

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В УПРАВЛЕНИИ НАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ: ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВЫ

О. Х. Ишназаров, М. У. Рахматова

Представлено исследование современных подходов к управлению насосными станциями с использованием цифровых технологий. Рассмотрены применение систем интернета вещей, методы предиктивного обслуживания и мониторинга состояния оборудования, а также оптимизация процессов управления. Особое внимание уделено структурной схеме системы управления, включающей четыре насоса, из которых один оснащен частотным преобразователем, и системы управления на основе интернета вещей. Исследования подтверждают эффективность применения алгоритмов мультипопуляционной оптимизации для улучшения работы насосных агрегатов.

Ключевые слова: насосные станции, интернет вещей, предиктивное обслуживание, мониторинг состояния, оптимизация управления, частотные преобразователи, алгоритмы оптимизации.

Введение

Системы управления насосными станциями являются жизненно важным элементом современной инфраструктуры, обеспечивая эффективное и надежное функционирование ключевых систем, таких как водоснабжение, канализация и орошение. С учетом быстрого развития технологий и постоянно растущих потребностей общества их роль становится еще более значимой.

Современные тенденции в развитии систем управления насосными станциями направлены на интеграцию передовых технологий для повышения эффективности, устойчивости и гибкости. Эти системы становятся цифровыми, интеллектуальными и способными к адаптации к изменяющимся условиям в режиме реального времени.

Сегодня системы управления насосными станциями играют важную роль в обеспечении устойчивости городской и промышленной инфраструктуры. Развитие технологий в сфере датчиков, передачи данных и аналитики позволяет создавать интегрированные системы, способные оперативно реагировать на изменения в окружающей среде и спрос потребителей.

В этом контексте важно подчеркнуть роль группового управления насосными установками, что обеспечивает согласованное и эффективное управление несколькими насосами, снижает избыточные расходы энергии и повышает общую надежность системы. Гибридные системы, включая комбинирование традиционных и инновационных методов, дополняют этот подход, обеспечивая оптимальное сочетание стабильности и передовых технологий.

Системы управления насосными станциями также играют важную роль в сельском хозяйстве, особенно в системах орошения. Здесь гибкость и точность управления становятся особенно критичными, поскольку необходимо обеспечить эффективное распределение водных ресурсов в соответствии с потребностями растений.

Все эти аспекты современных систем управления насосными станциями выступают не только как средства обеспечения технической функциональности, но и как важные компоненты устойчивого и ответственного водопользования в условиях динамично меняющегося мира.

Целью данной статьи является обзор современных цифровых технологий, применяемых для повышения эффективности насосных станций, мониторинга состояния оборудования и оптимизации процессов обслуживания. Основное внимание уделяется использованию интернета вещей (Internet of Things – IoT), предиктивного обслуживания и семантических методов управления в данной сфере.

Энергоэффективность и устойчивость

В современном мире вопросы энергоэффективности, энергосбережения и устойчивого функционирования насосных станций становятся все более актуальными. Насосные станции играют ключевую роль во многих отраслях, включая сельское хозяйство, водоснабжение и промышленность, и эффективное управление их работой имеет прямое влияние на затраты ресурсов и экологическую устойчивость. Мы рассмотрим современные подходы и методы, направленные на оптимизацию работы насосных станций.

Проблема низкой энергоэффективности порных насосов для извлечения подземных вод в глубоких скважинах представлена в работе [1]. Авторы предлагают новые показатели энергопотребления, которые не только оценивают производительность насосных станций, но и определяют причины неэффективности в их проектировании и эксплуатации. Исследование показывает, что эти показатели помогают проводить предупредительное техническое обслуживание, улучшая энергосбережение. Применение новых методов позволяет сокращать затраты на энергию и увеличивать эф-

фактивность работы насосных скважин на различных этапах их жизненного цикла.

В исследовании [2] предложено использование микросети солнечных батарей для питания насосной станции. Размер микросети определяется мощностью, необходимой для работы насоса для смягчения дефицита водоснабжения. Для решения проблемы водоснабжения используется модель, основанная на давлении, а также определяется дефицит в подаче воды. Результаты показывают, что предлагаемая микросеть может обеспечивать работу насоса в течение 24 часов без использования электроэнергии.

Комплексная модель симуляции водных ресурсов для концепции связанных систем для моделирования водоснабжения, продовольствия и энергетики на уровне бассейна предложена в [3]. Модель учитывает сложные взаимосвязи между этими системами и имеет модульную структуру. Она способна как количественно, так и качественно моделировать различные аспекты, такие как испарение, речной сток, грунтовые воды и т. д. Проверка модели на данных из бассейна реки Суфи Чай в Иране показала хорошую производительность каждого модуля по критериям подгонки (коэффициента эффективности, среднеквадратичной ошибки между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями, коэффициента детерминации, d -фактора и p -фактора).

В исследовании, описанном в [4], предложена оптимальная стратегия управления водоснабжением в аридных и полуаридных регионах. Разработанная модель позволяет оптимизировать использование различных источников воды, учитывая множество факторов, таких как сезонная доступность воды, изменчивость осадков и стоимость энергии. Проведенное исследование на реальном примере показало, что использование данной стратегии приводит к снижению затрат на водоснабжение на 3% и улучшает управление подземными водами, что способствует повышению водной и энергетической безопасности в городских регионах.

В [5] разработан оптимальный контроллер для сетевой фотоэлектрической системы, используемой для орошения в сельском хозяйстве. Целью было минимизировать затраты на электроэнергию с использованием фотоэлектрической энергии и уменьшить зависимость от сетевой энергии. Симуляции показали, что использование оптимального контроллера приводит к снижению затрат на энергию на 44,4%, улучшению использования фотоэлектрической энергии на 24% и увеличению объема поданной воды на 3,6%.

В [6] предложена стратегия планирования поставки воды для орошения с учетом производства энергии солнечными фотоэлектрическими модулями. Разработанный алгоритм оптимизации позволяет согласовать энергопотребление насосов с производством солнечной энергии и минимизировать размер установки. Применение данного подхода улучшает эффективность управления орошением и позволяет экономить энергию при использовании фотоэлектрических панелей. Предложенный метод может быть полезен для принятия решений и управления орошением в сельском хозяйстве, а также для превращения существующих систем орошения в автономные системы, работающие на солнечной энергии.

