

УДК 519.873+621.311

DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.010

Методика оценки живучести автономной микросети

Еделев Алексей Владимирович¹, Карамов Дмитрий Николаевич²,

Башарина Ольга Юрьевна^{3,4}

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск,

flower@isem.irk.ru

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск

³Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Россия,

Иркутск

⁴Уральский государственный экономический университет, Россия, Екатеринбург

Аннотация. Данная статья является второй из цикла, посвящённого исследованию живучести изолированных энергетических комплексов локального уровня или автономных микросетей с помощью ранее разработанной технологии цифрового двойника сложной технической системы. Живучестью называется свойство микросетей адаптироваться к крупным возмущениям и восстанавливать свое исходное состояние после их воздействия. Исследование живучести энергетических комплексов традиционно строится на многовариантных вычислительных экспериментах. Однако, цифровой двойник, связанный с реальной микросетью или испытательным стендом, позволяет в исследовании живучести микросетей комбинировать вычислительные эксперименты и натурные опыты. Двухстороннюю связь цифрового двойника с оборудованием микросети или стенда обеспечивает специализированная предметно-ориентированная среда, архитектура которой представлена в данной статье. Предлагаемая архитектура среды включает в себя систему мониторинга, которая, помимо сбора данных о состоянии вычислительных средств и коммуникационного оборудования, адаптирована к сбору данных с контрольно-измерительных приборов силового оборудования и автоматики микросети. В статье также представлена авторская методика оценки живучести автономной микросети с помощью ее цифрового двойника. Входными данными для оценки живучести, согласно этой методике, являются значения параметров цифрового двойника, информация из системы мониторинга, конфигурации микросети, показатели производительности, сводные показатели. На выходе модели строятся кривые живучести. Разработанная методика может использоваться при решении различных классов задач предметной области исследования живучести, например, в анализе уязвимости микросетей.

Ключевые слова: микросеть, живучесть, уязвимость, математическая модель, энергетический хаб, предметно-ориентированная среда, испытательный стенд

Цитирование: Еделев А.В. Методика оценки живучести автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 4(32). – С.117-126. – DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.010.

Введение. Автономные системы энергоснабжения являются разновидностью энергетических комплексов локального уровня (микросетей), в которых совместное использование возобновляемых источников энергии с традиционными энергетическими установками и накопителями электрической энергии является экономически эффективным способом энергоснабжения потребителей. Особую значимость и большое распространение возобновляемые источники энергии получили при электрификации труднодоступных территорий, не имеющих связи с традиционными топливно-энергетическими комплексами [1].

Изолированность автономных микросетей повышает значимость исследования их функционирования в следующих экстремальных условиях:

- природные бедствия, такие как ураганы, наводнения, землетрясения, резкие похолодания и т.д.;
- отказ элементов и подсистем вследствие износа, ошибок персонала и т.д.;
- преднамеренные (умышленные) нарушения, такие как кибератаки и т.д.

Способность противостоять вышеперечисленным крупным возмущениям, не допуская каскадного развития аварий с массовым нарушением режима энергоснабжения потребителей, и восстанавливать исходное состояние или близкое к нему характеризует одно из свойств энергетических комплексов – живучесть [2]. Традиционно исследование живучести строится на проведении масштабных вычислительных экспериментов, в ходе которых разыгрывается множество сценариев крупных возмущений с применением математических моделей [3].

В работе [4] начато обсуждение возможности применения цифрового двойника, как средства для исследования свойств моделируемого объекта, для исследования живучести микросетей. Ключевым компонентом цифрового двойника микросети является комплекс оптимизационных, имитационных, нейросетевых моделей, с высокой точностью описывающих все аспекты поведения этого энергетического комплекса [5]. Однако, отличие цифрового двойника от модели объекта исследования заключается в наличии обратной связи с объектом, что позволяет в процессе исследования гибко подстраивать управление моделируемым объектом, исходя из разницы между прогнозируемыми (полученными в результате расчета на математической модели) и реальными значениями технологических параметров оборудования. Следует отметить, что оборудование современных испытательных стендов (рис. 1) позволяет разворачивать полноценные реалистичные схемы микросетей и имитировать воздействие на них крупных возмущений. Таким образом, цифровой двойник, соединенный с испытательным стендом, даёт возможность сочетать в исследовании живучести микросети вычислительные эксперименты и натурные опыты.

