РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ

Абдурахмонов Самандар
магистрант кафедры информационных технологий

Аннотация. В статье рассматривается разработка программного обеспечения для автоматизированного управления насосными станциями. Предложена архитектура системы, включающая модули мониторинга, диспетчерского управления и анализа данных в реальном времени. В ходе экспериментального тестирования установлено, что внедрение разработанного ПО позволяет сократить время реакции на аварийные ситуации на 42%, снизить удельное энергопотребление на 17% и повысить общий коэффициент использования насосного оборудования до 0,91. Результаты подтверждают практическую применимость предложенного решения для объектов водоснабжения и ирригации.

Ключевые слова: насосная станция, SCADA, программное обеспечение, автоматизация, мониторинг, управление, энергоэффективность.

Введение

Насосные станции являются ключевыми элементами систем водоснабжения, ирригации и промышленного водоотведения. В Республике Узбекистан функционирует около 1 700 крупных ирригационных насосных станций, обеспечивающих орошение свыше 4,2 млн гектаров сельскохозяйственных угодий; на их долю приходится порядка 16% совокупного национального электропотребления [1]. Столь высокая энергоёмкость и ответственность данных объектов предъявляют жёсткие требования к надёжности их эксплуатации и оперативности управления.

Традиционный подход к управлению насосными станциями предполагает значительную долю ручного труда операторов, что сопряжено с систематическими ошибками, запоздалой реакцией на нештатные ситуации и

повышенным расходом электроэнергии. По оценкам ФАО, нерациональная диспетчеризация ирригационных насосных установок в странах Центральной Азии ведёт к перерасходу электроэнергии на 20–30% относительно технически достижимого минимума [2]. Существующие коммерческие SCADA-системы (Wonderware AVEVA, Siemens WinCC, Rockwell FactoryTalk) обеспечивают широкие возможности, однако отличаются высокой стоимостью лицензирования и зависимостью от поставщика [3].

Пробел в исследованиях. В открытой литературе практически отсутствуют описания доступных отечественных решений для малых и средних насосных станций, учитывающих специфику ирригационных систем Центральной Азии. Отдельные работы посвящены оптимизации режимов работы насосных агрегатов с применением частотно-регулируемого привода [4], однако комплексного программного решения с открытой архитектурой, адаптированного к условиям Узбекистана, предложено не было.

Цель исследования — разработать и верифицировать программное обеспечение для управления насосными станциями, обеспечивающее мониторинг технологических параметров в реальном времени, автоматическое регулирование режимов работы насосного оборудования и сигнализацию аварийных состояний.

Гипотеза: внедрение специализированного ПО с алгоритмами адаптивного управления позволит снизить энергопотребление и повысить надёжность функционирования насосных станций по сравнению с ручным управлением.

Методы

Архитектура разработанного программного обеспечения

Разработка ПО осуществлялась по методологии итеративного прототипирования с применением объектно-ориентированного подхода. Система реализована на языке PHP 8.2 с использованием фреймворка Laravel 10 для серверной части и библиотеки Apache ECharts 5 для клиентского интерфейса. Связь с полевым оборудованием обеспечивается через протоколы Modbus

TCP/IP; поддерживается приём данных от IoT-устройств (микроконтроллер WT32-ETH01 на базе ESP32) по протоколу HTTP/JSON.

Архитектура системы включает три уровня:

Уровень сбора данных (Field Level) — датчики давления, расходомеры, датчики уровня, вибрации и температуры, частотные преобразователи, IoT-микроконтроллеры;

Уровень управления (Control Level) — серверное ПО на Laravel, реализующее логику управления, хранение временных рядов в базе данных MySQL 8.0 и REST API для взаимодействия с интерфейсом;

Уровень визуализации (Supervisory Level) — web-интерфейс диспетчера с мнемосхемами, трендами и журналом событий.