Влияние режима запуска на устойчивость смешанных насосов исследуется в [7]. Эксперименты показали, что во время запуска насоса внешние характеристики меняются схожим образом с изменением скорости вращения импеллера. Обнаружена положительная корреляция между ускорением импеллера и скоростью изменения внешних параметров насоса. Увеличение времени запуска насоса увеличивает риск вибрации вала насоса, вызванной колебаниями давления на направляющем аппарате.

Авторами исследуется качественный и количественный сравнительный анализ девяти разработанных метаэвристических алгоритмов для оптимизации проблемы переключения насосов водяной сети [8]. Рассматриваются следующие алгоритмы: алгоритм поиска теплопереноса, оптимизация водяной волной, оптимизатор муравьиного льва, алгоритм поиска симбиотических организмов, алгоритм искусственного роя пчел, алгоритм поиска кукушки, поиск проходящего транспорта, оптимизация на основе биогеографии и синусно-косинусный алгоритм. Проводится анализ результатов для выявления статистически значимых различий между результатами сравниваемых алгоритмов. Также исследуется влияние различных техник управления ограничениями на производительность алгоритмов. Для лучшего алгоритма получены наборы альтернативных решений для минимального энергопотребления. Также представлены решения для разного количества насосов в работе для лучшего алгоритма, обсуждаются результаты сходимости рассматриваемых алгоритмов к достижению минимальных энергетических решений.

В [9] представлено введение в алгоритм оптимизации на основе биогеографической оптимизации (БГО) и его применение к проблеме комбинаторного переключения насосов воды. Исследована эффективность БГО по сравнению с другими мето-

дами оптимизации, такими как генетический алгоритм (ГА), метод ветвей и границ, алгоритм гармонии поиска, оптимизация роя частиц (ОРЧ) и алгоритм оптимизации муравьиной колонии (АОМК). Были представлены альтернативные оптимальные решения для демонстрации многоэкстремальности проблемы и способности БГО находить альтернативные оптимальные решения.

Метод динамического планирования насосных станций на основе цифрового двойника (ЦД) для оптимизации энергопотребления в системах водоснабжения городов разработан в [10]. Технология цифрового двойника используется для прогнозирования состояния доступности насосного агрегата заранее, своевременного запуска процесса перепланирования и реализации мероприятий по энергосбережению и сокращению потребления энергии с целью обеспечения технической и методологической поддержки для автономных насосных станций. Результаты экспериментов показали, что с использованием предложенного метода на основе ЦД можно достичь средней экономии энергии в размере 9,78%, при условии обеспечения динамического баланса воды на всех этапах.

Авторы предлагают процедуру оценки энергоэффективности насосного оборудования, работающего под нагрузкой переменной интенсивности и питаемого электричеством, а также процедуру, разработанную в соответствии с рекомендациями Европейской ассоциации производителей насосов на основе индекса энергоэффективности [11]. В статье представлены результаты анализа значений энергоэффективности, рассчитанные по различным методам, а также врожденные недостатки математической модели, используемой для определения индекса энергоэффективности.

В [12] исследуется энергоэффективность коллективных систем орошения, которые уже десятилетия функционируют, сталкиваясь с высокой деградацией существующей инфраструктуры и серьезными проблемами эффективности использования воды и энергии. Предлагается подход на основе балансов воды и энергии и показателей производительности для оценки влияния потерь воды, схемы и режима работы сети, восстановления энергии и оборудования на энергоэффективность. Предложена новая методология для расчета энергетического баланса для открытых каналов, под давлением и комбинированных систем.

Предложена методология количественной оценки энергетических выгод, получаемых от различных стратегий эксплуатации [13]. Получен новый набор показателей производительности, позволяющих раз-

личать многочисленные эффекты на энергопотребление каждого отдельного вмешательства в работу сети. Новая методология применяется к двум различным случаям: стратегии снижения давления в водном районе и стратегии переменного насосного режима в водоснабжении сети. Представленные два эмпирических анализа продемонстрировали применимость предложенной методологии. Новые показатели эффективности оказались достоверным критерием для выбора наилучшего технического решения.

Оптимизация систем водоснабжения с целью минимизации затрат на транспортировку воды и повышения ее надежности представлена в [14]. Разработана аналитическая методика определения оптимальных диаметров трубопроводов и скорости насоса в сети водоразбора. Предложенный подход позволяет сэкономить до 12,3% общих затрат за счет использования оптимальных параметров. Аналитическое решение для оптимальной скорости насоса подтверждено его надежностью и соответствием результатам, полученным с использованием графического метода.

В работе [15] исследуется гидравлическое проектирование и эксплуатация насосов переменной скорости как стратегии экономии воды и энергии в прессованных системах орошения. Анализируются характеристические кривые насосов, оцениваются расход и давление, необходимые системе в течение сезона орошения. Переменные насосы могут быть настроены под требования системы, что делает их более эффективными по сравнению с постоянными насосами и снижает потребление воды и энергии. Исследуется применимость переменных насосов для экономии воды и энергии в саду площадью 100 гектаров в провинции Исфahan, центральный Иран. Результаты показывают, что использование технологии переменной скорости позволяет повысить эффективность и снизить ненужное давление, а также добиться оптимального использования воды. При условии работы под различными нагрузками можно достичь существенного снижения потребления энергии на уровне 44 – 54 %, что является значимым в национальном масштабе.

В исследовании [16] разработана операционная процедура для умного орошения и оптимизации использования воды в сельском хозяйстве. Применение стратегии мониторинга и прогнозирования умного орошения на основе порогов влажности почвы и стресса культур привело к увеличению эффективности использования воды и ее продуктивности. Использование переменных насосов, реализованных с использованием энергетическо-водного баланса,

значительно сократило объем орошения и увеличило эффективность использования воды до 80% в некоторых случаях.

Таким образом, в рассмотренных исследованиях основное внимание уделяется повышению энергоэффективности, энергосбережению и обеспечению устойчивого функционирования насосных станций. Исследования показывают, что оптимизация операционных стратегий и использование передовых методов позволяют существенно снизить энергопотребление и улучшить работу насосных систем.

Применение методов мониторинга и моделирования позволяет оптимизировать использование ресурсов, управлять расходом энергии и воды, а также повышать производительность насосных станций. Это включает разработку оптимальных стратегий, основанных на данных о влажности почвы и состоянии культурных растений.

В результате применения этих подходов наблюдается значительное улучшение эффективности использования энергии и воды в системах орошения и водоснабжения, что способствует экономии ресурсов и снижению эксплуатационных затрат.

