

УПРАВЛЯЮЩИЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.75

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОСЕТИ

© И. В. Бычков¹, А. Г. Феоктистов¹, М. Е. Боднюк¹, Д. Н. Карамов^{1,2}¹Институт динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
E-mail: agf@icc.ru

Применение микросетей является актуальным направлением развития энергетики как в России, так и за рубежом. При этом возникают проблемы выбора оптимальной структуры и параметров функционирования таких сетей. Проведение натурных экспериментов с реальным энергетическим комплексом обуславливает определённые риски, связанные с большими временными и финансовыми затратами, а также надёжностью и безопасностью работы его оборудования. Поэтому, как правило, проводятся исследования на математической или физической моделях микросети. Физическая модель позволяет решить ряд важных задач, в числе которых анализ структуры сети, изучение её ключевых свойств (живучести, надёжности, регулирования спроса и предложения энергоресурсов, использования возобновляемых источников энергии и др.) и определение оптимальных режимов работы. Рассматривается система мониторинга физической модели микросети — имитационного стенда, моделирующего сеть с высокой долей возобновляемых источников электроэнергии.

Ключевые слова: микросеть, имитационный стенд, информационно-измерительная система, мониторинг.

DOI: 10.15372/AUT20250201

EDN: BUUEPG

Введение. Применение цифровых двойников (ЦД) демонстрирует возможность получения существенных достижений в области исследования функционирования и развития микросетей [1–3], представляющих собой важный класс природно-технических систем [4]. Цифровой двойник обеспечивает анализ текущего состояния, прогнозирование его развития и структурно-параметрическую оптимизацию инфраструктуры сети, а также облегчает выполнение процессов моделирования, тестирования, масштабирования и интеграции инфраструктурных элементов сетей.

Например, ЦД успешно применяется для анализа уязвимости микросети инфраструктурного объекта Байкальской природной территории (БПТ) путём поиска её критических элементов относительно возникновения крупных внешних возмущений и повышения живучести этой сети на основе структурно-параметрической оптимизации энергетической инфраструктуры [5–7]. Цифровой двойник разработан в Институте динамики систем и теории управления им. В. М. Матросова СО РАН (ИДСТУ СО РАН). Он работает с физической моделью микросети, представленной в виде стенда имитационного моделирования Технопарка Иркутского национального исследовательского технического университета [8]. Это обусловлено тем, что существуют определённые ограничения и риски, связанные с доступом к реальному энергетическому комплексу, его оборудованию и данным [9].

Структура ЦД показана на рис. 1. В качестве физического объекта выступает стенд имитационного моделирования микросети. Система мониторинга (СМ) осуществляет сбор,