Алгоритм адаптивного управления

Для оптимизации режима работы насосных агрегатов реализован алгоритм, основанный на методе ПИД-регулирования давления в коллекторе с динамической подстройкой заданного значения в зависимости от суточного графика водопотребления. Целевая функция минимизации удельных энергозатрат:

$$W = \Sigma (P_i \cdot \Delta t_i) / Q_{total} \rightarrow min$$

где P_i — потребляемая мощность в интервале Δt_i, Q_{total} — суммарный объём перекачанной воды.

Алгоритм выбора рабочей точки насосного агрегата использует характеристики Q–H и Q–η, хранящиеся в базе данных оборудования, и рассчитывает оптимальную частоту вращения привода через частотный преобразователь [5].

Модуль аварийной сигнализации

Обнаружение нештатных ситуаций реализовано посредством многопорогового детектора: каждый технологический параметр имеет четыре пороговых значения (информационный, предупреждение, авария, критическая авария). При превышении порога генерируется событие, которое фиксируется в журнале и доставляется оператору через push-уведомление или SMS-шлюз.

Классификация уровней тревоги выполнена в соответствии с требованиями МЭК 61511 к системам функциональной безопасности [6].

Экспериментальная база и план испытаний

Верификация ПО проводилась на двух объектах:

Объект А — ирригационная насосная станция мощностью 3 × 110 кВт (Бухарская область, Каганский насосный узел, насосы №8–10);

Объект Б — станция водоснабжения мощностью 2 × 55 кВт (Самаркандская область).

На каждом объекте был организован двухфазный эксперимент: фаза базового измерения (30 суток ручного управления) и фаза внедрения ПО (30 суток автоматизированного управления). Фиксировались: среднесуточное потребление электроэнергии (кВт·ч), количество аварийных остановок, время реакции оператора (мин), коэффициент использования оборудования (КИО). Статистическая обработка — критерий Стьюдента при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты.

Энергопотребление

На объекте А среднесуточное потребление электроэнергии снизилось с 1 847 ± 94 кВт·ч (ручное управление) до 1 532 ± 61 кВт·ч (автоматическое управление), что составляет снижение на 17,1% ($p < 0,01$). На объекте Б аналогичный показатель уменьшился на 14,3% (с 628 ± 38 до 538 ± 29 кВт·ч/сутки).

Таблица 1. Сравнение ключевых показателей до и после внедрения ПО

Показатель	Объект А (до)	Объект А (после)	Объект Б (до)	Объект Б (после)
Энергопотребление, кВт·ч/сут	1 847	1 532	628	538
Аварийных остановок, ед./мес	7	2	4	1
Время реакции на аварию, мин	18,4	10,7	21,2	12,3
КИО	0,74	0,91	0,71	0,88

Аварийность и время реакции

Количество незапланированных аварийных остановок агрегатов сократилось на объекте А с 7 до 2 случаев в месяц (−71%), на объекте Б — с 4 до 1 (−75%). Среднее время реакции на аварийную ситуацию уменьшилось с 18,4 мин до 10,7 мин на объекте А (−42%) и с 21,2 мин до 12,3 мин на объекте Б (−42%), что обусловлено автоматической генерацией сигнала тревоги и предоставлением оператору диагностической информации непосредственно на мнемосхеме.

Коэффициент использования оборудования

КИО вырос в среднем с 0,73 до 0,90 по двум объектам. Рост КИО объясняется сокращением времени простоя при техническом обслуживании благодаря функции прогнозирования наработки (счётчики моточасов, отслеживание вибрации).

Функциональное тестирование ПО

В ходе нагрузочного тестирования системы при одновременном подключении 50 клиентов время отклика web-интерфейса составило в среднем 214 мс (95-й перцентиль — 380 мс), что соответствует требованиям реального времени для диспетчерских систем. Тест на отказоустойчивость при имитации обрыва канала связи подтвердил корректное сохранение накопленных данных на стороне IoT-устройства с последующей отправкой при восстановлении соединения.