Интеграция цифровых технологий

Современные системы управления насосными станциями все более ориентированы на цифровые технологии. Использование цифровых платформ и облачных сервисов позволяет осуществлять удаленный мониторинг, анализ данных и дистанционное управление. Это обеспечивает операторам быстрый отклик на изменяющиеся условия и предупреждение о потенциальных сбоях.

Подход к оценке надежности решений восстановления после сбоев для инфраструктур IoT с использованием сетей Петри представлен в [17]. Учитывая распространение IoT-приложений и их критичность для ключевых задач, таких как управление насосной станцией, авторы предлагают методы обеспечения отказоустойчивости в системах IoT. Предложенный методологический инструментариум направлен на обеспечение надежности и эффективности IoT-инфраструктур при внезапных сбоях.

Концепция преодоления проблемы кризиса воды через использование IoT и погружных насосов для управления уровнем подземных вод в скважинах разработана в [18]. Система использует датчики для обнаружения уровня воды и автоматического управления насосами. Пользователь получает предупреждения на мобильный телефон и может управлять насосом через мобильное приложение, что снижает необходимость в человеческом вмешательстве и обеспечивает надежную работу системы.

В [19] представлена недорогая система промышленного IoT для мониторинга состояния электродви-

гателей в реальном времени. Система обнаруживает аномалии и используется для создания моделей предиктивного обслуживания. Она основана на доступных компонентах, программном обеспечении с открытым исходным кодом и облачных сервисах. Модуль собирает данные о вибрации электродвигателей в реальном времени, а анализ проводится как на модулях, так и на шлюзах. Прототип системы успешно протестирован в лаборатории и на промышленном заводе, демонстрируя способность непрерывного мониторинга вращающегося оборудования с высокой точностью при существенно более низкой стоимости.

Новый тип интеллектуального сервера для умного выращивания культур в помещении с использованием IoT является наиболее эффективным. Система обеспечивает визуальную информацию о состоянии культур и управление датчиками на основе IoT, включая обработку данных, контроль обмена данными и хранение на умном сервере [20]. Умное приложение позволяет пользователю получать информацию и управлять выращивателем в реальном времени, а алгоритм позволяет адаптировать систему под новые датчики. Эксперименты подтвердили превосходство системы в производительности и ее потенциал для укрепления возможностей сельскохозяйственных технологий.

Исследуется модель автоматизированной системы полива, основанная на нечеткой логике, технологии IoT и глубоком обучении. В статье [21] представлена система, интегрирующая датчики влажности почвы, камеру для изображений растений и модель для прогноза погоды, обеспечивая простой интерфейс для различных условий выращивания. Глубокое обучение применяется для классификации изображений растений, а алгоритм нечеткой логики регулирует время работы системы полива, учитывая все параметры. Цель системы – снижение водопотребления и упрощение процесса выращивания культур в условиях переменного климата.

Применение технологии предиктивного обслуживания на насосных станциях с использованием глубокого обучения и искусственного интеллекта для обнаружения аномалий представлено в [22]. Предложенный подход основан на моделировании информации сенсоров и технологии IoT, использующих нечеткую логику и глубокое обучение для оптимизации стратегии обслуживания и обнаружения неисправностей, что позволяет создать более эффективную стратегию обслуживания для промышленного оборудования.

В рассмотренных исследованиях по насосным станциям сделан акцент на применении современных цифровых технологий для повышения эффективности, мониторинга состояния оборудования и оптими-

зации процессов обслуживания. Исследования затрагивают использование IoT для создания систем мониторинга и анализа событий на насосных станциях, представляют решения для эффективной диагностики и прогнозирования состояния оборудования. Авторы также выделяют роль предиктивного обслуживания, в том числе с применением глубокого обучения для анализа данных, что имеет применение в определении возможных сбоев и оптимизации процессов обслуживания.

Также изучаются вопросы применения беспроводных технологий в системе мониторинга состояния промышленного оборудования, включая насосные станции, что позволяет проводить удаленный мониторинг и управление, улучшая оперативность реагирования на изменения в работе оборудования. Предложено использование семантических технологий для оптимизации системы управления инфраструктурой IoT в насосных станциях, включая стандартизацию описания устройств и возможностей для более эффективной интеграции и управления.

Обзор литературы подчеркивает, что цифровые технологии в насосных станциях обеспечивают мониторинг в реальном времени, предиктивное обслуживание, беспроводное управление и оптимизацию систем управления, что в совокупности способствует повышению эффективности и снижению затрат на обслуживание.

Управление насосными установками

В современном контексте энергетической эффективности и оптимизации ресурсов особое внимание уделяется эффективному управлению насосными станциями. Групповое управление насосными агрегатами представляет собой ключевой аспект в обеспечении стабильной работы систем водоснабжения, водоотведения и других технологических процессов. В данном разделе рассматривается применение различных методов и алгоритмов для оптимизации управления насосами в условиях повышенной энергоэффективности и экономии ресурсов. Анализ литературы в этой области позволяет выявить перспективные подходы и методы, способствующие снижению энергопотребления, улучшению производительности и обеспечению устойчивого функционирования насосных систем.

Метод многоточечного интегрированного управления в реальном времени на основе дискретных динамических изменений уровня воды обсуждается в работе [23]. Этот метод может быть реализован только с использованием системы программируемого логического контроллера, обходя сложные математические модели. Была разработана дискретизированная модель управления уровнем воды для осу-

ществления управления в реальном времени на основе автоматизации данных. Она объединяет насосные станции верхнего течения и насосные системы вливания нижнего течения на очистных сооружениях сточных вод.

Оптимизация графиков работы насосов является ключевым аспектом эффективного управления насосными станциями для питьевого водоснабжения. Для решения этой проблемы были применены различные методы, начиная от простых точных методов до более современных метаэвристических методов. В [24] предлагается модель оптимизации – гибридный генетический модифицированный алгоритм (ГГМА), который позволяет проводить многокритериальную оптимизацию графиков работы насосов с учетом потребления энергии и затрат на эксплуатацию. Модель обеспечивает оптимизацию при соблюдении ограничений, поддерживающих граничные условия распределительного бака. Принцип модели ГГМА основан на методике генетической модификации, используемой в организмах. Сравнение производительности модели ГГМА с производительностью моделей ГА, АОМК и ОРЧ показывает ее превосходство и эффективность на всех уровнях.

