

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК 620.91

DOI:10.25729/ESI.2024.35.3.006

Первичный анализ работы гибридной микросети лабораторного масштаба с использованием системы мониторинга

Баденко Владислав Вадимович, Козлов Александр Николаевич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *badenko@isem.irk.ru*

Аннотация. Одним из направлений современной энергетической промышленности является разработка систем, включающих в себя использование солнечной энергии, энергии ветра и переработку вторичных энергоресурсов (отходов). В работе рассматривается энергетическая система, обозначаемая как гибридная микросеть лабораторного масштаба, включающая в себя использование таких источников. Энергосистема включает в себя солнечные панели, газификатор биомассы и электрогенератор. Большую значимость для таких систем представляют инструменты мониторинга для анализа режимов работы и внесения модификаций. Исходя из этого, была разработана система мониторинга для отслеживания различных параметров лабораторного оборудования. Благодаря разработанной системе были получены данные о работе микросети, выявлены ее недостатки и узкие места.

Ключевые слова: солнечная энергия, биомасса, мониторинг

Цитирование: Баденко В.В. Первичный анализ работы гибридной микросети лабораторного масштаба посредством системы мониторинга / В.В. Баденко, А.Н. Козлов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 3(35). – С. 73-81. – DOI: 10.25729/ESI.2024.35.3.006.

Введение. Энергетические системы, в основе которых лежит использование возобновляемых источников энергии, вызывают немалый интерес в исследовательском сообществе [1]. Одним из направлений современной энергетической промышленности является разработка систем, основанных на использовании солнечной энергии, энергии ветра [2] и переработке вторичных энергоресурсов (отходов) [3]. Такие системы особенно актуальны для развивающихся стран и районов, отрезанных от подключения к крупным энергосетям [4-5]. В энергосистему также может быть заложена генерация электроэнергии из невозобновляемых источников (горючих топлив), как в виде резервной альтернативы [6], так и в виде одного из основных узлов. В последнем случае комбинация источников используется для уменьшения расхода топлива и выбросов.

Гибридные энергосистемы местного масштаба часто описываются понятием «микросеть». Микросеть – автономная система электроснабжения с мощностью от нескольких кВт до нескольких мВт [7]. В процессе создания микросети необходимо учитывать разнообразные ограничения [8], возникающие при согласовании узлов микросети. Многие возникающие задачи не могут быть решены одновременно и требуют применения многокритериального подхода и поиска компромиссных решений [9]. В общем случае, мультиэнергетическая микросеть должна быть экономически эффективной, обеспечивать минимальное воздействие на окружающую среду, учитывать требования к качеству электроэнергии, а также иметь высокий уровень по другим показателям эффективности, например, устойчивости [10].

Идея применения гибридных энергосистем, объединяющих в себе различные источники энергии, базируется на взаимной компенсации недостатков. Например, комбинированное применение стандартного электрогенератора на горючем топливе в темное время суток и солнечных панелей в светлое позволяет повысить устойчивость энергоснабжения при экономии ресурсов [11]. Важной особенностью таких систем является модульность и распределенная генерация. Преимуществом микросетей является возможность интеграции в существующие

энергетические сети, поскольку микросеть может быть создана в различных конфигурациях в зависимости от местных условий окружающей среды.

Эксплуатация и разработка гибридных установок требуют наличия систем управления, подстраивающихся под запросы потребителей и прогнозирующих различные возмущения, а также систем хранения энергии и мониторинга. Это особенно актуально для установок, основанных на солнечной энергии, в силу зависимости от времени суток. Из-за различных энергоисточников и накопителей требуется рассмотрение характерных режимов для учета возможных узких мест при формировании структуры мультиэнергетической микросети, т.е. состава и установленной мощности оборудования [12].

Анализ работы микросети строится на мониторинге функционирования всех узлов в различных условиях. Исследование поведения микросети особенно важно при ее разработке и тестировании [13]. На основании собранных данных можно осуществлять модернизацию узлов микросети, выбирать режимы работы и устанавливать ограничивающие условия. Размер выборки для анализа имеет прямое влияние на качество анализа. Частота обновления данных также играет большую роль. Лучшим решением данной проблемы является система мониторинга с использованием глобальной сети интернет. Отслеживание характеристик системы с достаточно высокой частотой позволяет принимать своевременные решения о внесении изменений в конкретный узел сети. Такой подход в перспективе можно использовать для осуществления удаленного управления, в том числе и для аварийной остановки. Применение информационных технологий при анализе работы гибридных сетей также упрощает привлечение различных специалистов к процессам модернизации.