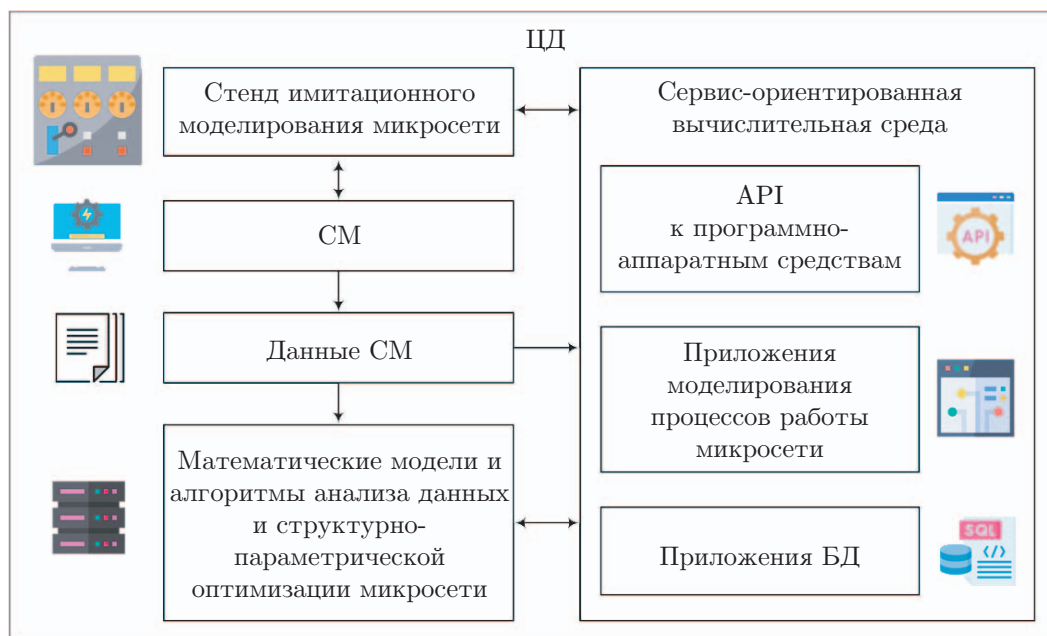


Рис. 1. Структура цифрового двойника

обработку, подготовку и передачу информации о работе его оборудования. Полученные сведения поступают в виртуальный объект, представленный совокупностью математических моделей, а также алгоритмов анализа данных и структурно-параметрической оптимизации микросети с помощью программных приложений и предметных баз данных (БД) в сервис-ориентированной вычислительной среде. Доступ к необходимым программно-аппаратным средствам осуществляется с помощью специализированных интерфейсов программных приложений (Application Programming Interface, API).

В рамках рассмотренной структуры СМ является одним из ключевых компонентов, влияющих на конечный результат решения задач развития и функционирования микросетей. В настоящее время вопросы, связанные с построением СМ, не изучены в достаточно полном объеме, что характеризуется отсутствием универсального подхода к построению системы сбора, подготовки и анализа данных микросетей. Известные системы подобного назначения [10–12], как правило, обеспечивают мониторинг, сбор и визуализацию данных, а также частичное управление параметрами оборудования микросети. В то же время поддержка общедоступного режима работы в них отсутствует, а необходимое расширение их функционала не предусматривается. В данной работе предлагаются различные варианты архитектуры СМ имитационного стенда, моделирующего сеть с высокой долей возобновляемых источников энергии.

Цель исследования состоит в определении архитектуры, наиболее полно обеспечивающей масштабируемость и отказоустойчивость аппаратной базы, настройку параметров программного обеспечения (ПО) стенда и ускорение передачи данных мониторинга по телекоммуникационной сети.

Имитационный стенд. Конфигурация микросети, режимы работы, функциональные возможности и характеристики основного оборудования имитационного стенда, моделирующего процессы функционирования микросети, детально представлены на сайте производителя [13]. В настоящее время стенд включает в себя 16 блоков: два блока однофазного источника питания, два блока однофазного трансформатора, два блока измерителя параметров однофазной сети, четыре блока модели трансформаторной подстанции и нагрузки, пять блоков линии электропередачи и один блок преобразователя интерфейсов.

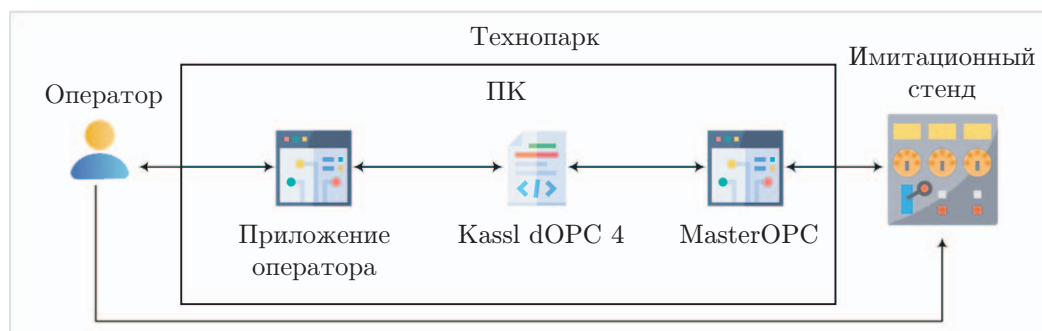


Рис. 2. Архитектура A1

На стенде регулируются пять базовых параметров: мощность нагрузки (активная, реактивная и полная), а также активное и индуктивное сопротивление. Значения данных параметров меняются в ручном режиме. Помимо регулируемых величин, также имеются семь измеряемых режимных параметров, показывающих текущее состояние физической модели микросети: действующие значения напряжения и тока, активная, реактивная и полная мощности нагрузки, коэффициент мощности и электрическая частота.