Исследуется переходный процесс и гидравлический удар в трубопроводах вследствие быстрых изменений в работе группы параллельных насосов [25]. Применяется метод конечных разностей второго порядка временного шага на основе метода Маккормака для дискретизации и решения управляющих уравнений. Рассматриваются два других примера, использующих предложенную модель, для исследования гидравлического удара, вызванного различными сценариями изменения работы параллельных насосов. Результаты показывают, что переходные характеристики системы полностью зависят от времени отключения и запуска группы насосов.

Представлены два адаптивных и один улучшенный алгоритм оптимизации для планирования работы насосной станции [26]. Основная цель заключается в достижении оптимального операционного планирования каждой группы насосов с минимальными потерями энергии. Для этого использовались традиционные многоцелевые алгоритмы оптимизации, такие как ГА, АОМК, ОРЧ, адаптированные и улучшенные для соответствия сложным характеристикам системы. Проведено сравнение и анализ эффективности каждого метода, используемого в исследовании, с учетом полученных результатов. Метод ГА продемонстрировал высшие показатели и был выбран в качестве оптимального решения для данной проблемы.

Метод адаптивного управления без модели на основе нечеткой нейронной сети с интуиционистскими

правилами для нелинейных систем с импульсным выходом представлен в [27]. Основные научные результаты включают разработку интуиционистской нечеткой нейронной сети в качестве оценщика для переменной с временем псевдочастной производной, интеграцию импульсных методов вывода для экономии ресурсов, установление условий сходимости адаптивного закона управления и практическую проверку метода.

Применение нейросетевого регулирования в автоматизированной системе управления насосной станцией исследуется в [28]. Разработана и описана процедура настройки системы управления с использованием нейросетевого регулятора. Анализ показателей качества подтверждает, что система с нейросетевым регулятором обеспечивает требуемый уровень устойчивости и соответствует требованиям к управлению насосной станцией. Представлен метод мягкого переключения асинхронного электропривода между частотным преобразователем, параллельно работающими двигателями и сетью электропитания. Разработан алгоритм автоматического переключения и представлена схема управления для его реализации. Проведен анализ методов переключения нагрузки и оценки их применимости. Предложенный метод подтвержден с помощью симуляций, продемонстрированы его эффективность и работоспособность.

Различные методы управления насосными агрегатами с целью снижения энергопотребления исследуются в статье [29]. Проведен анализ эффективности каждого метода и выбран наиболее эффективный, с точки зрения экономии электроэнергии. Для иллюстрации проведенных расчетов приведены графики зависимости потребляемой мощности от времени для насосной станции с тремя насосными агрегатами при использовании различных методов управления.

В исследовании [30] предложены новые методы оценки переменных состояния и параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов. Разработаны алгоритмы динамической идентификации параметров, обеспечивающие повышенную степень обусловленности и асимптотическую устойчивость оценок. Для этого были использованы методы наименьших квадратов и генетические алгоритмы. Также предложены способы оценки переменных состояния с применением нейронных сетей и наблюдателей, что позволяет создавать устойчивые системы управления. Экспериментально подтверждена эффективность предложенных методов и алгоритмов, что делает их применимыми для по-

вышения эффективности и надежности работы электроприводов.

Обзор литературы по групповому управлению насосными агрегатами показывает, что применение алгоритмов мультипопуляционной оптимизации, таких как ГА, ГГМА, АОМК, ОРЧ в сочетании с методами адаптивного управления может значительно повысить эффективность работы насосных станций.

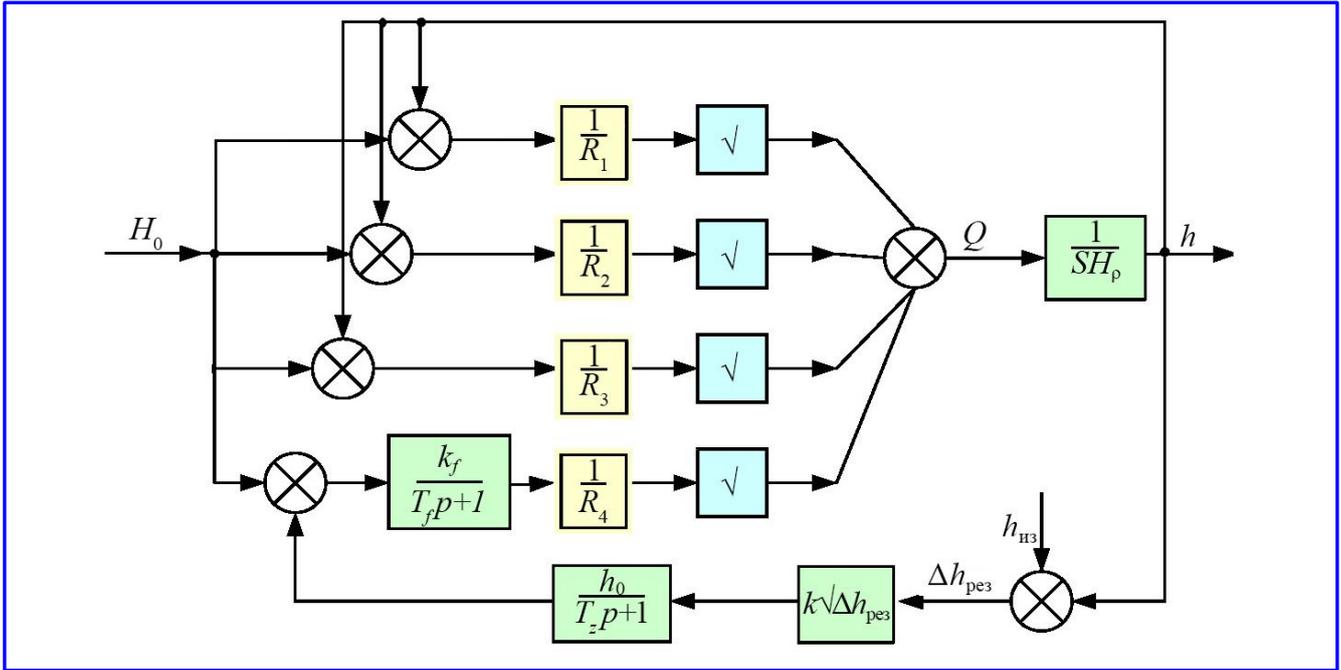
Применение методов группового управления ГА, АОМК, ОРЧ позволяет оптимизировать работу нескольких насосных агрегатов одновременно, учитывая различные факторы, такие как изменения потребления воды или изменения давления в системе. Это позволяет более эффективно использовать энергию и ресурсы, минимизируя излишнюю эксплуатацию насосов и оптимизируя их нагрузку.

