагирует

на увеличение расхода с запаздыванием, вследствие чего наблюдаются существенные отклонения уровня воды и давления в сети. В противоположность этому MPC использует прогноз водопотребления и заранее подготавливает систему к ожидаемому росту нагрузки. Это позволяет поддерживать давление практически на постоянном уровне, избегать глубокого опорожнения резервуара и существенно снизить максимальную потребляемую мощность насосов. Полученные результаты показывают, что использование прогнозирующего управления обеспечивает снижение энергозатрат примерно на 30 % даже при значительном росте водоразбора.

Особый интерес представляют результаты моделирования аварийного режима. Отказ одного из рабочих насосов является типичной нештатной ситуацией для систем водоснабжения и часто приводит к ухудшению качества предоставляемой услуги. Проведённое исследование показало, что традиционный ПИД-регулятор не способен эффективно компенсировать внезапное снижение производительности станции. После возникновения аварии наблюдаются значительные провалы давления, интенсивное опорожнение резервуара и резкое увеличение нагрузки на оставшееся оборудование. В случае применения MPC система сохраняет устойчивость благодаря быстрому перераспределению нагрузки между исправными насосами и использованию резервного объёма воды. Даже при частичной потере производительности насосной станции основные технологические параметры остаются в допустимых пределах.

Важным результатом исследования является обеспечение стабильности процесса обеззараживания воды. Во всех рассмотренных сценариях MPC поддерживает концентрацию остаточного хлора в нормативном диапазоне, тогда как при использовании ПИД-регулятора в режимах повышенной нагрузки и аварийных воздействий наблюдаются существенные отклонения от требуемых значений. Это свидетельствует о возможности применения единой прогнозирующей системы для комплексного управления как гидравлическими, так и технологическими параметрами водоснабжения.

Сравнение энергетических показателей во всех сценариях подтверждает высокую эффективность интеллектуального управления. Наибольшая экономия достигается в аварийных и пиковых режимах, когда традиционные методы управления вынуждены работать с большими запасами и значительными перегрузками оборудования. В среднем применение MPC обеспечивает снижение потребления электроэнергии на 20-30%, уменьшение числа переключений насосов на 40-60% и сокращение амплитуды отклонений основных технологических параметров в несколько раз.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что интеграция прогнозирования водопотребления, математической модели насосной станции и алгоритма модельно-предиктивного управления позволяет существенно повысить эффективность функционирования насосной станции второго подъёма. Предложенный подход обеспечивает не только снижение эксплуатационных затрат, но и повышение надёжности системы водоснабжения, устойчивости к аварийным воздействиям и качества предоставляемых услуг потребителям.

Вывод

Комплексный анализ трёх сценариев эксплуатации показал, что интеллектуальная система управления на основе MPC превосходит традиционное ПИД-регулирование по всем исследованным показателям. Наибольший эффект достигается в условиях неопределённости и сильных возмущений, когда способность прогнозировать будущие изменения нагрузки становится критически важной. Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения прогнозирующего управления на насосных станциях второго подъёма городских систем водоснабжения как одного из ключевых элементов цифровой трансформации коммунальной инфраструктуры.

Список литературы

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). – New York : United Nations, 2019. – 103 p.

2. Liemberger R. Quantifying the global non-revenue water problem / R. Liemberger, A. Wyatt // Water Supply. – 2019. – Vol. 19, № 3. – P. 831-837. https://doi.org/10.2166/ws.2018.129.

3. Fuertes-Miquel V.S. Hydraulic Transients in Water Distribution Systems / V.S. Fuertes-Miquel // Water. – 2022. – Vol. 14, № 22. – Art. 3612. https://doi.org/10.3390/w14223612.
4. Li Q. Digital Twins for Water Utilities: Architectures, Calibration Workflows and Measured Benefits / Q. Li // International Journal of Mechanical and Electrical Engineering. – 2025. – Vol. 6, № 3. – P. 34-42. https://doi.org/10.62051/ijmee.v6n3.05.
5. Chung G. Reliable water supply system design under uncertainty / G. Chung, K. Lansey, G. Bayraksan // Environmental Modelling & Software. – 2009. – Vol. 24, № 4. – P. 449-462. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.08.007.
6. Назарбаев Н.А. Стратегия «Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства: Послание Президента Республики Казахстан – Лидера Нации Н.А. Назарбаева народу Казахстана / Н.А. Назарбаев. – Астана, 14 декабря 2012 г.
7. Семей выходит на финишную прямую качественного водоснабжения в 2025 году [Электронный ресурс] // Yvision.kz. – 2025. – 24 сент. https://yvision.kz/post/semey-vyhodit-na-finishnuyu-pryamuyu-kachestvennogo-vodosnabzheniya-v-2025-godu-1017458 (дата обращения: 21.08.2026).
8. Лукин Н.А. Система управления скважинным водозабором «Смычка» г. Семей / Н.А. Лукин, А.П. Усачев, А.В. Гордейчик // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2018. – № 5(125). – С. 46-51.
9. Ima naliyev, T. Automation of water facilities in Kazakhstan and its solutions / T. Imanaliyev et al // Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores. – 2019. – Vol. 7, № 1. – Art. 140.
10. Cahill J. MPC Control of Level and Other Integrating Processes [Электронный ресурс] / J. Cahill // Emerson Automation Experts. – 2010. – 1 Dec. https://www.emersonautomationexperts.com/2010/services-consulting-training/mpc_control_of/ (дата обращения: 21.08.2026).

References

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). – New York : United Nations, 2019. – 103 p.
2. Liemberger R. Quantifying the global non-revenue water problem / R. Liemberger, A. Wyatt // Water Supply. – 2019. – Vol. 19, № 3. – P. 831-837. https://doi.org/10.2166/ws.2018.129.
3. Fuertes-Miquel V.S. Hydraulic Transients in Water Distribution Systems / V.S. Fuertes-Miquel // Water. – 2022. – Vol. 14, № 22. – Art. 3612. https://doi.org/10.3390/w14223612.
4. Li Q. Digital Twins for Water Utilities: Architectures, Calibration Workflows and Measured Benefits / Q. Li // International Journal of Mechanical and Electrical Engineering. – 2025. – Vol. 6, № 3. – P. 34-42. https://doi.org/10.62051/ijmee.v6n3.05.
5. Chung G. Reliable water supply system design under uncertainty / G. Chung, K. Lansey, G. Bayraksan // Environmental Modelling & Software. – 2009. – Vol. 24, № 4. – P. 449-462. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.08.007.
6. Nazarbaev N.A. Strategiya «Kazakhstan-2050»: novyi politicheskii kurs sostoyavshegosya gosudarstva: Poslanie Prezidenta Respubliki Kazakhstan – Lidera Natsii N.A. Nazarbaeva narodu Kazakhstana / N.A. Nazarbaev. – Astana, 14 dekabrya 2012 g.
7. Semei vykhodit na finishnuyu pryamuyu kachestvennogo vodosnabzheniya v 2025 godu [Ehlektronnyi resurs] // Yvision.kz. – 2025. – 24 sent. https://yvision.kz/post/semey-vyhodit-na-finishnuyu-pryamuyu-kachestvennogo-vodosnabzheniya-v-2025-godu-1017458 (data obrashcheniya: 21.08.2026).
8. Lukin N.A. Sistema upravleniya skvazhinnym vodozaborom «Smychka» g. Semei / N.A. Lukin, A.P. Usachev A.V. Gordeichik // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. – 2018. – № 5(125). – S. 46-51.
9. Ima naliyev, T. Automation of water facilities in Kazakhstan and its solutions / T. Imanaliyev et al // Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores. – 2019. – Vol. 7, № 1. – Art. 140.
10. Cahill J. MPC Control of Level and Other Integrating Processes [Ehlektronnyi resurs] / J. Cahill // Emerson Automation Experts. – 2010. – 1 Dec. https://www.emersonautomationexperts.com/2010/services-consulting-training/mpc_control_of/ (data obrashcheniya: 21.08.2026).

Б. Көпабаева, А. Золотов*, И. Қарымсақова, Д. Мясоедов, Р. Назаров
Шәкәрім университеті, 071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А
*e-mail: azol64@mail.ru

ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗ ЖӘНЕ ПРЕДИКТИВТІ БАСҚАРУ НЕГІЗІНДЕ ЕКІНШІ КӨТЕРІЛІМДЕГІ СОРҒЫ СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ЖҰМЫС РЕЖИМДЕРІН ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ БАСҚАРУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Мақалада қалалық сумен жабдықтау жүйелерінің ауыспалы су тұтынуы жағдайында екінші көтергіш сорғы станцияларының жұмыс режимдерін математикалық модельдеу және оңтайландыру мәселелері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі энергия тиімділігін арттыру, су шығынын азайту және біркелкі емес тұтынушылық сұраныс жағдайында гидравликалық параметрлердің тұрақтылығын қамтамасыз ету қажеттілігіне байланысты. Зерттеу нысаны ретінде Семей қаласының "садақ" су қабылдағышы таңдалды. Сумен жабдықтау жүйесінің динамикалық математикалық моделі жасалды, оған екінші көтеру сорғы станциясы, таза су және хлорлау цистерналары, құбыр желісі, суды тұтыну моделі және объектінің цифрлық егізі кіреді. Жүйенің күйін бағалаудың дәлдігін арттыру үшін Калман сүзгісі пайдаланылды және суды тұтынуды болжау lstm нейрондық желісі негізінде жүзеге асырылады. Қолданыстағы автоматтандыру тізбектеріне араласпай, қолданыстағы PLC/SCADA инфрақұрылымымен біріктірілген консультативтік модельдік-болжамды басқаруға (Advisory MPC) негізделген интеллектуалды басқару архитектурасы ұсынылған. Әзірленген тәсілдің тиімділігі үш пайдалану сценарийінде зерттелді: номиналды режим, суды тұтынудың ең жоғары режимі және апаттық шамадан тыс жүктеме. Модельдеу нәтижелері жүйенің тұрақтылығының жоғарылауын, қуат тұтынудың 20-30% төмендеуін, сорғылардың ауысу санының азаюын және қысымды ұстап тұру сапасының жақсарғанын көрсетті. Алынған нәтижелер қолданыстағы сумен жабдықтау жүйелерін жаңғырту үшін цифрлық егіздер мен болжамды басқаруды қолдану перспективасын растайды.

Түйін сөздер: *екінші көтеру сорғы станциясы; сумен жабдықтау; математикалық модельдеу; сандық егіз; модельдік болжамды басқару; MPC; Калман сүзгісі; LSTM; су тұтынуды болжау.*

B. Kopabayeva, A. Zolotov*, I. Karymsakova, D. Myasoedov, R. Nazarov
Shakarim University, 071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20A
*e-mail: azol64@mail.ru

INTELLIGENT CONTROL AND OPTIMIZATION OF SECOND-LIFT PUMPING STATION OPERATING MODES BASED ON A DIGITAL TWIN AND PREDICTIVE CONTROL

The article discusses the issues of mathematical modeling and optimization of the modes of operation of pumping stations of the second rise in conditions of variable water consumption of urban water supply systems. The relevance of the study is due to the need to increase energy efficiency, reduce water losses and ensure the stability of hydraulic parameters in conditions of uneven consumer demand. The Smychka water intake in Semey was chosen as the object of the study. A dynamic mathematical model of the water supply system has been developed, including a second-lift pumping station, clean water and chlorination tanks, a pipeline network, a water consumption model, and a digital twin of the facility. To improve the accuracy of the assessment of the system's condition, a Kalman filter was used, and water consumption forecasting was implemented based on the LSTM neural network. An intelligent control architecture based on advisory model-predictive control (Advisory MPC) is proposed, integrated with the existing PLC/SCADA infrastructure without interfering with existing automation circuits. The effectiveness of the developed approach has been investigated in three operational scenarios: nominal mode, peak water consumption mode and emergency overload. The simulation results showed an increase in the stability of the system, a reduction in energy consumption by 20-30%, a reduction in the number of pump switches and an improvement in the quality of pressure maintenance. The results obtained confirm the prospects of using digital twins and predictive management for the modernization of existing water supply systems.

Key words: *second-lift pumping station, water supply, mathematical modeling, digital twin, model-predictive control, MPC, Kalman filter, LSTM, energy efficiency, forecasting of water consumption.*

Сведения об авторах

Бахытгуль Кадырхановна Копабаева – докторант кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: kbahyt_73@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5387-507X.

Александр Дмитриевич Золотов* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Индира Бекеновна Карымсакова – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: indviki@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Дмитрий Викторович Мясоедов – старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей, Республика Казахстан; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Рашид Нагимович Назаров – преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные технологии», Шәкәрім университет, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Авторлар туралы мәліметтер

Бақытгүл Қадырханқызы Копабаева – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: kbahyt_73@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5387-507X.

Александр Дмитриевич Золотов* – техника ғылымдарының кандидаты, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Индира Бекенқызы Қарымсақова – PhD, «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: indviki@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Дмитрий Викторович Мясоедов – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының аға оқытушысы; Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан Республикасы; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Рашид Нағимұлы Назаров – «Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар» кафедрасының оқытушысы, Shakarim university, Семей. Қазақстан; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Information about the authors

Bakhytgul Kopabayeva – doctoral student at the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: kbahyt_73@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5387-507X.

Alexander Zolotov* – candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Indira Karymsakova – PhD, associate professor at the department of Automation and Information Technologies, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: indviki@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1496-3188.

Dmitry Myasoedov – Senior Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: dmitriy880@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3279-0994.

Nazarov Rashid – Lecturer at the Department of Automation and Information Technology, Shakarim University, Semey. Kazakhstan; e-mail: naz-2009@yandex.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9751-8161.

Поступила в редакцию 01.06.2026
Поступила после доработки 01.08.2026
Принята к публикации 18.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-13

МРНТИ: 59.14.31

CC BY 4.0
Check for updates

Е. Жантлесов[*], С. Алтынбек[2], В. Грузин[1], А.Тогусов[3], М. Шекеев[4]
[1]ТОО «R&D Центр» «Казахстан инжиниринг»,
Республика Казахстан, г. Астана, улица Ауэзова 2, н.п.1.
[2]ESIL University-Astana, Республика Казахстан, г. Астана, ул. А. Жубанова, 7
[3]Департамент военного образования и науки МО РК,
010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Достык, 14
[4]Школа № 220, Республика Казахстан, г. Алматы
[*]e-mail: Yerbolzh@mail.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ СИНХРОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Аннотация: *В статье представлена программно-аппаратная архитектура многоканального измерительного модуля, предназначенного для синхронной регистрации,*

©Е. Жантлесов, С. Алтынбек, В. Грузин, А.Тогусов, М. Шекеев, 2026