Преобразователь интерфейсов позволяет трансформировать аналоговые данные в цифровые и передавать их на персональный компьютер (ПК). Набор специализированных приложений поддерживает передачу информации между стендом и ПК.

Базовая архитектура СМ. Базовая архитектура A1, обуславливаемая комплектом программно-аппаратного обеспечения имитационного стенда, представлена на рис. 2. Приложение оператора реализует простой, интуитивно понятный интерфейс с приложением Modbus Universal Master Open Platform Communications (MasterOPC) [14], предназначенным для обмена данными между ПК и аппаратной частью стенда, и приложением, разработанным на основе программного комплекса Kassl dOPC Client Toolkit for Delphi version 4.32 (Kassl dOPC 4) [15] и осуществляющим передачу информации между MasterOPC и приложением оператора.

Приложение MasterOPC является серверным приложением, взаимодействующим со стендом по протоколу Modbus, представляющим собой структурированную битовую последовательность данных, длина которой детерминирована относительно их типа. Это приложение позволяет получать значения измеряемых параметров работы блоков, а также изменять параметры управления этими блоками с целью корректировки режимов их функционирования. Приложение MasterOPC имеет свой собственный интерфейс, предназначенный для конфигурирования и настройки приложения, определения состава и форматов обрабатываемых и передаваемых данных.

Приложение MasterOPC работает с древовидной информационной структурой, отражающей иерархию структурных и параметрических элементов стенда и их взаимосвязи между собой. К основным элементам относятся: стенд, представляющий собой корневой элемент информационной структуры; агрегированные устройства, состоящие из наборов блоков; блоки; характеристики блоков, определяемых базовыми и режимными параметрами; указанные параметры.

К сожалению, базовая архитектура имеет ряд следующих существенных ограничений:

- использование текущей версии MasterOPC, лимитирующей число измеряемых параметров блоков;
- отсутствие возможности записи информации в какую-либо БД для её последующего анализа;
- отсутствие обмена данными в телекоммуникационной сети.

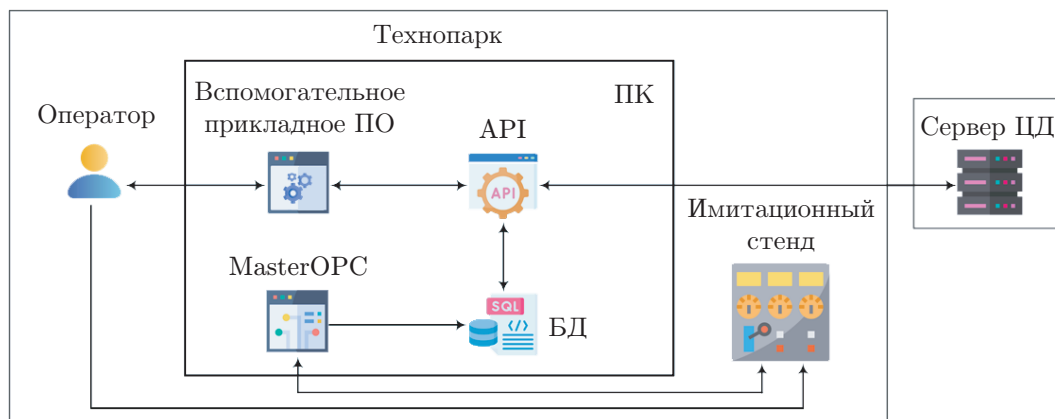


Рис. 3. Архитектура А2

Указанные ограничения сужают сферу проведения экспериментов и их эффективность. Таким образом, появляется необходимость в модификации базовой архитектуры. Ниже рассмотрены два возможных подхода к расширению функциональности СМ.