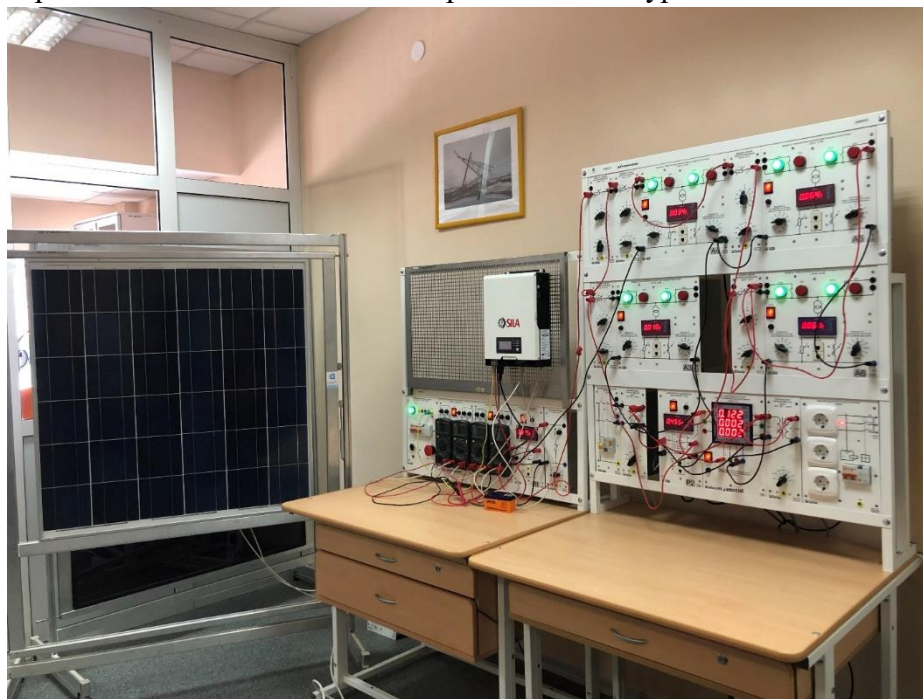


Рис. 1. Испытательный стенд, имитирующий автономную микросеть

Комплекс моделей для цифрового двойника микросети был представлен в предыдущей работе [4]. Цель данной статьи – представить архитектуру предметно-ориентированной среды, в которой функционирует цифровой двойник микросети, и разработанную методику оценки живучести автономной микросети с помощью цифрового двойника.

1. Предметно-ориентированная среда для исследования живучести автономных микросетей. Под предметно-ориентированной средой понимается совокупность программно-аппаратных средств, позволяющих её конечным пользователям решать один или несколько определённых классов задач некоторой предметной области [6, 7].

Методическую основу предметно-ориентированной среды для исследования живучести энергетических комплексов составляют:

- единые принципы взаимодействия с моделями энергетических комплексов разных уровней территориально-отраслевой иерархии [8];
- механизм объединения различных моделей отдельных систем энергетики для исследования их совместной работы в экстремальных условиях [9];
- отображение крупных возмущений на модель энергетических комплексов путём моделирования отказов и восстановлений отдельных элементов системы;
- разделение крупных возмущений по типу воздействия на структурные и функциональные;
- возможность моделирования каскадного развития аварий, в том числе их распространения по взаимосвязанным системам энергетики.

Состав предметно-ориентированной среды для исследования живучести энергетических комплексов подробно описан в работе [3]. Главными компонентами этой среды являются:

- распределённые пакеты прикладных программ (РППП), отвечающие за решение определённого класса задач [10];
- средства создания автоматизированных рабочих мест, которые позволяют исследователю работать с исходными данными, взаимодействовать с РППП, анализировать результаты вычислительных экспериментов [11].

РППП разрабатываются и выполняются под управлением инструментария Orlando Tools [12]. В отличие от известных инструментариев, средства Orlando Tools базируются на применении инженерии знаний, непрерывной интеграции системного и прикладного программного обеспечения, конфигурирования ресурсов и мультиагентного управления. Ускорение вычислений, обеспечение их надёжности и масштабируемости, а также повышение эффективности использования ресурсов при решении больших задач достигаются путём смягчения неопределённостей, возникающих при распределении вычислительной нагрузки, за счёт извлечения знаний о времени выполнения приложений на ресурсах, классификации заданий, использования знаний о соответствии ресурсов классам заданий, а также сведений, получаемых в процессе разработки, доставки, развёртывания и тестирования программного обеспечения.

Как говорилось во введении, предметно-ориентированная среда для исследования живучести автономной микросети должна быть ориентирована на проведение не только вычислительных экспериментов, но и натурных опытов на энергетическом оборудовании. Поэтому в архитектуру среды (рис. 2) включена система мониторинга, которая, помимо сбора данных о состоянии вычислительных средств и коммуникационного оборудования, адаптирована к сбору данных с контрольно-измерительных приборов силового оборудования и автоматики микросети [13]. Перечисленное оборудование может входить в состав испытательного стенда, имитирующего реальную автономную микросеть (рис. 1). Также система мониторинга обеспечивает представление ретроспективной природно-климатической информации, извлечённой из циклической базы данных, в виде типичного метеорологического года или многолетних временных рядов.

Цифровой двойник автономной микросети реализуется в виде набора веб-сервисов [14, 15], организация и взаимодействие которых основывается на микро-сервисном подходе [16]. Сервисы, перенаправляя вызовы системе мониторинга и необходимым РППП (рис. 2), обеспечивают возможность проведения массовых расчетов:

- по агрегированию, структурированию и анализу ретроспективных и текущих предметных данных большого объема, включая выявление и прогнозирование трендов,

- а также регулярных (сезонных и суточных) колебаний и случайных отклонений в динамике изменений природно-климатических показателей [17, 18];
- по моделированию процесса управления работой оборудования [19];
- для анализа эффективности и оптимизации энергоснабжения [20];
- для исследования живучести [4], включая анализ уязвимости [21, 22].

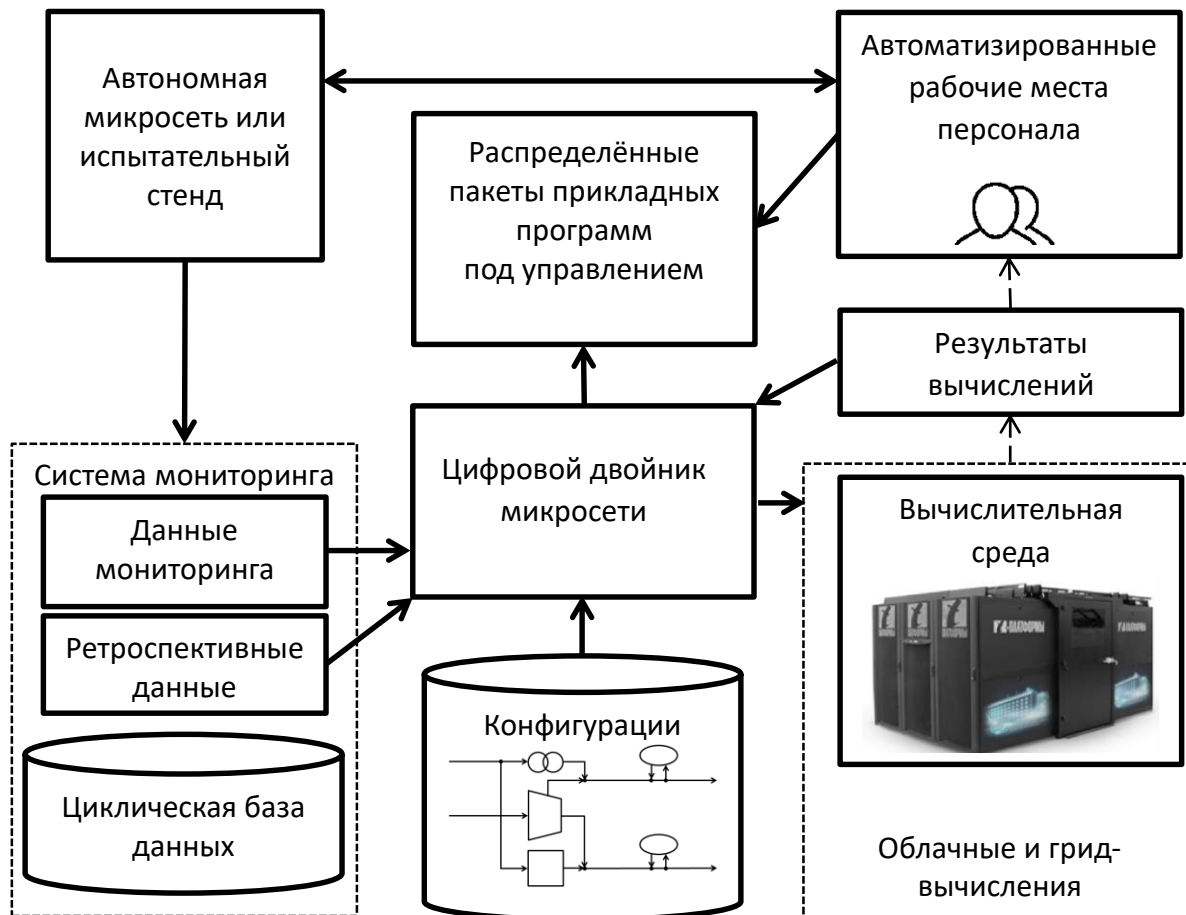


Рис. 2. Архитектура предметно-ориентированной среды для исследования живучести автономной микросети

2. Оценка живучести автономной микросети. Как было отмечено во введении, с точки зрения надёжного бесперебойного энергоснабжения потребителей изолированных районов наиболее актуальной задачей является оценка эффективности выполнения автономной микросетью своих функций в экстремальных условиях функционирования. Сценарная оценка живучести является одним из таких инструментов, она отслеживает и исследует изменения между состояниями энергетического комплекса до, во время и после воздействия крупного возмущения [23].

Как показано в предыдущем разделе, в предметно-ориентированной среде для исследования живучести источники (механизмы генерации) временных рядов данных, представляющих состояния энергетического комплекса в последовательные моменты времени сценария крупного возмущения, могут варьироваться в широких пределах: исторические данные, натурные опыты, агентное и имитационное моделирование системной динамики [24], искусственные нейронные сети [25], сетевые потоковые методы [26]. К последним относится описанная в работе [4] модель микросети на основе концепции энергетического хаба.

Цифровой двойник (рис. 2) каким-либо из перечисленных способов генерирует n временных рядов данных, представляющих значения параметров энергетического комплекса x_1, x_2, \dots, x_n . Выбор способа генерации рядов данных и состава вектора состояния $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ определяется целями сторон, заинтересованных в исследовании живучести, например производителей и потребителей энергоресурсов, оперативного персонала и т.д. [23]. В состав вектора \mathbf{x} входят технологические, социальные и экономические параметры объектов энергетики, а также природно-климатические параметры, которые представляют условия внешней среды.

Если через X обозначить последовательность состояний \mathbf{x} в последовательные моменты времени $t = \{1, \dots, T\}$, то можно ввести понятие показателя производительности $P(t): X \rightarrow \mathbb{R}$. Эта функция отображает в скалярную величину состояние $\mathbf{x} \in X$, например, возвращая значение одного из параметров энергетического комплекса x_1, x_2, \dots, x_n в момент времени t . Для сравнения конфигураций энергетического комплекса по живучести применяется сводный показатель $J: P \rightarrow \mathbb{R}$, который сводит временной ряд P к скалярной величине.

График показателя производительности P называется кривой живучести. Набор кривых живучести наглядно иллюстрирует поведение энергетического комплекса при крупном возмущении и позволяет количественно оценить его живучесть.

Сценарная оценка живучести автономной микросети, представленная на рис. 3, разработана на базе общей схемы поддержки исследования живучести энергетических комплексов, предложенной в работе [3]. Входными данными для оценки живучести являются значения параметров цифрового двойника, информация из системы мониторинга, конфигурации микросети, показатели производительности, сводные показатели, а на выходе строятся кривые живучести.



Рис. 3. Методика оценки живучести автономной микросети

На первом шаге методики оценки живучести автономной микросети (рис. 3) при формировании множества сценариев крупных возмущений при большом объёме данных могут использоваться возможности цифрового двойника по анализу временных рядов данных для выявления наиболее тяжёлых природно-климатических и социально-экономических условий функционирования микросети [17, 18]. Найденные экстремальные условия закладываются в сценарии крупных возмущений, которые моделируют одиночные или групповые отказы отобранных объектов энергетики [21, 22].

На втором шаге для каждого сценария из сформированного множества с помощью цифрового двойника проводится генерация последовательностей состояний микросети.

На следующем шаге методики сгенерированные последовательности состояний автономной микросети используются для расчета и нормализации заданных показателей производительности и сводных показателей. Нормализация показателей обоих видов может производиться статическим, эндогенным или экзогенным способами, недостатки и преимущества которых обсуждаются в работе [23].

На последнем шаге оценки живучести автономной микросети по рассчитанным показателям производительности строятся кривые живучести.

Результаты сценарной оценки живучести: кривые живучести и значения сводных показателей используются в различных классах задач данной предметной области, например, в анализе уязвимости [21, 22].

Заключение. Выше была рассмотрена архитектура предметно-ориентированной среды для исследования живучести автономных микросетей. В целом, под подобной средой понимается совокупность программно-аппаратных средств, позволяющих её конечным пользователям решать один или несколько определённых классов задач некоторой предметной области. В данной работе решаемым классом задач была выбрана оценка живучести энергетических комплексов локального уровня, или микросетей.

Особенностью представленной в статье методики оценки живучести является ее направленность на использование цифрового двойника, который имеет двухстороннюю связь с испытательным стендом. С одной стороны, это позволяет при исследовании поведения энергетических комплексов применять не только вычислительные эксперименты, но и натурные опыты. Также цифровой двойник по сравнению с отдельной моделью объекта исследования имеет обратную связь с изучаемым объектом, что позволяет в динамике влиять на поведение микросети, исходя из разницы между прогнозируемыми и реальными значениями технологических параметров оборудования. С другой стороны, эта особенность и моделирование микросети на основе концепции энергетического хаба ограничивают применимость представленной методики энергетическими комплексами локального уровня, которые в силу экстремальных условий потеряли соединение с внешними системами энергетики, либо осуществляют энергоснабжение отдаленных или труднодоступных территорий.

Дальнейшее развитие данной работы видится в практическом применении описанной методики оценки живучести автономных микросетей.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» с использованием ресурсов центров публичного доступа «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН» (<http://hpc.icc.ru>) и «Сибирский суперкомпьютерный центр СО РАН» (<http://www.sccc.icmmg.nsc.ru>).

Список источников

1. Карамов Д.Н. Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 113-130.
2. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4-х томах. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат. –1994. – 480 с.
3. Vyckov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V. et.al. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. Journal of computer and systems sciences international, 2021, v. 60, no. 6, pp. 981-994, DOI: 10.1134/S1064230721060071.

4. Еделев А.В. Моделирование автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 3(31). – С.74-85. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
5. Тягунов М.Г. Использование цифрового двойника гибридных энергетических комплексов для оптимизации их параметров и режимов / М.Г. Тягунов, Р.П. Шевердиев // Вестник МЭИ, 2023. – № 3. – С. 109-118. – DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-109-118.
6. Gallopoulos E., Houstis E., Rice J.R. Computer as Thinker/Doer: Problem-solving environments for computational science. IEEE Computational science and engineering 1.2, 1994, pp. 11-23, DOI: 10.1109/99. 326669.
7. Houstis E., Gallopoulos E., Bramley R., Rice J. Problem-solving environments for computational science. IEEE Computational science and engineering, 1997, v. 34, no. 3, pp. 18-21.
8. Еделев А.В. Выбор подхода к моделированию взаимосвязанных критических инфраструктур / А.В. Еделев, А.Г. Феоктистов // Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки: Тр. Международной научно-практической конф., 2021. – Калуга: Аэтерна. – С. 25–30. – URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-345.pdf#page=25> (дата обращения 28.05.2023).
9. Еделев А.В. Подход к моделированию функционирования взаимосвязанных систем энергетики в условиях возмущений и его программная поддержка / А.В. Еделев, Н.М. Береснева // Программные продукты и системы, 2021. – Т. 34. – № 3. – С. 409–419. – DOI: 10.15827/0236-235X.135.409-419.
10. Феоктистов А.Г. Инструментальные средства разработки распределенных пакетов прикладных программ на основе модульного программирования / А.Г. Феоктистов., И.А. Сидоров, С.А. Горский // Марчужковские научные чтения, 2017. – С. 950-956.
11. Фереферов Е.С. Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций / Е.С. Фереферов, И.В. Бычков, А.Е. Хмельнов // Вычислительные технологии, 2014. – Т. 19. – № 5. – С. 85-100.
12. Tchernykh A., Bychkov I., Feoktistov A. et.al. Mitigating uncertainty in developing and applying scientific applications in an integrated computing environment. Programming and computer software, 2020, 46, 8, pp. 483-502.
13. Sidorov I., Kostromin R., Feoktistov A. System for monitoring parameters of functioning infrastructure objects and their external environment. Proceedings of the 2nd International workshop on information, computation, and control systems for distributed environments, CEUR-WS Proceedings, 2020, v. 2638, pp. 252-264, DOI: 10.47350/ICCS-DE.2020.23.
14. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021), CEUR-WS Proceedings, 2021, v. 2984, pp. 95-100, DOI: 10.47350/ITAMS.2021.12.
15. Kostromin R., Feoktistov A. Agent-based DevOps of software and hardware resources for digital twins of infrastructural objects. Proceedings of the 4th International conference on future networks and distributed systems (ICFNDS 2020), ACM, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1145/3440749.
16. Kostromin R., Basharina O., Feoktistov A., Sidorov I. Microservice-based approach to simulating environmentally-friendly equipment of infrastructure objects taking into account meteorological data. Atmosphere, 2021, v. 12, no. 9, 1217, pp. 1-24, DOI: 10.3390/atmos12091217.
17. Башарина О.Ю. Методика выявления и прогнозирования составляющих временных рядов природно-климатических показателей / О.Ю. Башарина, А.Г. Феоктистов // Прорывные научные исследования как двигатель науки: Тр. Международной научно-практической конф, 2021. – Новосибирск: Аэтерна. – С. 20–24. – URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-347.pdf#page=20> (дата обращения 28.05.2023).
18. Еделев А.В. Оценка трендов, регулярных сезонных и случайных колебаний природно-климатических характеристик с помощью среды R / А.В. Еделев // Способы, модели и алгоритмы модернизации науки в современных условиях: Тр. Международной научно-практической конф, 2020. – Уфа: Аэтерна. – С. 11-14. – URL: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-318.pdf#page=11> (дата обращения 28.05.2023).
19. Феоктистов А.Г. Цифровые двойники процессов работы природосберегающего оборудования инфраструктурного объекта / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин, И.А. Сидоров и др. // Современные наукоемкие технологии, 2021. – № 1. – С. 57-62. – DOI: 10.17513/snt.38471.
20. Карамов Д.Н. Моделирование энергоснабжения объектов охраняемой Байкальской природной территории на основе возобновляемых источников энергии / Д.Н. Карамов, А.В. Еделев, А.Г. Феоктистов // Международный технико-экономический журнал, 2020. – № 5. – С. 7-24. – DOI: 10.34286/1995-4646-2020-74-5-7-24.
21. Gorsky S., Edelev A., Feoktistov A. Data processing in problem-solving of energy system vulnerability based on in-memory data grid. Mathematics and its applications in new computer systems (MANCS 2021). Lecture notes in networks and systems, Springer, Cham, 2022, v. 424, pp. 271-279.

22. Еделев А.В. Анализ уязвимости энергетической инфраструктуры и его реализация / А.В. Еделев, Н.М. Береснева, С.А. Горский // Современные наукоемкие технологии, 2022. – № 1. – С. 47-52. – DOI: 10.17513/snt.39008.
23. Poulin C.R., Kane M.B. Infrastructure resilience curves: Performance measures and summary metrics. Reliability engineering & system safety, 2021, v. 216, p. 107926, DOI: 10.1016/j.res.2021.107926.
24. Liu X., Fang Y.P., Zio E. A hierarchical resilience enhancement framework for interdependent critical infrastructures. Reliability engineering & system safety, 2021, v. 215, p. 107868.
25. Liu X., Ferrario E., Zio E. Identifying resilient-important elements in interdependent critical infrastructures by sensitivity analysis. Reliability engineering & system safety, 2019, v. 189, p. 423-434.
26. Johansson J., Hassel H. Modelling, simulation and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures. Risk and interdependencies in critical infrastructures: a guideline for analysis, London, Springer-Verlag, 2012, pp. 49-66.

Еделев Алексей Владимирович. К.т.н., старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – живучесть энергетических комплексов, математическое моделирование, распределенные вычисления. AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754. flower@isem.irk.ru, Россия, г. Иркутск, Лермонтова, 130.

Карамов Дмитрий Николаевич. К.т.н., доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Байкальский институт БРИКС. Область научных интересов – энергетические системы и комплексы, возобновляемые источники энергии, математическое моделирование. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru, Россия, г. Иркутск, Лермонтова, 83.

Башарина Ольга Юрьевна. К.т.н., доцент, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, доцент Уральского государственного экономического университета. Область научных интересов – системный анализ и моделирование сложных систем. AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X, basharinaolga@mail.ru, Россия, г. Иркутск, Лермонтова, 134.

UDC 519.873+621.311

DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.010

Methodology for assessing the resilience of an autonomous microgrid

Alexey V. Edelev¹, Dmitriy N. Karamov², Olga Yu. Basharina^{3, 4}

¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, flower@isem.irk.ru

²National Research Irkutsk State Technical University, Russia, Irkutsk

³Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Russia, Irkutsk

⁴Ural State University of Economics, Russia, Yekaterinburg

Abstract. This article is the second in a series devoted to the study of the resilience of isolated local-level energy complexes or autonomous microgrids using previously developed digital twin technology of a complex technical system. Vitality is the ability of microgrids to adapt to large disturbances and restore their original state after their impact. The study of the resilience of energy complexes is traditionally based on multivariate computational experiments. However, a digital twin associated with a real microgrid or test bench makes it possible to combine computational experiments and field experiments in the study of microgrid resilience. Two-way communication between a digital twin and the equipment of a microgrid or test bench is provided by a specialized subject-oriented environment, the architecture of which is presented in this article. The proposed environment architecture includes a monitoring system, which, in addition to collecting data on the state of computing facilities and communication equipment, is adapted to collecting data from instrumentation of power equipment and microgrid automation. The article also develops a methodology for assessing the resilience of an autonomous microgrid using its digital twin. The input data for the resilience assessment methodology are the values of the digital twin parameters, information from the monitoring system, microgrid configurations, performance indicators, summary indicators, and the output is resilience curves. The developed methodology will be further used in solving various classes of problems in the subject area of resilience research, for example, in analyzing the vulnerability of microgrids.

Keywords: microgrid, resilience, vulnerability, mathematical model, energy hub, subject-oriented environment, testbed

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. № FWEW-2021-0005 “Technologies for the development and analysis of subject-oriented intelligent group control systems in non-deterministic distributed environments”.