Исследования показывают, что применение алгоритмов мультипопуляционной оптимизации ГА, АОМК, ОРЧ в групповом управлении насосными агрегатами способствует снижению издержек на обслуживание и ремонт оборудования за счет более рационального использования ресурсов и снижения износа оборудования. Кроме того, позволяет снизить энергопотребление за счет оптимальной настройки работы насосов и предотвращения излишнего потребления энергии.

Таким образом, применение алгоритмов мультипопуляционной оптимизации в групповом управлении насосными агрегатами представляет собой эффективный подход к управлению насосными станциями, который способствует повышению их энергоэффективности, снижению эксплуатационных затрат и обеспечивает устойчивое функционирование систем водоснабжения и водоотведения.

Структура управления группой насосных агрегатов

В условиях ограниченности ресурсов и растущих потребностей энергоэффективное и надежное управление насосными станциями является необходимостью. Использование алгоритмов оптимизации и цифровых технологий позволяет создать более эффективные и адаптивные системы управления, что приводит к снижению эксплуатационных издержек, оптимизации расхода энергии и ресурсов, а также обеспечивает непрерывность работы систем водоснабжения и водоотведения. Таким образом, раздел, описывающий структуру и алгоритм управления группой насосных агрегатов, остается актуальным и востребованным в современной инженерной практике.



Структурная схема управления многодвигательной насосной станцией

На рисунке приведена структурная схема управления многодвигательной насосной станцией, где H_0 – заданный уровень воды в резервуаре; R_1, R_2, R_3, R_4 – коэффициенты передачи для соответствующих насосов (могут быть настроены для каждого насоса индивидуально); $\sqrt{}$ – квадратные корни; Q – выходной поток воды; $\frac{1}{SH_p}$ – интегрирующий элемент; S – площадь поверхности резервуара; H_p – передаточная функция (коэффициент, связанный с преобразованием потока в уровень); h – текущий уровень воды в резервуаре; $h_{из}$ – избыточный (максимальная верхняя отметка) уровень воды в резервуаре; $\Delta h_{рез}$ – значение ошибки относительно текущего уровня воды в резервуаре; $k\sqrt{h_{рез}}$ – блок компенсации нелинейностей и стабилизации работы насосной станции; k – коэффициент усиления; $\frac{h_0}{T_z p + 1}$ – передаточная функция динамики резервуара; h_0 – начальный уровень воды в резервуаре; T_z – время задержки, влияющее на динамическую реакцию системы на изменения; p – оператор Лапласа; $\frac{k_f}{T_f p + 1}$ – блок передаточной функции частотного преобразователя; k_f – коэффициент усиления; T_f – время срабатывания (или постоянная времени) частотно-регулируемого электропривода.

Представленная структурная схема системы управления насосной станцией включает в себя четыре насоса, один из которых оснащен частотным преобразователем для регулировки скорости вращения. Установленный частотный преобразователь позволяет эффективно управлять расходом воды, что способствует оптимизации работы насосной станции. Каждый насос оборудован собственным электрическим двигателем для обеспечения непрерывной работы системы. Длина трубопровода составляет 2 км и служит для транспортировки воды от насосов к резервуару. Резервуар представляет собой емкость для накопления воды перед ее использованием. Система управления, основанная на технологии, обеспечивает удаленный мониторинг и управление работой насосной станции через сеть «Интернет». Это позволяет оперативно реагировать на изменения в работе оборудования и оптимизировать процессы управления для повышения эффективности и снижения затрат на обслуживание.

Исследования также подтверждают, что применение алгоритмов мультипопуляционной оптимизации в групповом управлении насосными агрегатами, таких как ГА, ГГМА, АОМК, ОРЧ, способствует более эффективному распределению нагрузки между агрегатами и оптимизации их работы в реальном времени. Это позволяет минимизировать потребление энергии и ресурсов, снижая издержки на обслуживание и обеспечивая

более устойчивое и надежное функционирование систем водоснабжения и водоотведения. Таким образом, применение интегрированных подходов, включающих в себя современные цифровые технологии, методы мониторинга и моделирования, а также алгоритмы оптимизации в групповом управлении насосными агрегатами, представляет собой перспективный путь к достижению более эффективного и устойчивого функционирования насосных станций.

Заключение

Проведенный обзор показал, что современные цифровые технологии, такие как IoT и беспроводные системы мониторинга, существенно повышают энергоэффективность и снижают эксплуатационные затраты насосных станций. В частности, применение IoT для мониторинга и анализа событий на насосных станциях позволяет осуществлять предиктивное обслуживание, что подтверждается исследованиями, использующими глубокое обучение для анализа данных сенсоров. Это позволяет заблаговременно выявлять возможные сбои и оптимизировать процессы обслуживания.

Исследования также подтверждают, что алгоритмы мультипопуляционной оптимизации, такие как ГА, ГГМА, АОМК, ОРЧ, улучшают распределение нагрузки между насосными агрегатами и оптимизируют их работу в реальном времени. Это приводит к снижению потребления энергии и ресурсов, уменьшению издержек на обслуживание и обеспечению более устойчивого функционирования систем водоснабжения и водоотведения.

Кроме того, применение семантических технологий для оптимизации системы управления инфраструктурой IoT способствует стандартизации описания устройств и возможностей для более эффективной интеграции и управления.

Таким образом, системы управления насосными станциями становятся более интеллектуальными и гибкими благодаря постоянному внедрению новых технологий. Дальнейшее развитие насосных станций будет опираться на внедрение передовых технологий, таких как IoT и методы оптимизации, с целью повышения их эффективности, снижения эксплуатационных расходов и увеличения устойчивости. Одновременно будет уделено внимание внедрению группового управления, что является ключевым аспектом обеспечения надежного функционирования современных инфраструктур.

Литература

1. New Indicators to Discriminate the Cause of Low Energy Efficiency in Deep-Well Pumps / M. Mora, H. Puerto,

C. Rocamora [et al.]. – DOI : 10.1007/s11269-021-02792-9 // *Water Resour Manage.* – 2021. – Vol. 35. – P. 1373–1388.

2. Mosesthe, T. C. Mitigating water supply deficit through micro-grid powered pumping station / T. C. Mosesthe. – DOI : 10.1007/s40095-021-00447-4 // *International Journal of Energy and Environmental Engineering.* – 2022. – Vol. 13. – P. 449–455.