Развитие ПО. Первый подход к модификации базовой архитектуры основан на создании и внедрении ряда новых приложений. В рамках данного подхода модифицированная архитектура А2 состоит из четырёх компонентов (рис. 3): MasterOPC, БД, специализированного API и вспомогательного прикладного ПО. Приложение MasterOPC выполняет все вышеописанные функции в рамках базовой архитектуры. Этот функционал дополнен операцией сохранения информации о базовых и режимных параметрах оборудования стенда в реляционной БД SQLite [16]. Данная возможность реализована с помощью набора дополнительных скриптов для MasterOPC, разработанных на языке программирования Lua [17].

Информация из БД извлекается с помощью API по запросам от внешних информационно-вычислительных систем к СМ и преобразуется в формат JavaScript Object Notation (JSON). Для обработки запросов разработан специализированный API на платформе ASP.NET с использованием языка C# с помощью инструмента Entity Framework [18]. При создании API применён паттерн проектирования Model-View-Controller [19], в котором модели описывают логику работы API, представления отвечают за визуализацию данных, контроллеры интерпретируют запросы к API и передают информацию моделям.

Для работы с изменяемыми базовыми параметрами блоков стенда оператору требуется вспомогательное прикладное ПО, которое посредством API принимает запросы по корректировке режимов функционирования оборудования от внешних информационно-вычислительных систем к СМ. Оператор изменяет параметры в реальном времени в соответствии с полученными запросами. Вспомогательное ПО разработано на основе паттерна проектирования Model-View-ViewModel [20], в котором модели отвечают за описание объектов приложения, компоненты представления предназначены для отображения объектов в графическом интерфейсе, компоненты поведения отражают правила обработки данных в компонентах представления при изменении объектов.

Преимуществом рассмотренной выше архитектуры А2 перед базовой является возможность сбора и накопления информации о базовых и режимных параметрах оборудования стенда, а также передачи полученных данных внешним информационно-вычислительным системам в виде JSON-файлов. Кроме того, вспомогательное прикладное ПО позволяет оператору получать запросы на корректировку параметров посредством API. Недостатком рассмотренной архитектуры А2 является малая надёжность ПК, на котором развёрнута СМ.

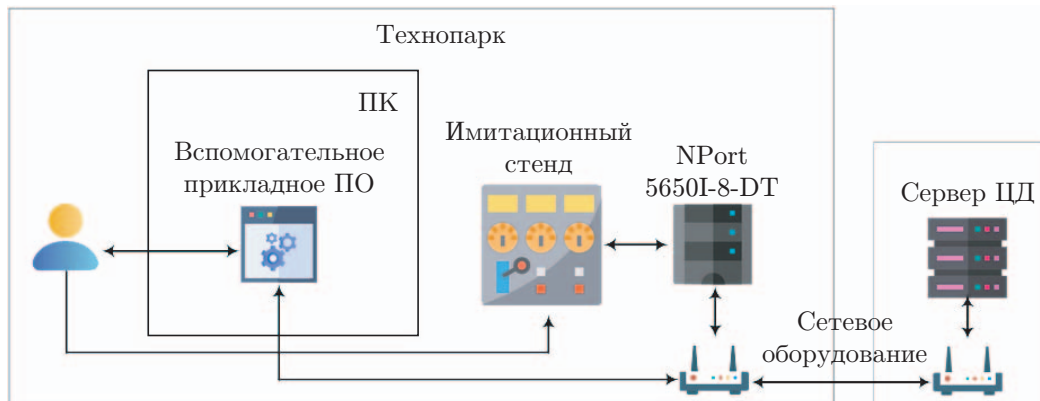


Рис. 4. Архитектура А3

Развитие программного и сетевого обеспечения. Второй подход к модификации базовой архитектуры основан как на разработке и внедрении новых приложений, так и развитии сетевого оборудования. В рамках модифицированной архитектуры А3 к компонентам, рассмотренным в предыдущем разделе, добавлен промышленный преобразователь сигналов NPort 5650I-8-DT [21] (рис. 4).

