

УДК 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010

Анализ уязвимости автономных микросетей

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. Статья является заключительной из цикла, посвященного исследованию живучести изолированных энергетических комплексов локального уровня или автономных микросетей, с помощью ранее разработанной технологии цифрового двойника сложной технической системы. Под живучестью понимается свойство этих энергетических комплексов адаптироваться к крупным возмущениям и восстанавливать свое исходное состояние после их воздействия. Исследование живучести этих энергетических комплексов локального уровня обычно строится на многовариантных вычислительных экспериментах, однако при существовании обратной связи цифрового двойника с микросетью или испытательным стендом можно также использовать натурные опыты. Двухстороннюю связь цифрового двойника с микросетью обеспечивает специализированная предметно-ориентированная среда. В статье демонстрируется применение ранее описанной методики оценки живучести автономной микросети на анализе уязвимости системы энергоснабжения гипотетического туристического лагеря, условно расположенного на побережье озера Байкал и не имеющего связей с внешними системами энергетики. В частности, был проведен поиск критических с точки зрения живучести элементов этой микросети, состоящей из фотоэлектрических преобразователей, аккумуляторных батарей и дизель-генераторной установки. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что критическими элементами заданной микросети являются дизель-генераторная установка и аккумуляторные батареи. Дальнейшее развитие данной работы видится в совершенствовании методов и инструментальных средств конструирования цифровых двойников автономных микросетей.

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

Цитирование: Еделев А.В. Анализ уязвимости автономных микросетей / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 112-121. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010.

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 [1, 2]. Особую значимость и большое распространение возобновляемые источники энергии получили при электрификации труднодоступных территорий, не имеющих связи с традиционными топливно-энергетическими комплексами [3].

Изолированность автономных микросетей повышает значимость исследования их функционирования в экстремальных условиях [4]. Способность противостоять экстремальным условиям, 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 [5-7].

Исследование живучести начинается с анализа одной из её составляющих – уязвимости, которая в литературе имеет две взаимодополняющие интерпретации [8]. В глобальном контексте уязвимость отражает «пассивную» реакцию системы в виде падения производительности

сти на возникновение экстремальных условий. В локальном контексте уязвимость характеризует восприимчивость элементов системы к отдельным классам крупных возмущений. Элементы, отказ которых приводит к масштабным негативным последствиям для потребителей энергоресурсов, являются ключевыми с точки зрения живучести и называются критическими. Между интерпретациями существует тесная связь, объясняемая тем, что уязвимость системы в целом определяется степенью защищённости критических элементов.

Традиционно исследование живучести строится на проведении масштабных вычислительных экспериментов, в ходе которых разыгрывается множество сценариев крупных возмущений с применением математических моделей [9]. В работе [10] обсуждается возможность применения цифрового двойника для исследования живучести микросетей. В работе [11] представлена архитектура предметно-ориентированной среды, в которой функционирует цифровой двойник микросети, и разработана методика оценки живучести автономной микросети с помощью цифрового двойника. Цель данной статьи заключается в апробации разработанной методики оценки живучести на анализе уязвимости системы энергоснабжения туристического лагеря.

Анализ уязвимости автономной микросети. Как было сказано во введении, уязвимость энергетического комплекса имеет две взаимодополняющие интерпретации: глобальную и локальную. Вследствие этого различные виды анализа уязвимости обычно лежат между глобальным анализом уязвимости и поиском критических элементов.

Глобальный анализ уязвимости проводится путём воздействия на энергетический комплекс возмущений с возрастающей амплитудой. По мере увеличения силы воздействия возмущений производительность комплекса снижается. По скорости снижения производительности можно судить об уязвимости энергетического комплекса как его системном свойстве.

Цель поиска критических элементов заключается в том, чтобы определить те системные элементы или их группы, отказ которых несёт наихудшие последствия для энергетического комплекса [8].

Рассмотрим далее поиск критических элементов для системы энергоснабжения туристического лагеря, рассчитанного на 100 человек, условно расположенного в бухте Мандархан озера Байкал (Ольхонский район Иркутской области). Энергоснабжение лагеря осуществляется автономной микросетью, состоящей из следующих компонентов: фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), сетевой инвертор (СИН), аккумуляторные батареи (АБ), батарейный инвертор (БИН) и дизель-генераторная установка (ДГУ). На рис. 1 показана конфигурация микросети лагеря в виде одного энергетического хаба [12-14].

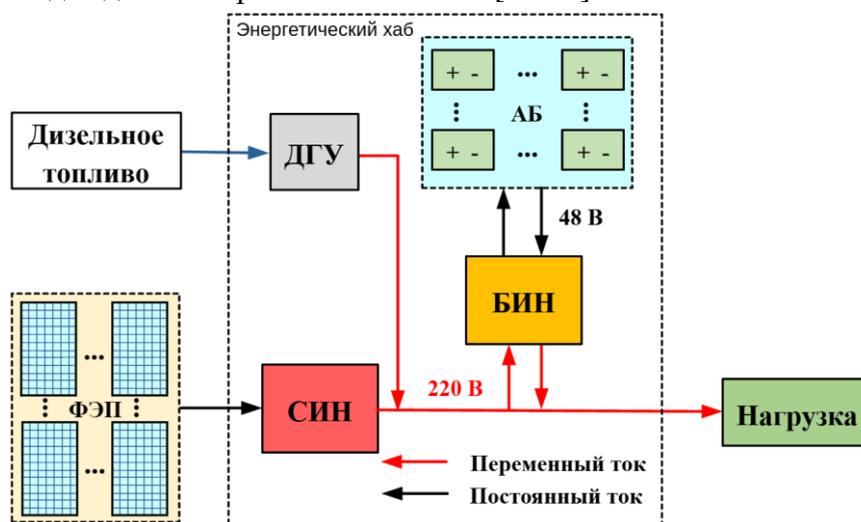


Рис. 1. Конфигурация автономной микросети лагеря

Предполагается, что электроснабжение лагеря контролируется цифровым двойником автономной микросети, который подчиняется следующим правилам [15]:

- если генерация ФЭП превышает уровень нагрузки, то выполняется прямое снабжение потребителя и аккумулярирование энергии в АБ;
- если генерации от ФЭП недостаточно, то необходимый объем энергии поступает из АБ;
- если АБ не полностью заряжены, то для зарядки АБ при необходимости включается резервный источник питания (ДГУ).

Характеристики оборудования микросети лагеря приведены в табл. 1. Почасовой годичный график электрической нагрузки лагеря, извлечённый из циклической базы данных мониторинга, показан на рис. 2.

Таблица 1. Характеристики оборудования микросети лагеря

| Название параметра, ед. измерения | Значение |
|-------------------------------------|----------|
| Ёмкость АБ, кВт*ч | 144 |
| Мощность БИН, кВт | 48 |
| Мощность ФЭП, кВт | 50 |
| Мощность СИН, кВт | 50 |
| Мощность ДГУ, кВт | 25 |
| Удельный расход топлива ДГУ, кг/кВт | 0,375 |
| Запас дизельного топлива, кг | 1000 |

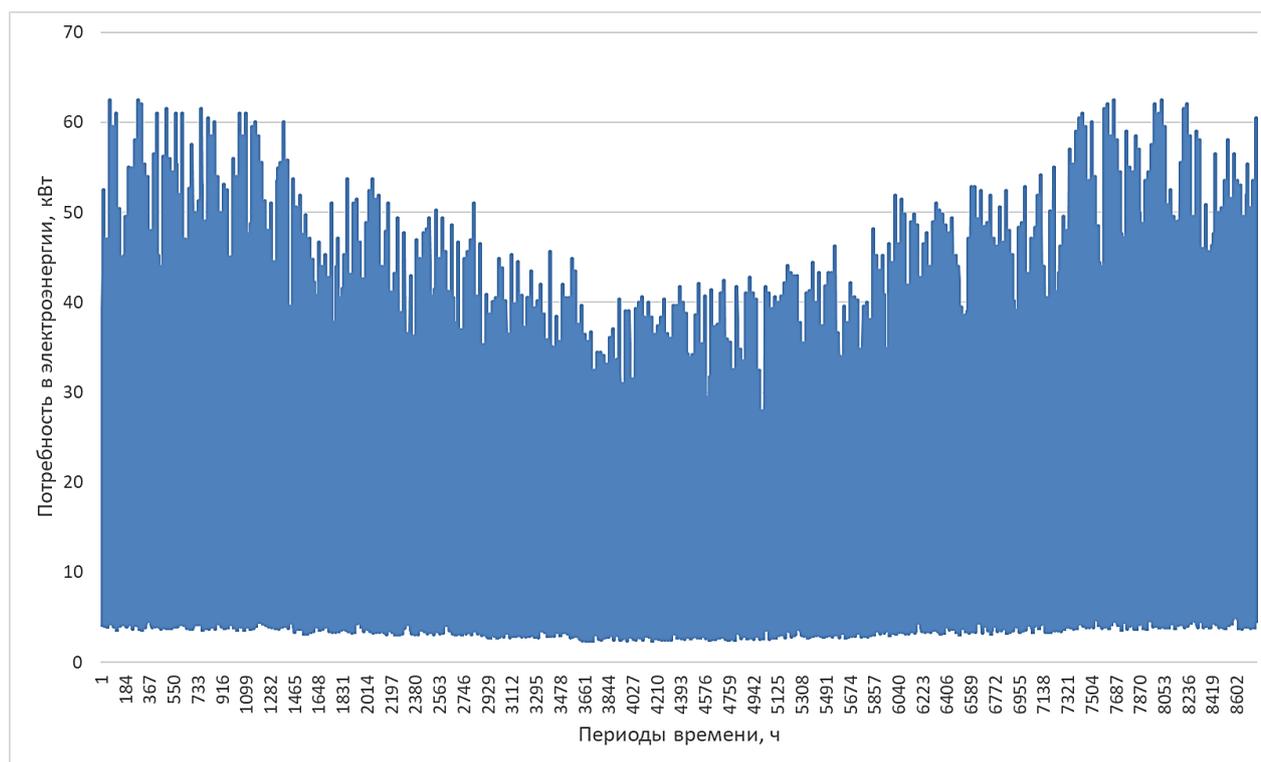


Рис. 2. Почасовой годичный график электрической нагрузки лагеря

Для поиска критических элементов необходимо провести оценку живучести заданной автономной микросети в соответствии с этапами методики оценки живучести [11]:

- 1 этап. Формирование множества сценариев возмущений.
- 2 этап. Генерация последовательностей состояний микросети с помощью цифрового двойника.
- 3 этап. Расчет, нормализация показателей.
- 4 этап. Построение кривых живучести.

На первом этапе, исходя из графика энергетической нагрузки лагеря (рис. 2), выберем в качестве экстремальных условий функционирования для сценариев крупных возмущений одни из суток января, когда генерации основного источника электроэнергии (ФЭП) явно недостаточно для покрытия нагрузки. Покрытие почасовой потребности в электроэнергии от каждого источника микросети в выбранные январские сутки приводится в табл. 2.

Таблица 2. Потребление и генерация электроэнергии в лагере

| Час | Потребление, кВт | ДГУ, кВт | ФЭП, кВт | Поток разряда АБ, кВт |
|-----|------------------|----------|----------|-----------------------|
| 1 | 4,15 | 0,00 | 0,00 | 4,15 |
| 2 | 4,15 | 0,00 | 0,00 | 4,15 |
| 3 | 5,45 | 0,00 | 0,00 | 5,45 |
| 4 | 5,20 | 0,00 | 0,00 | 5,20 |
| 5 | 5,15 | 25,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 18,60 | 22,15 | 0,00 | 0,00 |
| 7 | 32,10 | 25,00 | 0,00 | 7,10 |
| 8 | 36,40 | 22,06 | 0,00 | 14,34 |
| 9 | 20,20 | 25,00 | 0,00 | 0,00 |
| 10 | 17,85 | 25,00 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | 18,75 | 25,00 | 1,75 | 0,00 |
| 12 | 35,10 | 0,00 | 4,53 | 30,57 |
| 13 | 23,00 | 25,00 | 8,02 | 0,00 |
| 14 | 16,95 | 25,00 | 10,61 | 0,00 |
| 15 | 18,30 | 25,00 | 7,38 | 0,00 |
| 16 | 27,25 | 25,00 | 3,75 | 0,00 |
| 17 | 39,60 | 25,00 | 0,78 | 13,82 |
| 18 | 44,50 | 25,00 | 0,00 | 19,50 |
| 19 | 52,50 | 25,00 | 0,00 | 27,50 |
| 20 | 41,40 | 25,00 | 0,00 | 16,40 |
| 21 | 43,05 | 16,59 | 0,00 | 26,46 |
| 22 | 24,25 | 25,00 | 0,00 | 0,00 |
| 23 | 18,60 | 25,00 | 0,00 | 0,00 |
| 24 | 5,45 | 25,00 | 0,00 | 0,00 |

На рис. 3 для выбранных январских суток показана почасовая генерация ФЭП, ДГУ, поток и заряд АБ. Пунктирной линией показан график нагрузки. Отрицательные значения мощности по оси ординат обозначают поток заряда АБ, который создаёт ДГУ, например, с 9 до 11 и с 22 до 24 часов.

Множество сценариев крупных возмущений для заданной микросети составляют отказы источников электроэнергии: АБ, ФЭП и ДГУ.

На втором этапе методики оценки живучести для каждого сценария из множества крупных возмущений программным модулем для расчёта потокораспределения энергоресурсов [10] генерируются последовательности состояний исследуемой автономной микросети.