3. Development of a Comprehensive Water Simulation Model for Water, Food, and Energy Nexus Analysis in Basin Scale / E. Soleimani, A. Afshar, A. Molajou [et al.]. – DOI : 10.1007/s11269-023-03558-1 // *Water Resour Manage.* – 2023. – Vol. 37. – P. 4589–4621.

4. Optimisation Approach Toward Water Management and Energy Security in Arid/Semiarid Regions / D. M. Bajany, L. Zhang, Y. Xu [et al.]. – DOI : 10.1007/s40710-021-00537-9 // *Environ. Process.* – 2021. – Vol. 8. – P. 1455–1480.

5. Mahinda, M. W. Optimal control of a grid-connected photovoltaic agricultural water pumping system / M. W. Mahinda, E. M. Wanjiru, J. G. Njiri. – DOI : 10.1186/s44147-023-00256-y // *Journal of Engineering and Applied Science.* – 2023. – Vol. 70.

6. An irrigation scheduling algorithm for sustainable energy consumption in pressurised irrigation networks supplied by photovoltaic modules / F. J. Navarro-González, M. Pardo, H. E. Chabour [et al.]. – DOI : 10.1007/s10098-023-02486-3 // *Clean Techn Environ Policy.* – 2023. – Vol. 25. – P. 2009–2024.

7. Influence of pump start-up mode on the stability of mixed-flow pumps / Z. Tang, G. Zhu, J. Feng [et al.]. – DOI : 10.1007/s12206-023-0521-7 // *Journal of Mechanical Science and Technology.* – 2023. – Vol. 37. – P. 2949–2958.

8. Patel, V. K. Comparative Performance of Recent Advanced Optimization Algorithms for Minimum Energy Requirement Solutions in Water Pump Switching Network / V. K. Patel, B. D. Raja. – DOI : 10.1007/s11831-020-09429-x // *Archives of Computational Methods in Engineering.* – 2021. – Vol. 28. – P. 1545–1559.

9. Savsani, V. Biogeography Based Optimization for Water Pump Switching Problem / V. Savsani, V. Patel, M. Tawhid. – DOI : 10.1007/978-3-030-26458-1_11 // *Nature-Inspired Methods for Metaheuristics Optimization: Modeling and Optimization in Science and Technologies.* – 2020. – Vol. 16. – P. 183–202.

10. Digital Twin-Based Pump Station Dynamic Scheduling for Energy-Saving Optimization in Water Supply System / S.-W. Zhou, S.-S. Guo, W.-X. Xu [et al.]. – DOI : 10.1007/s11269-024-03791-2 // *Water Resources Management.* – 2024. – Vol. 38(8). – P. 1–17.

11. Nikolaev, V. G. Improvement of the Procedures for Assessing the Energy Efficiency of Pumping Systems / V. G. Nikolaev, G. V. Nikolaev. – DOI : 10.1007/s10749-023-01516-w // *Power Technology and Engineering.* – 2022. – Vol. 56. – P. 335–344.

12. Energy efficiency assessment in collective irrigation systems using water and energy balances: methodology and application / D. Loureiro, P. Beceiro, E. Fernandes [et al.]. – DOI : 10.1007/s00271-023-00891-6 // *Irrigation Science.* – 2023. – Vol. 42(4). – P. 1–24.

13. Detailed Audit of the Energy Efficiency in Water Systems: New Performance Indices / M. C. Morani, A. Carravetta,

- O. Fecarotta [et al.]. – DOI : 10.1007/s11269-023-03718-3 // Water Resources Management. – 2024. – Vol. 38. – P. 1241–1260.
14. ElZahar, M. M. H. Optimization of Water Pipe Network and Formulation of Pumping Rate / M. M. H. ElZahar, M. M. M. Amin. – DOI : 10.1007/s12205-023-0872-8 // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2023. – Vol. 27. – P. 2882–2890.
15. Azari, M. D. Hydraulic design and operation of variable-speed pumps as the water-energy saving strategies in pressurized irrigation systems / M. D. Azari, A. P. Rizzi, A. Ashrafzadeh. – DOI : 10.1007/s10098-021-02043-w // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2021. – Vol. 23. – P. 1493–1508.
16. Corbari, C. Irrigation efficiency optimization at multiple stakeholders' levels based on remote sensing data and energy water balance modelling / C. Corbari, M. Mancini. – DOI : 10.1007/s00271-022-00780-4 // Irrigation Science. – 2023. – Vol. 41. – P. 121–139.
17. Andrade, E. Dependability evaluation of a disaster recovery solution for IoT infrastructures / E. Andrade, B. Nogueira. – DOI : 10.1007/s11227-018-2290-0 // The Journal of Supercomputing. – 2020. – Vol. 76. – P. 1828–1849.
18. Karimisetty, S. IOT-Based Borewell Water-Level Detection and Auto-Control of Submersible Pumps / S. Karimisetty, V. R. Rugada, D. Harshitha. – DOI : 10.1007/978-981-15-5400-1_6 // Intelligent System Design. Advances in Intelligent Systems and Computing: Conference paper, 2021. – Vol. 1171. – P. 55–61.
19. Low-Cost Industrial IoT System for Wireless Monitoring of Electric Motors Condition / L. Magadán, F. Suárez, J. C. Granda [et al.]. – DOI : 10.1007/s11036-022-02017-2 // Mobile Networks and Applications. – 2023. – Vol. 28. – P. 97–106.
20. Anagha, C. S. Cost-effective IoT-based intelligent irrigation system / C. S. Anagha, P. M. Pawar, P. S. Tamizharasan. – DOI : 10.1007/s13198-023-01854-y // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2023. – Vol. 14. – P. 263–274.
21. Towards automating irrigation: a fuzzy logic-based water irrigation system using IoT and deep learning. Model / P. Patel, Y. Patel, U. Patel [et al.]. – DOI : 10.1007/s40808-022-01452-0 // Modeling Earth Systems and Environment. – 2022. – Vol. 8. – P. 5235–5250.
22. IoT-based data-driven predictive maintenance relying on fuzzy system and artificial neural networks / A. Aboshosha, A. Haggag, N. George [et al.]. – DOI : 10.1038/s41598-023-38887-z // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – No. 12186.
23. Water-level based discrete integrated dynamic control to regulate the flow for sewer-WWTP operation / Z. Lu, M. Wang, M. Zhang [et al.]. – DOI : 10.1007/s11783-020-1222-4 // Frontiers of Environmental Science & Engineering. – 2020. – Vol. 14. – No. 45.
24. Bouach, A. Management of a Water Pumping Schedule by an HGMA Optimization Algorithm / A. Bouach, S. Benmamar. – DOI : 10.1007/s40996-023-01201-y // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. – 2023. – Vol. 47. – P. 4031–4043.
25. Behroozi, A. M. Numerical Investigation of Water Hammer due to Transient in Parallel Pumps / A. M. Behroozi, M. Vaghefi. – DOI : 10.1007/s40999-021-00640-w // International Journal of Civil Engineering. – 2021. – Vol. 19. – P. 1415–1425.
26. Turci, L. de O. Adaptive and Improved Multi-population Based Nature-inspired Optimization Algorithms for Water Pump Station Scheduling / L. de O. Turci, J. Wang, I. Brahmia. – DOI : 10.1007/s11269-020-02588-3 // Water Resources Management. – 2020. – Vol. 34. – P. 2869–2885.
27. Event-triggered model-free adaptive control for nonlinear systems using intuitionistic fuzzy neural network: simulation and experimental validation / S. Abd-Elhaleem, M. A. Hussien, M. Hamdy [et al.] // Complex & Intelligent Systems. – 2024. – Vol. 10. – P. 2271–2297. – URL : <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01254-6>.
28. Кузнецов, Н. М. Применение нейросетевого регулирования в управлении водоотливными установками / Н. М. Кузнецов, И. Н. Морозов // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2018. – № 4 (123). – С. 135–142.
29. Колпахчян, П. Г. Энергоэффективность различных способов регулирования электропривода группы насосных агрегатов / П. Г. Колпахчян, Л. И. Лавронова // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 6 (164). – С. 59–63.
30. Глазырин, А. С. Способы и алгоритмы эффективной оценки переменных состояния и параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : Глазырин Александр Савельевич; Омский государственный технический университет. – Томск, 2017. – 376 с.