При этом MasterOPC, БД и API размещаются на сервере ЦД. Промышленный преобразователь сигналов NPort 5650I-8-DT представляет собой автономный промышленный сервер, способный подключать до восьми программно-аппаратных платформ (стендов) одновременно. Это позволяет перейти в дальнейшем от моделирования работы микросети к исследованию функционирования коалиции таких сетей. Сервер NPort 5650I-8-DT обладает высокой надёжностью по сравнению с ПК и возможностью его администрирования через любой браузер, а также используется для коммуникации между приложением MasterOPC и стендом.

Вспомогательное прикладное ПО и оператор по-прежнему необходимы для взаимодействия со стендом. Наличие промышленного преобразователя NPort 5650I-8-DT обеспечивает существенное повышение отказоустойчивости СМ посредством декомпозиции её архитектуры. Таким образом, рассмотренная архитектура А3 позволяет улучшить масштабируемость и отказоустойчивость СМ, а также повысить скорость передачи данных в сравнении с приведёнными выше архитектурами А1 и А2, однако сложность её реализации при этом возрастает.

Сравнительный анализ архитектур. Проведён сравнительный анализ функциональных возможностей архитектур А1, А2 и А3. Рассматривались поддержка передачи данных по телекоммуникационной сети (c_1), масштабируемость программно-аппаратной платформы (c_2), поддержка отказоустойчивости оборудования (c_3) и отсутствие необходимости разработки дополнительного ПО (c_4). Масштабируемость программно-аппаратной платформы состоит в способности размещения на ней дополнительных приборов и установки необходимого контрольно-измерительного ПО.

Оценка e каждого варианта архитектуры выполнена следующим образом: $e = \sum_{i=1}^n x_i y_i$, где x_i — это степень поддержки функциональной возможности c_i в рамках архитектуры (1,00 — полная поддержка; 0,75 — большая степень поддержки; 0,50 — частичная поддержка; 0,25 — низкая степень поддержки; 0 — отсутствие поддержки), а y_i — относительный вес c_i с точки зрения её важности для решаемых задач, $\sum_{i=1}^n y_i = 1$.

Значения x_i и y_i , а также оценка e , рассчитанная для каждой архитектуры, приведены в таблице. Здесь значения x_i получены на основе анализа функциональных возможностей рассматриваемых архитектур. Веса y_i отражают в таблице агрегированные субъективные

Т а б л и ц а

Характеристики архитектур СМ

Архитектура СМ	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	ϵ
A1	0	0	0,25	1,00					0,16
A2	0,50	0,25	0,25	0,50	0,35	0,30	0,25	0,10	0,36
A3	0,75	0,75	0,50	0,25					0,64