Обсуждение

Интерпретация результатов

Полученные данные подтверждают выдвинутую гипотезу: автоматизированное управление с применением разработанного ПО обеспечивает значимое снижение энергопотребления и повышение надёжности. Снижение удельных энергозатрат на 15–17% согласуется с общепризнанными оценками для систем с частотно-регулируемым приводом при оптимальной диспетчеризации [5]. Существенное сокращение аварийных остановок (в 3,5–4

раза) объясняется прежде всего своевременной диагностикой отклонений параметров, которую ручной контроль не обеспечивал в ночное время.

Сравнение с существующими решениями

В отличие от коммерческих SCADA-систем, разработанное ПО не требует дорогостоящих лицензий и легко адаптируется к любому оборудованию с поддержкой Modbus. Совокупная стоимость внедрения на одном объекте составила около $2 400 (серверное оборудование + настройка), тогда как аналогичная функциональность на базе Wonderware AVEVA оценивается в $8 000–15 000 [3]. При этом разработанное решение уступает промышленным системам по масштабируемости для крупных распределённых объектов с более чем 500 точками измерения.

Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд ограничений: - Малая выборка объектов (n = 2) не позволяет генерализировать количественные показатели на все типы насосных станций; - Период наблюдения (30 суток) недостаточен для оценки сезонных колебаний режимов водопотребления; - Тестирование проводилось при стабильном электроснабжении; влияние нестабильности сети на работу ПО требует дополнительного изучения.

Направления дальнейших исследований

Перспективными направлениями развития системы являются: интеграция модуля машинного обучения для предиктивного технического обслуживания на основе вибрационных сигнатур; расширение поддерживаемых протоколов (DNP3, IEC 61850); реализация мобильного приложения для выездных инженеров; масштабирование на распределённые группы насосных станций ирригационной системы с централизованным диспетчерским центром.

Заключение

Разработанное программное обеспечение для управления насосными станциями обеспечивает мониторинг технологических параметров в реальном времени, адаптивное регулирование режимов работы агрегатов и оперативную аварийную сигнализацию. Экспериментальная верификация на двух

промышленных объектах подтвердила снижение энергопотребления на 14–17%, сокращение количества аварийных остановок более чем в 3,5 раза и рост КИО до 0,88–0,91. С учётом того, что насосные станции потребляют около 16% электроэнергии страны [1], массовое внедрение подобных решений может дать значительный народно-хозяйственный эффект. Предложенное решение экономически доступно для предприятий водохозяйственного комплекса и может быть рекомендовано к тиражированию на объектах ирригации и водоснабжения Республики Узбекистан.

Список литературы

1. The World Bank Group. Uzbekistan: Water Infrastructure and Electricity Use in Irrigation // Gazeta.uz. — 2025. — 21 May. — URL: https://www.gazeta.uz/en/2025/05/21/water/#:~:text=The%20WB%20noted%20that%20much,16%25%20of%20national%20electricity%20use (дата обращения: 10.04.2026).

2. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Energy-Smart Food for People and Climate. Issue Paper. — Rome: FAO, 2011. — 78 p. — URL: https://www.fao.org/3/i2454e/i2454e00.htm (дата обращения: 10.04.2026).

3. Dwarakanath B., Kalpana Devi P., Ranjith Kumar A., Metwally A.S.M., Ashraf G.A., Thamineni B.L. Smart IoT-based water treatment with a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) system process // Water Reuse. — 2023. — Vol. 13, No. 3. — P. 411–431. — DOI: 10.2166/wrd.2023.052.

4. Grundfos Management A/S. Pump Handbook. 4th ed. — Bjerringbro: Grundfos, 2021. — 364 p. — URL: https://www.grundfos.com/service-support/engineering-assistance/pump-handbook (дата обращения: 05.04.2026).

5. Du M., Zhang Z., Chen Y., Qu X., Yan P., Wang H. Economic Operation of Variable Speed and Blade Angle-Adjustable Pumping Stations of an Open-Channel Water Transfer Project // Water. — 2023. — Vol. 15, No. 20. — Art. 3571. — DOI: 10.3390/w15203571.

6. International Electrotechnical Commission. IEC 61511-1:2016. Functional Safety — Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Part 1: Framework, Definitions, System, Hardware and Application Programming Requirements. — Geneva: IEC, 2016. — 208 p.