Поступила в редакцию 22.04.2024

Ойбек Хайриллаевич Ишнараров, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке, т. +9 (9890) 968-80-67, e-mail: oybek.ishnazarov@gmail.com.

Мактуба Улугбековна Рахматова, магистр наук, базовый докторант, т. +9 (9897) 300-93-73, e-mail: rahmatovamaktuba@gmail.com.

(Институт проблем энергетики Академии наук Республики Узбекистан).

MODERN TRENDS IN PUMP STATION MANAGEMENT: REVIEW AND PERSPECTIVES

O. K. Ishnazarov, M. U. Rakhmatova

The article presents a study of modern approaches to managing pumping stations using digital technologies. It examines the application of Internet of Things systems, methods of predictive maintenance and equipment condition monitoring, as well as the optimization of control

processes. Special attention is given to the structural scheme of the control system, which includes four pumps, one of which is equipped with a frequency converter, and the control system itself. The research confirms the effectiveness of using multipopulation optimization algorithms to improve the performance of the pumping station.

Key words: pumping stations, Internet of Things, predictive maintenance, condition monitoring, control optimization, frequency converters, optimization algorithms.

References

1. New Indicators to Discriminate the Cause of Low Energy Efficiency in Deep-Well Pumps / M. Mora, H. Puerto, C. Rocamora [et al.]. – DOI:10.1007/s11269-021-02792-9 // *Water Resour Manage.* – 2021. – Vol. 35. – P. 1373–1388.
2. Mosetlthe, T. C. Mitigating water supply deficit through micro-grid powered pumping station / T. C. Mosetlthe. – DOI : 10.1007/s40095-021-00447-4 // *International Journal of Energy and Environmental Engineering.* – 2022. – Vol. 13. – P. 449–455.
3. Development of a Comprehensive Water Simulation Model for Water, Food, and Energy Nexus Analysis in Basin Scale / E. Soleimani, A. Afshar, A. Molajou [et al.]. – DOI : 10.1007/s11269-023-03558-1 // *Water Resour Manage.* – 2023. – Vol. 37. – P. 4589–4621.
4. Optimisation Approach Toward Water Management and Energy Security in Arid/Semiarid Regions / D. M. Bajany, L. Zhang, Y. Xu [et al.]. – DOI : 10.1007/s40710-021-00537-9 // *Environ. Process.* – 2021. – Vol. 8. – P. 1455–1480.
5. Mahinda, M. W. Optimal control of a grid-connected photovoltaic agricultural water pumping system / M. W. Mahinda, E. M. Wanjiru, J. G. Njiri. – DOI : 10.1186/s44147-023-00256-y // *Journal of Engineering and Applied Science.* – 2023. – Vol. 70.
6. Navarro-González, F. J. An irrigation scheduling algorithm for sustainable energy consumption in pressurised irrigation networks supplied by photovoltaic modules / F. J. Navarro-González, M. Pardo, H. E. Chabour [et al.]. – DOI : 10.1007/s10098-023-02486-3 // *Clean Techn Environ Policy.* – 2023. – Vol. 25. – P. 2009–2024.
7. Influence of pump start-up mode on the stability of mixed-flow pumps / Z. Tang, G. Zhu, J. Feng [et al.]. – DOI : 10.1007/s12206-023-0521-7 // *Journal of Mechanical Science and Technology.* – 2023. – Vol. 37. – P. 2949–2958.
8. Patel, V. K. Comparative Performance of Recent Advanced Optimization Algorithms for Minimum Energy Requirement Solutions in Water Pump Switching Network / V. K. Patel, B. D. Raja. – DOI:10.1007/s11831-020-09429-x // *Archives of Computational Methods in Engineering.* – 2021. – Vol. 28. – P. 1545–1559.
9. Savsani, V. Biogeography Based Optimization for Water Pump Switching Problem / V. Savsani, V. Patel, M. Tawhid. – DOI : 10.1007/978-3-030-26458-1_11 // *Nature-Inspired Methods for Metaheuristics Optimization: Modeling and Optimization in Science and Technologies.* – 2020. – Vol. 16.
10. Digital Twin-Based Pump Station Dynamic Scheduling for Energy-Saving Optimization in Water Supply System / S.-W. Zhou, S.-S. Guo, W.-X. Xu [et al.]. – DOI : 10.1007/s11269-024-03791-2 // *Water Resources Management.* – 2024. – Vol. 38(8). – P. 1–17.
11. Nikolaev, V. G. Improvement of the Procedures for Assessing the Energy Efficiency of Pumping Systems / V. G. Nikolaev, G. V. Nikolaev. – DOI : 10.1007/s10749-023-01516-w // *Power Technology and Engineering.* – 2022. – Vol. 56. – P. 335–344.
12. Energy efficiency assessment in collective irrigation systems using water and energy balances: methodology and application / D. Loureiro, P. Beceiro, E. Fernandes [et al.]. – DOI : 10.1007/s00271-023-00891-6 // *Irrigation Science.* – 2023. – Vol. 42(4). – P. 1–24.
13. Detailed Audit of the Energy Efficiency in Water Systems: New Performance Indices / M. C. Morani, A. Carravetta, O. Fecarotta [et al.]. – DOI : 10.1007/s11269-023-03718-3 // *Water Resources Management.* – 2024. – Vol. 38. – P. 1241–1260.
14. ElZahar, M. M. H. Optimization of Water Pipe Network and Formulation of Pumping Rate / M. M. H. ElZahar, M. M. M. Amin. – DOI : 10.1007/s12205-023-0872-8 // *KSCE Journal of Civil Engineering.* – 2023. – Vol. 27. – P. 2882–2890.
15. Azari, M. D. Hydraulic design and operation of variable-speed pumps as the water-energy saving strategies in pressurized irrigation systems / M. D. Azari, A. P. Rizi, A. Ashrafzadeh. – DOI : 10.1007/s10098-021-02043-w // *Clean Technologies and Environmental Policy.* – 2021. – Vol. 23. – P. 1493–1508.
16. Corbari, C. Irrigation efficiency optimization at multiple stakeholders' levels based on remote sensing data and energy water balance modelling / C. Corbari, M. Mancini. – DOI : 10.1007/s00271-022-00780-4 // *Irrigation Science.* – 2023. – Vol. 41. – P. 121–139.
17. Andrade, E. Dependability evaluation of a disaster recovery solution for IoT infrastructures / E. Andrade, B. Nogueira. – DOI : 10.1007/s11227-018-2290-0 // *The Journal of Supercomputing.* – 2020. – Vol. 76. – P. 1828–1849.
18. IOT-Based Borewell Water-Level Detection and Auto-Control of Submersible Pumps / S. Karimisetty, V. R. Rugada, D. Harshitha. – DOI : 10.1007/978-981-15-5400-1_6 // *Intelligent System Design. Advances in Intelligent Systems and Computing: Conference paper.* – 2021. – Vol. 1171. – P. 55–61.
19. Low-Cost Industrial IoT System for Wireless Monitoring of Electric Motors Condition / L. Magadán, F. Suárez, J. C. Granda [et al.]. – DOI : 10.1007/s11036-022-02017-2 // *Mobile Networks and Applications.* – 2023. – Vol. 28. – P. 97–106.
20. Anagha, C. S. Cost-effective IoT-based intelligent irrigation system / C. S. Anagha, P. M. Pawar, P. S. Tamizharasan. – DOI : 10.1007/s13198-023-01854-y // *International Journal of System Assurance Engineering and Management.* – 2023. – Vol. 14. – P. 263–274.