References

1. Karamov D.N. Integratsiya protsessa kategorizatsii elektrokhimicheskikh istochnikov energii v unikal'nom sostave oborudovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov, ispol'zuyushchikh istochniki energii [Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering], 2019, v. 330, no. 5, pp. 113-130.
2. Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya [Reliability of energy systems and their equipment], vol. 1. Ed Rudenko Yu.N., Moscow, Energoatomizdat, 1994, 480 p.
3. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V. et.al. Support for managing the resilience of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of computer and systems sciences international*, 2021, v. 60, no. 6. pp. 981-994, DOI: 10.1134/S1064230721060071.
4. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Modelirovaniye avtonomnoy mikroseti [Modelling autonomous microgrids]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no (31), pp.74-85, DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
5. Tyagunov M.G., Sheverdiyev R.P. Ispol'zovaniye dvoynika gibridnykh energeticheskikh kompleksov dlya optimizatsii ikh parametrov i rezhimov [Using a digital twin of hybrid energy complexes to optimize their parameters and modes]. *Vestnik MEI* [Bulletin of MPEI], no 3, pp. 109-118, DOI: 10.24160/1993-6982-2023-3-109-118.
6. Gallopoulos E., Houstis E., Rice J.R. Computer as Thinker/Doer: Problem-solving environments for computational science. *IEEE Computational science and engineering* 1.2, 1994, pp. 11-23, DOI: 10.1109/99. 326669.
7. Houstis E., Gallopoulos E., Bramley R., Rice J. Problem-solving environments for computational science. *IEEE Computational science and engineering*, 1997, v. 34, no. 3, pp. 18-21.
8. Edelev A.V., Feoktistov A.G. Vybor priverzhennosti modelirovaniyu ob'yedinennykh predprinimatel'skikh infrastruktur [Choosing an approach to modeling interconnected critical infrastructures]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Sovremennyye problemy i perspektivnyye napravleniya innovatsionnogo razvitiya nauki”* [Proc. of International scientific and practical conference “Modern problems and promising directions of innovative development of science”], Kaluga, Aeterna, 2021, pp. 25-30, available at: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-345.pdf#page=25> (accessed: 05/28/2023).
9. Edelev A.V., N.M. Beresneva Podkhod k modelirovaniyu integratsii sistem energetiki yego v usloviyakh vozmushcheniya i programmnoy podderzhki [An approach to modeling the functioning of interdependent energy systems under disturbances and its software support]. *Programmnyye produkty i sistemy* [Software & Systems], 2021, v. 34, no. 3, pp. 409-419, DOI: 10.15827/0236-235X.135.409-419.
10. Feoktistov A.G., Sidorov I.A., Gorsky S.A. Instrumental'nyye sredstva razrabotki rasprostranyayemykh paketov prikladnykh programm na osnove modul'nogo programmirovaniya [Development tools for distributed application packages based on modular programming]. *Marchukovskiye nauchnyye chteniya* [Marchuk scientific readings], 2017, pp. 950-956.
11. Fereferov E.S., Bychkov I.V., Hmel'nov A.E. Tekhnologiya razrabotki prilozheniy baz dannykh na osnove deklarativnykh spetsifikatsiy [Technology for database applications based on declarative specifications]. *Vychislitel'nyye tekhnologii* [Computational technologies], 2014, v. 19, no. 5, pp. 85-100.
12. Tchernykh A., Bychkov I., Feoktistov A. et.al. Mitigating uncertainty in developing and applying scientific applications in an integrated computing environment. *Programming and computer software*, 2020, 46, 8, pp. 483-502.
13. Sidorov I., Kostromin R., Feoktistov A. System for monitoring parameters of functioning infrastructure objects and their external environment. *Proceedings of the 2nd International workshop on information, computation, and control systems for distributed environments*, CEUR-WS Proceedings, 2020, v. 2638, pp. 252-264, DOI: 10.47350/ICCS-DE.2020.23.
14. Kostromin R., Feoktistov A., Voskoboinikov M. Service-oriented tools for automating digital twin development. *Proceedings of the 4th Scientific-practical workshop on information technologies: algorithms, models, systems (ITAMS 2021)*, CEUR-WS Proceedings, 2021, v. 2984, pp. 95-100, DOI: 10.47350/ITAMS.2021.12.
15. Kostromin R., Feoktistov A. Agent-based DevOps of software and hardware resources for digital twins of infrastructural objects. *Proceedings of the 4th International conference on future networks and distributed systems (ICFNDS 2020)*, ACM, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.1145/3440749.

16. Kostromin R., Basharina O., Feoktistov A., Sidorov I. Microservice-based approach to simulating environmentally-friendly equipment of infrastructure objects taking into account meteorological data. *Atmosphere*, 2021, v. 12, no. 9, 1217. pp. 1-24, DOI: 10.3390/atmos12091217.
17. Basharina O.Yu., Feoktistov A.G. Metodika rascheta i prognozirovaniya vremennykh ryadov prirodno-klimaticheskikh pokazateley [Methods for identifying and forecasting the components of time series of natural and climatic indicators]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Proryvnyye nauchnyye issledovaniya kak dvigatel' nauki"* [Proc. of International scientific and practical conference "Breakthrough scientific research as a science engine"], Novosibirsk, Aeterna, 2021, pp. 20-24, available at: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-347.pdf#page=20> (accessed: 05/28/2023).
18. Edelev A.V. Otsenka trendov, regulyarnykh sezonnykh i sluchaynykh kolebaniy prirodno-klimaticheskikh kharakteristik s otsenkoy sredy R [Evaluation of trends, regular seasonal and random fluctuations in natural and climatic characteristics using the R environment]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sposoby, modeli i algoritmy usovershenstvovaniya nauki v sovremennykh usloviyakh"* [Proc. of International scientific and practical conference "Methods, models and algorithms for the modernization of science in modern conditions"], Ufa, Aeterna, 2020, pp. 11-14, available at: <https://aeterna-ufa.ru/sbornik/NK-318.pdf#page=11> (accessed: 05/28/2023).
19. Feoktistov A.G., Kostromin R.O., Sidorov I.A. et al. Tsifrovyye dvoyniki protsessov raboty prirodosberegayushchego oborudovaniya infrastruktornogo ob"yektu [Digital twins of operation processes for environmentally friendly equipment of infrastructure object]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high technologies], 2021, no. 1, pp. 57-62, DOI: 10.17513/snt.38471.
20. Karamov D.N., Edelev A.V., Feoktistov A.G. Modelirovaniye energosnabzheniya ob"yektov, okhranyayemykh Baykal'skoy prirodnoy territoriyey na osnove prirodnykh istochnikov energii [Modeling of energy supply for objects of the protected Baikal natural territory based on renewable energy sources]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal* [International technical and economic journal], 2020, no. 5, pp. 7-24, DOI: 10.34286/1995-4646-2020-74-5-7-24.
21. Gorsky S., Edelev A., Feoktistov A. Data processing in problem-solving of energy system vulnerability based on in-memory data grid. *Mathematics and its applications in new computer systems (MANCS 2021). Lecture notes in networks and systems*, Springer, Cham, 2022, v. 424, pp. 271-279.
22. Edelev A.V. N.M. Beresneva, Gorsky S.A. Analiz uyazvimosti e`nergeticheskoy infrastruktury` i yego realizatsiya [Energy infrastructure vulnerability analysis and implementation]. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high technologies], 2022, no. 1, pp. 47-52, DOI: 10.17513/snt.39008.
23. Poulin C.R., Kane M.B. Infrastructure resilience curves: Performance measures and summary metrics. *Reliability engineering & system safety*, 2021, v. 216, p. 107926, DOI: 10.1016/j.res.2021.107926.
24. Liu X., Fang Y.P., Zio E. A hierarchical resilience enhancement framework for interdependent critical infrastructures. *Reliability engineering & system safety*, 2021, v. 215, p. 107868.
25. Liu X., Ferrario E., Zio E. Identifying resilient-important elements in interdependent critical infrastructures by sensitivity analysis. *Reliability engineering & system safety*, 2019, v. 189, p. 423-434.
26. Johansson J., Hassel H. Modelling, simulation and vulnerability analysis of interdependent technical infrastructures. *Risk and interdependencies in critical infrastructures: a guideline for analysis*, London, Springer-Verlag, 2012, pp. 49-66.

Edelev Alexey Vladimirovich. *Candidate of Technical Sciences, Researcher, Melentiev Energy Systems Institute. The main direction of research – resilience of energy systems, mathematical modeling, distributed computing. AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754, flower@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova, 130.*

Karamov Dmitriy Nikolaevich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Research Irkutsk State Technical University, Baikal School of BRICS. The main direction of research - energy systems and power engineering complexes, renewable energy sources, mathematical modelling. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826. dmitriy.karamov@mail.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova, 83.*

Basharina Olga Yurievna. *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher at the Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Associate Professor, Ural State University of Economics. The main direction of research - system analysis and modeling of complex systems. AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X. basharinaolga@mail.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova, 134.*

Статья поступила в редакцию 19.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 23.11.2023.

The article was submitted 11/19/2023; approved after reviewing 11/23/2023; accepted for publication 11/23/2023.