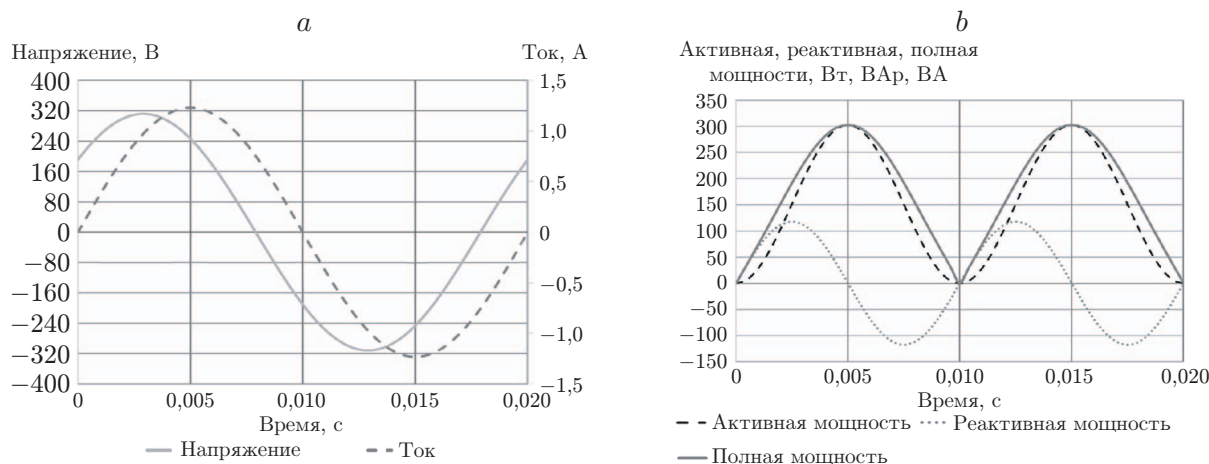


Рис. 5. Диаграммы значений тока и напряжения (а), а также наблюдаемых параметров (б)

оценки разработчиков и пользователей ЦД микросети. Проведённое сравнение показало преимущество архитектуры А3 по ряду важных показателей. Оценка варианта данной архитектуры имеет максимальное значение 0,64.

Применение. Разработанная СМ использована в рамках ЦД автономной микросети, предназначенного для анализа её уязвимости [5–7]. Данная система обеспечила возможность взаимодействия ЦД со стендом имитационного моделирования, что позволило тем самым настроить управление микросетью с учётом результатов как математического моделирования, так и натурных экспериментов с варьированием значений режимных параметров основного оборудования распределительной сети. В настоящее время СМ функционирует на основе архитектуры А2.

Настройка управления микросетью осуществлена для экстремальных условий её эксплуатации в контексте возможного возникновения крупных возмущений. Моделировались процессы функционирования автономной микросети туристического лагеря, расположенного на БПТ, которая не имеет связей с централизованной электроэнергетической системой. Блоки стенда использовались для имитации работы трансформаторов, линий электропередачи и потребителей микросети с учётом разного рода нагрузок. Для каждого момента времени с определённым дискретным шагом снимались показания с основных узлов с фиксацией действующих значений тока, напряжения, активной, реактивной и полной мощностей. На текущий момент опрос и фиксация значений выполняются с дискретным шагом 1 с, где на основании действующих значений и теоретических основ электротехники строятся характеристики, описывающие мгновенные значения основных параметров (рис. 5).

Методика оценки живучести данной сети с помощью ЦД позволила определить агрегированные показатели основных периодов её работы в условиях крупных возмущений на основе конфигурации сети, параметров производительности оборудования и данных СМ [6]. Кроме того, выявлены критические (наиболее уязвимые) элементы системы энергоснабжения [7].

Заключение. Развитие энергетических систем и комплексов, использующих возобновляемые источники энергии, требует решения целого ряда специфических задач, связанных с моделированием элементов энергетических систем, связей между основными узлами, учётом особенностей оборудования, режимов его работы и др. В статье представлен опыт работы с имитационным стендом, моделирующим распределительную сеть с высокой долей возобновляемых источников энергии. Предложены различные варианты архитектуры СМ, проведён их сравнительный анализ с точки зрения обеспечения масштабируемости и отказоустойчивости аппаратной базы, настройки параметров ПО стенда и ускорения передачи данных мониторинга по телекоммуникационной сети. Показаны преимущества архитектур А2 и А3. На основе экспериментальных результатов продемонстрировано, что оборудование стенда позволяет эффективно имитировать работу элементов микросети с учётом разного рода нагрузок.

Дальнейшее направление исследований связано с переходом на архитектуру А3 и развитием средств обработки, анализа и визуализации временных данных, получаемых в процессе мониторинга, в рамках вспомогательного прикладного ПО.

Финансирование. Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», регистрационный номер 124052100088-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumari N., Sharma A., Tran B. et al. A Comprehensive Review of Digital Twin Technology for Grid-Connected Microgrid Systems: State of the Art, Potential and Challenges Faced // Energies. 2023. **16**, Iss. 14. 5525.
2. Park H.-A., Byeon G., Son W. et al. Digital Twin for Operation of Microgrid: Optimal Scheduling in Virtual Space of Digital Twin // Energies. 2020. **13**, Iss. 20. 5504.
3. Yu P., Ma L., Fu R. et al. Framework design and application perspectives of digital twin microgrid // Energy Rep. 2023. **9**, Suppl. 8. P. 669–678.
4. Исаев С. В. Концепция природно-технических систем и её использование при изучении антропогенной трансформации природной среды // Географический вестн. 2016. № 3. С. 105–113.
5. Еделев А. В., Карамов Д. Н., Башарина О. Ю. Моделирование автономной микросети // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. Вып. 3. С. 74–85.
6. Еделев А. В., Карамов Д. Н., Башарина О. Ю. Методика оценки живучести автономной микросети // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. Вып. 4. С. 117–126.
7. Еделев А. В., Карамов Д. Н., Башарина О. Ю. Анализ уязвимости автономных микросетей // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2024. Вып. 1. С. 112–121.
8. О Технопарке. Иркутский национальный исследовательский технический университет. URL: <https://www.istu.edu/deyatelnost/innovatsii/tekhnpark> (дата обращения: 07.02.2025).
9. Лях Т. В., Зюбин В. Е., Гаранина Н. О. Автоматическая верификация алгоритмов управления в киберфизических системах на программных имитаторах // Автометрия. 2019. **55**, № 2. С. 103–113. DOI: 10.15372/AUT20190211.

10. **Мониторинг** испытательных стендов дизель генераторов. © Диспетчер. URL: <https://intechology.ru/vozmozhnosti/specialnye-tehnicheskie-resheniya/monitoring-ispytatelnyh-stendov/> (дата обращения: 21.03.2025).
11. **Иванов Р. А., Максаков Н. В.** Организация мониторинга параметров экспериментально-го стенда солнечных панелей // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. Вып. 4. С. 77–87.
12. **Мониторинг** инженерной инфраструктуры в дата-центре. Часть 2. Система энергоснабже-ния. РТК-ЦОД. URL: <https://habr.com/ru/companies/rt-dc/articles/324610/?clid=975cf399> (дата обращения: 22.01.2025).
13. **Умная** местная распределительная электрическая сеть. ГалСен® УМПЭС2-С-К. URL: <https://clck.ru/3Ft3XN> (дата обращения: 22.01.2025).
14. **Modbus** Universal MasterOPC. URL: <https://masteropc.ru/modbusuniversal?ysclid=m67fqr4bb223849895&clid=a25c19fe> (дата обращения: 22.01.2025).
15. **Kassl** dOPC Client Toolkit for Delphi (Trial) version 4.32. URL: <https://www.advanceduninstaller.com/Kassl-dOPC-Client-Toolkit-for-Delphi-Trial-e33ef033d76213bdab7afc54f8c65c9f-application.htm> (дата обращения: 22.01.2025).
16. **SQLite**. URL: <https://www.sqlite.org/> (дата обращения: 22.01.2025).
17. **Lua**. The Programming Language. URL: <https://www.lua.org/> (дата обращения: 22.01.2025).
18. **Entity** Framework. Wikipedia. The free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Entity_Framework (дата обращения: 07.02.2025).
19. **Model-View-Controller**. Википедия. Свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Model-View-Controller> (дата обращения: 07.02.2025).
20. **Model-View-ViewModel**. Википедия. Свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Model-View-ViewModel> (дата обращения: 07.02.2025).
21. **Преобразователь** NPort 5650I-8-DT. © Ниеншанц-Автоматика, 2025. URL: https://moxa.ru/shop/com_v_ethernet/standart/dt/nport-5650i-8-dt/?clid=8e64b652 (дата обра- щения: 22.01.2025).

Поступила в редакцию 27.02.2025

После доработки 12.03.2025

Принята к публикации 17.03.2025