21. Towards automating irrigation: a fuzzy logic-based water irrigation system using IoT and deep learning. Model / P. Patel, Y. Patel, U. Patel [et al.]. – DOI : 10.1007/s40808-022-01452-0 // Modeling Earth Systems and Environment. – 2022. – Vol. 8. – P. 5235–5250.
22. IoT-based data-driven predictive maintenance relying on fuzzy system and artificial neural networks / A. Aboshosha, A. Haggag, N. George [et al.]. – DOI : 10.1038/s41598-023-38887-z // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – No. 12186.
23. Water-level based discrete integrated dynamic control to regulate the flow for sewer-WWTP operation / Z. Lu, M. Wang, M. Zhang [et al.]. – DOI : 10.1007/s11783-020-1222-4 // Frontiers of Environmental Science & Engineering. – 2020. – Vol. 14. – No. 45 (2020).
24. Bouach, A. Management of a Water Pumping Schedule by an HGMA Optimization Algorithm / A. Bouach, S. Benmamar. – DOI : 10.1007/s40996-023-01201-y // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. – 2023. – Vol. 47. – P. 4031–4043.
25. Behroozi, A. M. Numerical Investigation of Water Hammer due to Transient in Parallel Pumps / A. M. Behroozi, M. Vaghefi. – DOI : 10.1007/s40999-021-00640-w // International Journal of Civil Engineering. – 2021. – Vol. 19. – P. 1415–1425.
26. Turci, L. de O. Adaptive and Improved Multi-population Based Nature-inspired Optimization Algorithms for Water Pump Station Scheduling / L. de O. Turci, J. Wang, I. Brahmia. – DOI : 10.1007/s11269-020-02588-3 // Water Resources Management. – 2020. – Vol. 34. – P. 2869–2885.
27. Event-triggered model-free adaptive control for nonlinear systems using intuitionistic fuzzy neural network: simulation and experimental validation / S. Abd-Elhaleem, M. A. Hussien, M. Hamdy [et al.]. – DOI : 10.1007/s40747-023-01254-6 // Complex & Intelligent Systems. – 2024. – Vol. 10. – P. 2271–2297.
28. Kuznetsov, N. M. Application of neural network control in the management of dewatering installations / N. M. Kuznetsov, I. N. Morozov // Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev. – 2018. – No. 4 (123). – P. 135–142.
29. Kolpakhchyan, P. G. Energy efficiency of various methods of regulating the electric drive of pump units / P. G. Kolpakhchyan, L. I. Lavronova // Proceedings of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences. – 2011. – No. 6 (164). – P. 59–63.
30. Glazyrin, A. S. Methods and algorithms for effective assessment of variable states and parameters of asynchronous motors of controlled electric drives : speciality 05.09.03 «Electrical complexes and systems» : Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Glazyrin Alexander Savelyevich; Omsk State Technical University. – Tomsk, 2017. – 376 p.

*Oybek Khayrullaevich Ishnazarov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Science,
t. +9 (9890) 968-80-67, e-mail: oybek.ishnazarov@gmail.com.*

*Maktuba Ulugbekovna Rakhmatova, Master of Science, Basic Doctoral Student,
t. +9 (9897) 300-93-73, e-mail: rahmatovamaktuba@gmail.com.*

(Institute of Energy Problems, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan).