

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности 8D06101-«Информационные системы»

Шермантаева Жазира Утегеновна

Разработка информационной системы для электроэнергетики с использованием IoT технологии

Актуальность работы. Электроэнергетика – основа развития любого государства. Сегодня Казахстан сталкивается с необходимостью модернизации своей энергосистемы и перехода к более экологичным технологиям. Страна постепенно увеличивает долю возобновляемых источников энергии (ВИЭ), однако солнечная и ветровая генерация зависят от погодных условий: в одни моменты энергии достаточно, в другие – её не хватает. Это создаёт сложности для поддержания стабильной работы энергосистемы.

Ситуацию усложняет высокий износ электрических сетей – около 56%, тогда как потребление электроэнергии с каждым годом растёт. В 2024 году установленная мощность энергосистемы Казахстана составляла около 22 ГВт, при этом 80% приходится на теплоэлектростанции, а доля ВИЭ составляет лишь около 7%. В таких условиях возрастает риск аварийных отключений, а управление сетями требует более оперативных и точных решений.

Для решения этих задач государством запущены проекты по модернизации сетей, подключению новых источников энергии и увеличению доли ВИЭ в энергобалансе страны. Всё это требует внедрения современных цифровых технологий, способных улучшить контроль и управление энергетическими объектами.

Технологии Интернета вещей (IoT), интеллектуальных сетей Smart Grid и аппаратно-программные средства на базе FPGA позволяют:

- в реальном времени отслеживать состояние оборудования,
- быстро реагировать на неисправности,
- повышать энергоэффективность,
- снижать потери электроэнергии до 12%,
- увеличивать надёжность электроснабжения.

Таким образом, разработка интеллектуальной системы мониторинга и управления электроэнергетическими объектами с использованием IoT и FPGA является актуальной задачей, поддерживающей энергетическую безопасность Казахстана и соответствующей мировым тенденциям устойчивого развития.

Объектом исследования являются локальные электроэнергетические системы Туркестанской области Республики Казахстан, в том числе распределительные электрические сети 35/10/0,4 кВ и подстанция 35/10 кВ

«Новая» ТОО «Оңтүстік Жарық Транзит», функционирующие в условиях высокой доли возобновляемых источников энергии и значительного физического износа оборудования.

Основная цель диссертационной работы – разработка и практическое внедрение интеллектуальной информационной системы реального времени на базе технологий IoT, Smart Grid и обработки данных на FPGA для электроэнергетических систем.

Система предназначена для обеспечения:

- непрерывного мониторинга в реальном времени,
- оперативного прогнозирования и предотвращения аварийных режимов,
- автоматического управления режимами работы сети с высокой долей возобновляемых источников энергии.

В результате достигается повышение надёжности электроснабжения, снижение технологических потерь электроэнергии и оптимизация работы локальных электроэнергетических систем.

Идея работы. Идея диссертационной работы заключается в создании интеллектуальной системы управления и мониторинга локальных электроэнергетических систем, которая объединяет технологии Интернета вещей (IoT), Smart Grid и быстродействующую обработку данных на FPGA. Система обеспечивает непрерывный контроль состояния сети, прогнозирование аварийных ситуаций и автоматическую оптимизацию режимов работы, что позволяет эффективно интегрировать возобновляемые источники энергии, минимизировать технологические потери и повысить надёжность электроснабжения в условиях высокой степени износа сетевой инфраструктуры и переменного характера генерации.

Обоснование новизны и важности полученных результатов.

Выполненные в диссертации исследования обладают научной новизной и практической значимостью, поскольку направлены на решение актуальных задач обеспечения устойчивости и надёжности локальных электроэнергетических систем (ЛЭЭС) Казахстана в условиях роста доли ВИЭ и износа сетевой инфраструктуры.

1. Разработанная модель на основе марковских процессов и теории подобия

позволяет проводить комплексную оценку устойчивости ЛЭЭС с учётом вероятностного характера работы оборудования и изменчивости режимов генерации и нагрузки. Предложенный подход даёт возможность:

- прогнозировать вероятные аварийные состояния и риски отказов,
- повышать обоснованность выбора архитектуры энергосистемы,
- оптимизировать структуру и режимы работы распределительных сетей.

Новизна модели заключается в интеграции методов марковских процессов и принципов подобия для анализа реальных сетей с высокой долей распределённой генерации, что ранее практически не применялось в отечественной энергетике.

2. Разработан гибридный IoT-комплекс мониторинга на базе FPGA и ESP32

который обеспечивает высокоскоростную обработку данных в реальном времени и возможность удалённого интеллектуального управления оборудованием подстанций. Применение FPGA позволяет:

- снизить задержки обработки аварийных сигналов,
- повысить отказоустойчивость системы,
- обеспечить масштабируемость и интеграцию с платформами Smart Grid.

Информационная система поддерживает передачу данных по безопасным IoT-протоколам и обладает модульной архитектурой, что делает её пригодной для промышленного внедрения в сетевых компаниях Казахстана.

Задачи исследования.

1. Анализ современных технологий цифровой трансформации в энергетике. Провести систематический обзор современных подходов и технологий цифровизации в электроэнергетике, включая Smart Grid, IoT и FPGA-решения. Выявить их влияние на надёжность, энергоэффективность и экологическую устойчивость локальных и распределённых энергетических систем, а также определить возможности их адаптации для условий Казахстана.

2. Разработка модели работы электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии. Создать математическую и имитационную модель локальных электрических сетей, интегрированных с ВИЭ, учитывающую переменный характер генерации и изменчивость нагрузок. Модель позволяет прогнозировать возможные аварийные ситуации, оценивать устойчивость сети и принимать оптимальные решения по её структуре и режимам работы.

3. Создание IoT-устройства для мониторинга режимов работы электроэнергетического оборудования. Разработать аппаратно-программное решение на основе FPGA и микроконтроллеров (ESP32), способное в реальном времени собирать данные с подстанций, анализировать режимы работы оборудования и передавать информацию в информационную систему. Это обеспечивает быстрый отклик на изменения параметров сети и снижение риска аварий.

4. Построение интеллектуальной информационной системы Smart-мониторинга. Создать программно-аппаратную платформу для централизованного управления локальными электроэнергетическими системами. Система обеспечивает:

- сбор и обработку данных с IoT-устройств,
- визуализацию и аналитический контроль режимных параметров,
- прогнозирование аварийных и критических ситуаций,
- поддержку принятия управлеченческих решений для повышения устойчивости и эффективности работы сети.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана модель оценки устойчивости локальных электроэнергетических систем с использованием марковских процессов и теории подобия, позволяющая прогнозировать возможные аварийные

ситуации и выбирать оптимальную структуру сетей с учётом возобновляемых источников энергии.

2. Предложена архитектура интеллектуальной системы Smart-мониторинга, которая собирает и обрабатывает данные с подстанций, визуализирует режимные параметры и помогает оперативно управлять локальными энергетическими системами.

3. Создано гибридное IoT-устройство на базе FPGA и ESP32 для мониторинга работы оборудования, которое обеспечивает быстрый сбор и передачу данных в реальном времени, а также удалённое управление подстанциями.

4. Доказана эффективность применения IoT и FPGA-технологий для повышения надёжности, энергоэффективности и снижения потерь энергии в локальных энергосистемах с высокой долей возобновляемой генерации.

5. Разработаны практические рекомендации по внедрению предложенной системы на объектах электроэнергетики Казахстана, учитывающие специфику распределённых сетей и требования к устойчивости и эффективности работы ЛЭЭС.

Методы исследования.

В диссертационной работе использовались следующие методы исследования:

1. Математическое моделирование и методы критериальной оценки – для количественного анализа работы локальных электроэнергетических систем, оценки устойчивости и эффективности различных структур сетей.

2. Имитационное моделирование – для воспроизведения динамики работы распределённых электрических сетей с возобновляемыми источниками энергии и проверки эффективности предложенных алгоритмов управления.

3. Системный анализ и сравнительные методы – для комплексного изучения энергетических систем, выявления сильных и слабых сторон существующих решений и выбора оптимальных архитектур и подходов.

4. Модели на основе марковских процессов и теории подобия – для прогнозирования вероятности отказов, анализа надежности сети и принятия решений по оптимальной структуре и режимам работы ЛЭЭС.

Практическая значимость.

Результаты работы позволяют повысить надёжность и энергоэффективность локальных электроэнергетических систем Казахстана. Разработанная модель и IoT-устройство на базе FPGA и ESP32 обеспечивают мониторинг и оперативное управление подстанциями, сокращают потери энергии и ускоряют реагирование на аварийные ситуации. Предложенные решения могут быть внедрены энергетическими компаниями для модернизации сетей и интеграции возобновляемых источников энергии.

Соответствие направлениям развития науки и государственным программам РК.

Работа полностью соответствует:

1. Приоритетному направлению науки РК 2024–2026 гг.: «Энергия, передовые материалы и транспорт» и «Передовое производство, цифровые технологии» (цифровизация энергетики и ВИЭ).
2. Государственной программе «Цифровой Казахстан» (мероприятие 2.4 – цифровизация электроэнергетики, внедрение IoT и Smart Grid).
3. Концепции развития ТЭК и электроэнергетики РК на 2023–2029 гг. (постановления Правительства РК № 260 и № 263 от 28.03.2023) – задачи снижения потерь и интеграции ВИЭ.
4. Национальному плану развития РК до 2029 г. (Указ Президента РК № 127 от 01.02.2023) – задача № 58 «Модернизация и цифровизация электроэнергетики».

5. Цели устойчивого развития ООН № 7.

Обоснование и достоверность результатов и выводов.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современных математических и имитационных методов моделирования, критериального анализа и системного подхода. Применение марковских процессов и теории подобия позволяет прогнозировать работу локальных электроэнергетических систем с учётом вероятностных изменений нагрузки и генерации.

Разработка и тестирование IoT-устройства на базе FPGA и ESP32 проводились на экспериментальном стенде, что подтверждает практическую применимость предложенной системы для мониторинга и управления подстанциями. Все выводы опираются на результаты моделирования, экспериментальных проверок и системного анализа, что обеспечивает их научную обоснованность и достоверность.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, основной части, включающей четыре главы, и заключения. Общий объём работы составляет 152 страницы машинописного текста. Работа содержит 84 рисунка, 11 таблиц, список использованных источников из 149 наименований и 7 приложений.

Описание основных результатов исследования:

- Разработана модель оценки устойчивости локальных электроэнергетических систем на основе марковских процессов и теории подобия. Модель позволяет прогнозировать вероятные аварийные ситуации, оценивать влияние возобновляемых источников энергии на работу сетей и выбирать оптимальные структуры распределительных систем.
- Создана интеллектуальная система Smart-мониторинга, обеспечивающая сбор, обработку и визуализацию данных с подстанций. Система позволяет контролировать режимные параметры, прогнозировать критические состояния и поддерживать оперативное управление локальными энергетическими системами.
- Разработано гибридное IoT-устройство на базе FPGA и ESP32 для мониторинга работы оборудования подстанций в реальном времени. Устройство обеспечивает быструю обработку данных и удалённое управление режимами работы сетей.

- Проведена оценка эффективности предложенных решений с использованием имитационного моделирования и экспериментальных проверок на тестовом стенде. Результаты показали повышение надёжности, снижение потерь энергии до 12% и улучшение управления распределёнными сетями с высокой долей возобновляемой генерации.
- Разработаны практические рекомендации по внедрению предложенной системы на объектах электроэнергетики Казахстана, учитывающие особенности распределённых сетей, интеграцию ВИЭ и требования к энергоэффективности и устойчивости ЛЭЭС.

Область применения.

Результаты исследования и разработанные решения могут быть применены в локальных и распределённых электроэнергетических системах Республики Казахстан для:

- мониторинга и управления подстанциями и распределительными сетями 35–10–0,4 кВ в реальном времени;
- повышения надёжности и устойчивости работы локальных электроэнергетических систем (ЛЭЭС) при высокой доле возобновляемых источников энергии;
- эффективной интеграции солнечных и ветровых электростанций в существующую сеть;
- внедрения цифровых технологий Smart Grid и IoT для оптимизации режимов работы, снижения технологических потерь электроэнергии и сокращения аварийных отключений;
- создания цифровых подстанций и микросетей нового поколения в рамках программы «Цифровой Казахстан» и модернизации распределительного комплекса на 2025–2030 годы.

Разработанные решения рекомендованы к использованию энергопредающими организациями, региональными электросетевыми компаниями и промышленными предприятиями с собственными генерирующими мощностями.

Вклад докторанта в подготовку каждой публикации

В ходе аprobации и публикации результатов диссертации докторантом – Шермантаевой Жазирай Утегеновной – были подготовлены следующие научные работы. Во всех публикациях докторант внесла определяющий вклад (от 60 до 100 %): разработку моделей, расчёты, моделирование, эксперименты, написание текста и оформление. Это подтверждает её активный научный вклад в исследования по интеллектуальным системам мониторинга и управления электроэнергетикой.

1. Статьи в базах Scopus (6 статей, из них 1 с процентилем 85)

1. Wójcik W., Lezhniuk P., Shermantayeva Z. Integrated Assessment of the Quality of Functioning of Local Electric Energy Systems Energies, 2025, Vol. 18, Issue 1, Article 137. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18010137> (22 стр.).
Докторант – третий автор, разработала MSSB-алгоритм комплексной оценки качества локальных энергосистем, выполнила все математические расчёты и моделирование, написала 70 % текста (процентиль 85 по Scopus).

2. Mamyrbayev O., Shermantayeva Zh. Cybersecurity Framework for IoT-Integrated Electric Power Information Systems International Journal of Industrial Engineering and Management, 2024. DOI: <https://doi.org/10.24867/ijiem-376> (12 стр.). Докторант – второй автор, предложила фреймворк кибербезопасности для IoT в энергетике, провела анализ угроз и написала 80 % статьи.
3. Kalimoldayev M., Wójcik W., Shermantayeva Zh. Development Of A Monitoring System For Electric Power Substations Based On IoT And Implementation Of Designs On FPGA International Journal of Electronics and Telecommunications, 2023. DOI: <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.147708> (10 стр.). Докторант – третий автор, самостоятельно спроектировала и реализовала FPGA-модуль для мониторинга подстанций, написала основной технический раздел.
4. Wójcik W., Tymchenko L., Shermantayeva Z. Optical System Visualization of Combined Reflectance Model Based on Cubic and Quadratic Functions Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3023138> (8 стр.). Докторант – четвёртый автор, разработала алгоритмы визуализации оптических моделей для энергетических систем, выполнила симуляции и написала 60 % текста.
5. Kalimoldayev M.N., Abdildayeva A.A., Shermantayeva Zh.U. Implementation of a Database on Solar Resources for the Design of PV Solar Technologies Book Chapter, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-49711-7_26 (15 стр.). Докторант – третий автор, создала базу данных солнечных ресурсов для проектирования PV-систем, выполнила расчёты и написала главу.

2. Статьи в журналах, включенных в список ККСОН РК (4 статьи)

1. Kalimoldayev M., Shermantayeva Zh. Model Development and Calculations for 35/10 kV Electrical Substations in Turkestan Region Using RastrWin3 Program Scientific Journal of Astana IT University, 2024. DOI: <https://doi.org/10.37943/16DGMZ9449> (14 стр.). Докторант – второй автор, разработала модель подстанции в RastrWin3, провела расчёты режимов и анализ, написала основной текст.
2. Wójcik W., Шермантаева Ж.У., Проблемы развития электроэнергетической отрасли на основе технологии IoT Вестник КазНПУ им. Абая, 2022, Том 78, № 2. DOI: <https://doi.org/10.51889/2022-2.1728-7901.16> (9 стр.). Докторант – третий автор, провела обзор проблем IoT в энергетике, анализ рисков и написала 70 % статьи.
3. Shermantayeva Z., Mamyrbayev O. Development and Creation of Hybrid EWT-LSTM-RELM-IEWT Modeling in High-Voltage Electric Networks News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Physico-Mathematical Series, 2024, Vol. 3, № 351, pp. 223–240. DOI: <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1726.302> (18 стр.). Докторант – первый автор, создала и обучила гибридную модель прогнозирования, провела эксперименты и написала статью.
4. Wójcik W., Shermantayeva Zh. Parallel-Hierarchical Optical Network as a Model of Natural Neural Network Optical Fibers and Their Applications, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3023432> (6 стр.). Докторант – второй автор, разработала модель оптической сети для нейронных систем в энергетике, написала 65 % текста.

3. Международные конференции (4 тезиса)

1. Шермантаева Ж. Обзор Интернета вещей (IoT) в электроэнергетике и энергетические системы 3rd Online International Conference on Renewable Energy and Sustainable Technologies, 2022. Сборник: 97–108 стр. (12 стр.). Докторант – единственный автор, подготовила полный обзор и текст.
2. Шермантаева Ж.У., Ахметжанов М.А. Интернет вещей для современных энергетических систем VII Международная научно-практическая конференция "Информатика и прикладная математика", Алматы, 20–21 октября 2022. Сборник: 112–120 стр. (9 стр.). Докторант – первый автор, провела анализ IoT в энергетике, написала 85 % текста.
3. Шермантаева Ж.У. Применение методов анализа и обработки данных на основе IoT для электрической подстанции в Республике Казахстан «Проблемы оптимизации сложных систем», Новосибирск, 14–22 августа 2023. Сборник: 85–92 стр. (8 стр.). Докторант – единственный автор, разработала методы обработки данных и подготовила доклад.
4. Шермантаева Ж.У., Алшинбаева Д.О. IoT технологиясы негізіндегі трансформатордың таратуын бақылау және ақаулықтарын жою VIII Международная научно-практическая конференция "Информатика и прикладная математика", Алматы, 2023. Сборник: 7 стр. Докторант – первый автор, разработала алгоритмы мониторинга трансформаторов, написала текст.

4. Патенты и свидетельства об интеллектуальной собственности (3 работы)

1. Комплекс программ определения и визуализации динамики двухмашинной электроэнергетической системы Авторское свидетельство № 34772 от 18.04.2023. Докторант – соавтор, разработала алгоритм и интерфейс визуализации.
2. Energy Monitoring 360 Авторское свидетельство № 49103 от 16.08.2024. Авторы: Шермантаева Жазира Өтегеновна, Мамырбаев Оркен Жумажанович. Докторант – первый автор, главный разработчик системы.
3. Система мониторинга и прогнозирования аварийных ситуаций на электроэнергетических подстанциях на базе Интернета вещей и гибридной модели EWT-LSTM-RELM-IEWT Полезная модель, Рег. № 2024/1652.2 от 25.12.2024. Авторы: Мамырбаев О.Ж., Шермантаева Ж.У. Докторант – соавтор, автор идеи и описания модели.