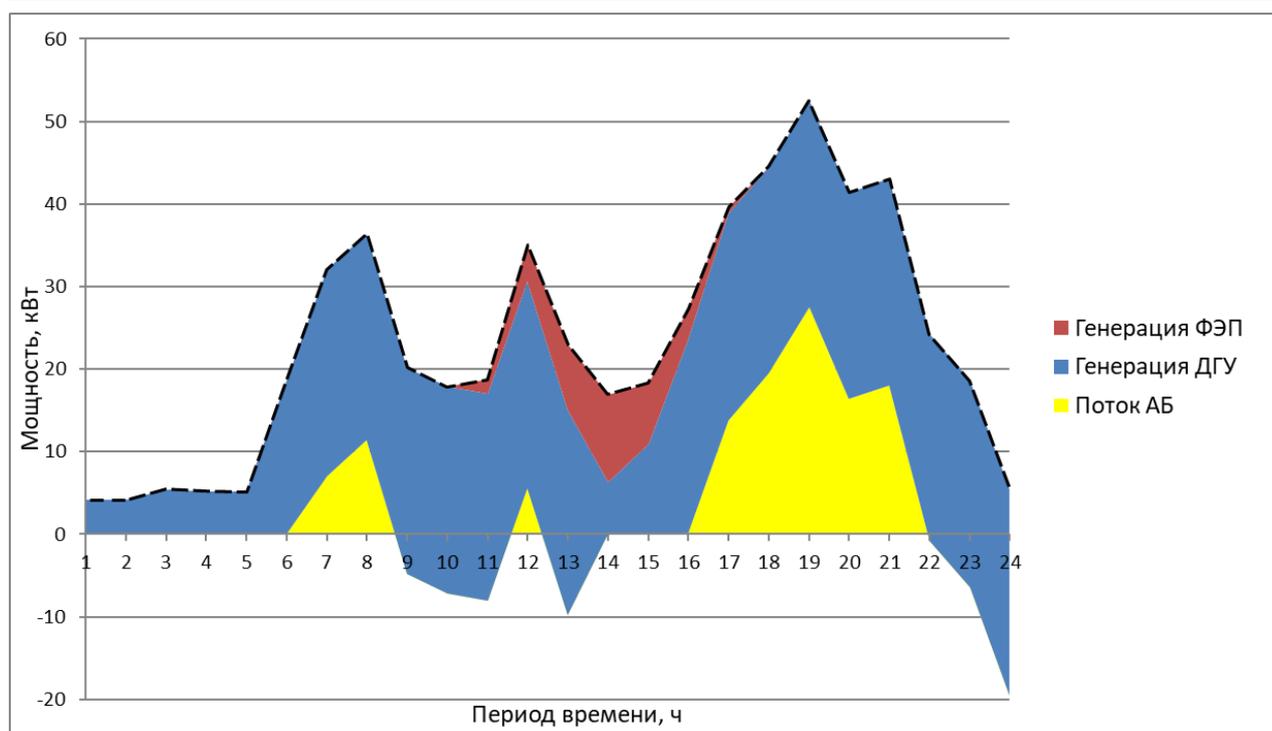


Рис. 3. Покрытие электрической нагрузки лагеря с помощью ФЭП, ДГУ и АБ

На следующем этапе происходят расчет и нормализация показателей производительности и сводных показателей. Для заданной автономной микросети естественным показателем производительности является величина покрытой нагрузки. Этот единственный показатель в данном примере не требует нормализации. В качестве сводного показателя можно принять суммарную величину недопоставки электроэнергии. Значения выбранного сводного показателя для заданного множества сценариев возмущений приводятся в табл. 3.

Таблица 3. Суточные недопоставки электроэнергии

| Сценарий возмущения | Суточная недопоставка электроэнергии, кВт*ч |
|---------------------|---|
| Отказ АБ | 119,3 |
| Отказ ФЭП | 0,3 |
| Отказ ДГУ | 417,5 |

Последствия отказов АБ, ФЭП и ДГУ в виде недопоставки электроэнергии, выделенные чёрным цветом, показаны соответственно на рис. 4, 5 и 6. Как и на рис. 3, отрицательные значения мощности по оси ординат обозначают поток заряда АБ.

На заключительном этапе оценки живучести необходимо построить кривые живучести. Такими кривыми на рис. 4, 5 и 6 будут ломаные пунктирные линии, проходящие под чёрными областями и характеризующими покрытую потребность лагеря в электроэнергии.

Анализ полученных значений показателя недопоставки электроэнергии (табл. 3) и графиков покрытия электрической нагрузки при различных сценариях возмущений показывает, что критическими элементами исследуемой автономной микросети являются ДГУ и АБ.

В результате проведённого анализа уязвимости заданной автономной микросети с точки зрения надёжного энергоснабжения можно предложить собственникам лагеря установку дополнительного ДГУ и ещё одной секции ёмкости АБ. Однако, учитывая, что лагерь находится на природоохранной территории, вместо второго резервного ДГУ лучше рассмотреть возможность использования ветрогенератора как дополнительного основного источника электроэнергии.

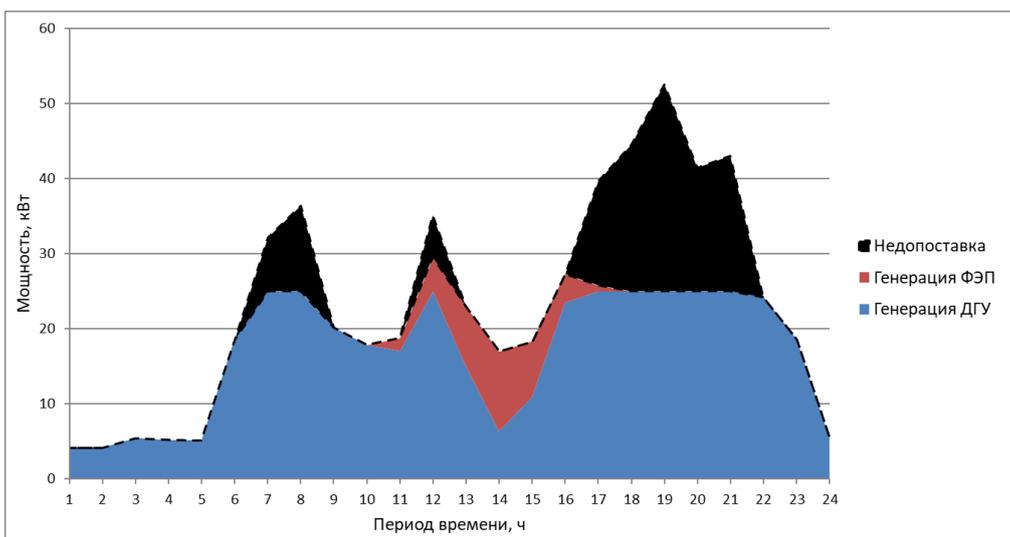


Рис. 4. Покрывение электрической нагрузки лагеря с помощью ФЭП и ДГУ при отказе АБ

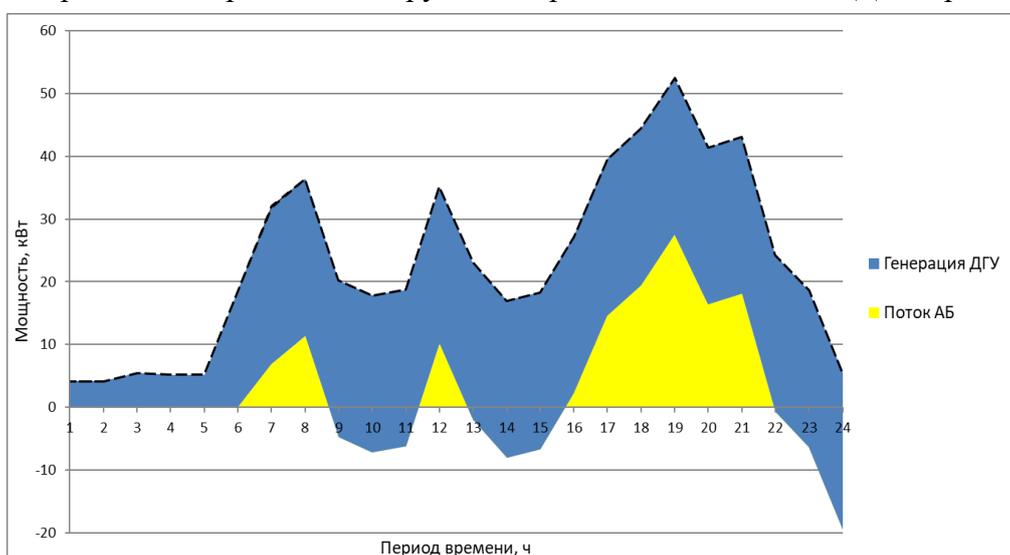


Рис. 5. Покрывение электрической нагрузки лагеря с помощью ДГУ и АБ при отказе ФЭП

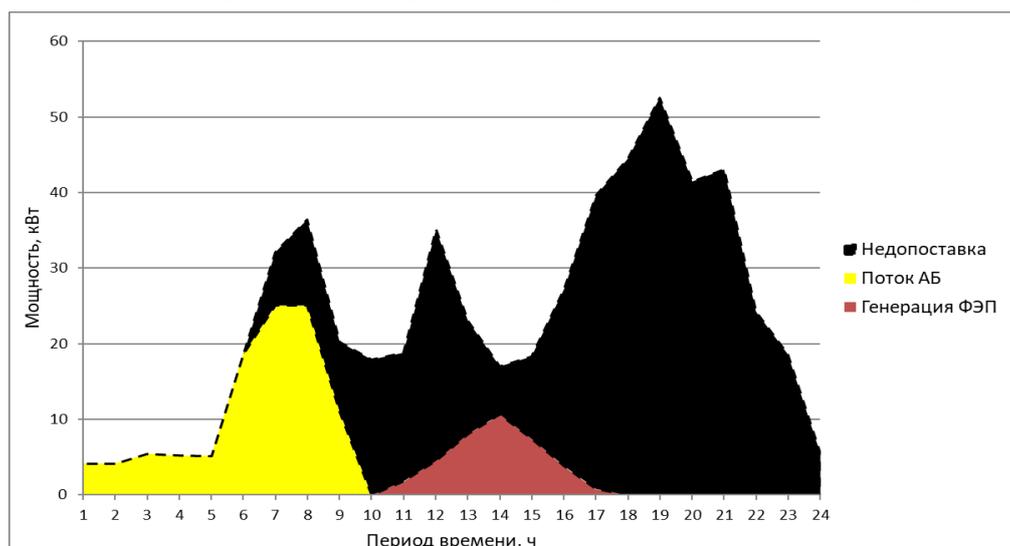


Рис. 6. Покрывение электрической нагрузки лагеря с помощью ФЭП и АБ при отказе ДГУ

Заключение. Анализ уязвимости энергетического комплекса нацелен на формирование представительного множества наихудших крупных возмущений, которые причиняют максимальный ущерб исследуемой системе. В анализе уязвимости акцент делается не на природе

крупных возмущений, а на величине и масштабе последствий отказа элементов системы по причине воздействия на них некоторого возмущения. Вследствие этого сценарий каждого из указанных возмущений моделирует отказ группы критических элементов. Определение состава и задание размера этих групп являются отдельными задачами анализа уязвимости энергетического комплекса. В данной работе рассмотрено решение первой из них, а именно поиск критических элементов на примере системы энергоснабжения гипотетического туристического лагеря, который не имеет соединений с внешними системами энергоснабжения.

Особенностью представленного в статье подхода к анализу уязвимости является его 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 математической моделью имеет обратную связь с объектом исследования, 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 представленного подхода 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 совершенствовании методов и инструментальных средств конструирования цифровых двойников, через которые осуществляется взаимодействие предметно-ориентированной среды для исследования живучести с силовым оборудованием и автоматикой реальных микросетей или испытательных стендов, имитирующих их работу.

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. Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models, *Energy*, 2014, v. 65, pp.1-17, DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041.
2. Mancò G., Tesio U., Guelpa E., Verda V. A review on multi energy systems modelling and optimization. *Applied Thermal Engineering*, 2023, p.121871, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121871.
3. 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. – DOI:10.18799/24131830/2019/5/262.
4. Hussain A., Bui V.H., Kim H.M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied energy*, 2019, v. 240, pp. 56-72, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.055.
5. 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.
6. Воропай Н.И. Живучесть ЭЭС: методические основы и методы исследований / Н.И. Воропай // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1991. – № 6. – С. 52-59.
7. Voropai N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content. *EPJ Web of Conferences*, 2019, v. 217, 01018, DOI: 10.1051/epjconf/201921701018.
8. Jonsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part O: Journal of risk and reliability*, 2008, v. 222, no. 2, pp. 235-243.

9. Feoktistov A., Edelev A., Tchernykh F. et al. An approach to implementing high-performance computing for problem solving in workflow-based energy infrastructure resilience studies. *Computation*, 2023, v. 11, no. 12, p. 243, DOI: 10.3390/computation11120243.
10. 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.
11. 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.
12. Geidl M., Koeppel G., Favre-Perrod P. et al. Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 2007, v. 5, no. 1, pp. 24-30.
13. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-Ivatloo B., Yousefi H. Energy hub: From a model to a concept – A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, v. 80, pp. 1512-1527, DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.030.
14. Воропай Н.И. Методика управления спросом на электро- и теплоэнергию в интегрированной энергосистеме с активными потребителями / Н.И. Воропай, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, О.Н. Войтов // Известия РАН. Энергетика, 2020. – №. 4. – С. 11-23. – DOI: 10.31857/S0002331020040081.
15. Карамов Д.Н. Моделирование энергоснабжения объектов охраняемой Байкальской природной территории на основе возобновляемых источников энергии / Д.Н. Карамов, А.В. Еделев, А.Г. Феокистов // Международный технико-экономический журнал, 2020. – № 5. – С. 7–24. – DOI: 10.34286/1995-4646-2020-74-5-7-24.

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.

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.

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.

UDC 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010

Vulnerability analysis of autonomous microgrids

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 paper is the final article in the series devoted to the study of resilience of isolated local-level energy complexes or autonomous microgrids using the previously developed technology of a digital twin of a complex technical system. By resilience we mean the property of these energy complexes to adapt to large perturbations and restore their initial state after their impact. The study of resilience of these energy complexes of local level is usually based on multivariate computational experiments, however, if there is feedback of the digital twin with a microgrid or test bench, it is possible to use field experiments. The two-way communication between the digital twin and the microgrid is provided by a specialised subject-oriented environment. The paper demonstrates the application of the previously described methodology for assessing the resilience of an autonomous microgrid by analysing the vulnerability of the power supply system of a hypothetical tourist camp conditionally located on the

shore of Lake Baikal and having no connections with external power systems. In particular, we searched for critical elements of this microgrid, consisting of photovoltaic converters, accumulator batteries and a diesel-generator set from the point of view of resilience. The computational experiments carried out showed that the critical elements of a given microgrid are the diesel generator set and the batteries. Further development of this work is seen in the improvement of methods and tools for the design of digital doubles of autonomous microgrids.

Keywords: microgrid, resilience, vulnerability, 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. Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models, *Energy*, 2014, v. 65, pp.1-17, DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041.
2. Mancò G., Tesio U., Guelpa E., Verda V. A review on multi energy systems modelling and optimization, *Applied Thermal Engineering*, 2023, p.121871, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121871.
3. Karamov D.N. Integratsiya protsessy 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, DOI: 10.18799/24131830/2019/5/262.
4. Hussain A., Bui V.H., Kim H.M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied energy*, 2019, v. 240, pp. 56-72, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.055.
5. Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya [Reliability of energy systems and their equipment], vol. 1, ed. Rudenko Yu.N., Moscow, Energoatomizdat, 1994, 480 p.
6. Voropay N.I. Zhivuchest' EES: metodicheskiye osnovy i metody issledovaniy [Vitality of EPS: methodological foundations and research methods]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport* [Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Energy and transport], 1991, no. 6, pp. 52-59.
7. Voropay N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content. *EPJ Web of Conferences*, 2019, v. 217, 01018, DOI: 10.1051/epjconf/201921701018.
8. Jonsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part O: Journal of risk and reliability*, 2008, v. 222, no. 2, pp. 235-243.
9. Feoktistov A., Edelev A., Tchernykh F. et al. An approach to implementing high-performance computing for problem solving in workflow-based energy infrastructure resilience studies. *Computation*, 2023, v. 11, no. 12, p. 243, DOI: 10.3390/computation11120243.
10. 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. 3(31), pp.74-85, DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
11. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O. Yu. Metodika otsenki zhivuchesti avtonomnoy mikroseti [Methodology for assessing the resilience of an autonomous microgrid]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4(32), pp.117-126, DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.010.
12. Geidl M., Koeppl G., Favre-Perrod P. et al. Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 2007, v. 5, no. 1, pp. 24-30.
13. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-Ivatloo B., Yousefi H. Energy hub: From a model to a concept – A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, v. 80, pp. 1512-1527, DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.030.
14. Voropay N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Voytov O.N. Metodika upravleniya sprosom na elektro- i teploenergiyu vo vstroyennoy energosisteme s aktivnymi pol'zovatelyami [Demand management technique for electricity and heat in an integrated energy system with active consumers]. *Izvestiya RA. Energetika* [Izvestiya RAS. Energy], 2020, v. 4, pp. 11-23, DOI: 10.31857/S0002331020040081.
15. 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-ekonomicheskii zhurnal* [International technical and economic journal], 2020, no. 5, pp. 7-24, DOI: 10.34286/1995-4646-2020-74-5-7-24.

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.

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.

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.

Статья поступила в редакцию 11.01.2024; одобрена после рецензирования 01.03.2024; принята к публикации 11.03.2024.

The article was submitted 01/11/2024; approved after reviewing 03/01/2024; accepted for publication 03/11/2024.