2. Материалы и методы. Для исследований была создана установка (рисунок 1), сочетающая в себе солнечные панели, установку по газификации древесной биомассы, электрогенератор, функционирующий на синтез-газе, систему хранения электроэнергии посредством аккумуляторов, систему управления, систему мониторинга.

Компоненты микросети выбирались с учетом их доступности и стоимости при обеспечении необходимых требований по функционированию. Также использовалось оборудование, имеющееся в лаборатории.

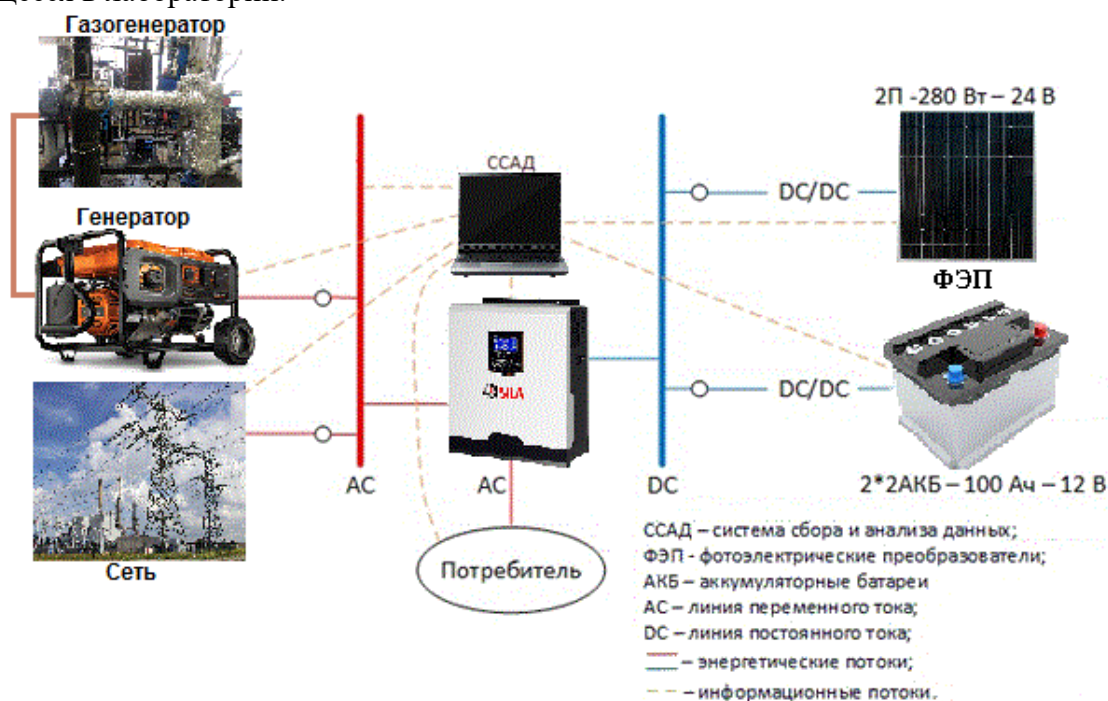


Рис. 1. Схема микросети

Установка по газификации биомассы состоит из реактора, системы нагрева, линии фильтрации смолы, системы подачи газа. Исходное сырье закладывается в реакционную зону на

колосниковую решетку, затем осуществляется подача инертного газа или окислителя. Газообразные продукты реакции проходят через многоступенчатую систему фильтрации и затем подаются в следующий узел для генерации энергии.

Для энергетического использования продуктов термохимической конверсии биомассы был модифицирован бытовой бензиновый электрогенератор СПЕЦ-HG-7500. Для адаптации устройства под синтез-газ были заменены системы впуска и зажигания.

Узел, основанный на получении электроэнергии из солнечных лучей, основывается на фотовольтаических элементах SilaSolar SIM280 (5ВВ) общей мощностью 560 Вт, установленных на открытом воздухе. Панели подключены к гибриднему солнечному инвертору SILA V 1000P – это многофункциональный инвертор/зарядное устройство мощностью 1 кВт (кратковременно 2 кВт), сочетающий в себе функции инвертора, контроллера заряда солнечных батарей и зарядного устройства от сети 220В для обеспечения бесперебойного электроснабжения, с возможностью выбора приоритетов заряда и нагрузки.

Управление и координация источников энергии осуществляется при помощи ПО Watchpower [14] (рисунок 2). Программа позволяет осуществлять управление микросетью и фиксировать показания измерительных приборов (мощность нагрузки, входное/выходное сетевое напряжение и частота, напряжение блока батарей, напряжение солнечных панелей и их коэффициент мощности). Также в программу передаются сообщения о неисправностях.

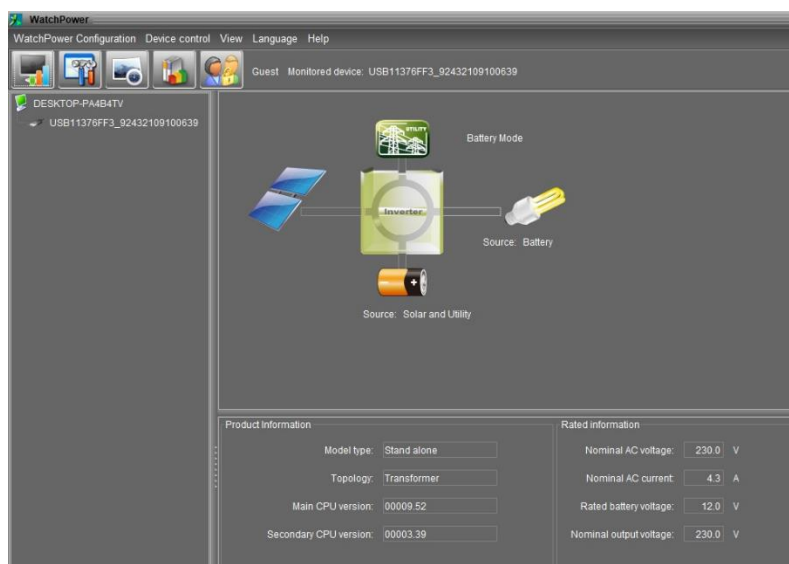


Рис. 2. Внешний вид интерфейса программы WatchPower

Хранение энергии осуществляется за счет четырех параллельно соединенных аккумуляторов типа AGM. Рабочее напряжение составляет 11-14 В, емкость блока аккумуляторов - 400 А•ч (емкость каждого аккумулятора - 100 А•ч).

Система передачи данных основывается на графическом представлении параметров микросети в качестве функции от времени. Концепция удаленного управления микросетью в данном исследовании не используется, поскольку требует отдельной системы обеспечения безопасности и не имеет определяющего значения для экспериментальной микросети, характерного для коммерческих установок, и будет описана в последующих работах. Графическое представление характеристик осуществляется на основе бесплатной графической библиотеки Google charts [15]. Передача данных может осуществляться как через открытый бесплатный репозиторий (например, GitHub), так и через серверную структуру организации ИСЭМ СО РАН. Страница с отображением графической информации основывается на языке гипертекстовой разметки HTML с применением CSS и JavaScript. Отслеживаемыми характеристиками микросети являются: операционные характеристики отдельного узла (датчики температуры,

системы отслеживания работоспособности), характеристики поставляемой в сеть электрической энергии (напряжение, частота, мощность), параметры текущего состояния системы хранения электроэнергии (емкость, напряжение, токи утечки).

3. Оценка работы микросети. Для оценки работы микросети необходимы контроль и анализ различных ее узлов. В данной работе основное внимание уделяется солнечным элементам и системе мониторинга.

3.1. Анализ работы солнечных батарей. Работа узла с фотовольтаическими элементами анализировалась в течение трех месяцев. Рассматривались следующие характеристики: изменение напряжения на аккумуляторах, изменение напряжения на солнечных панелях, изменение мощности нагрузки, фиксировалось использование внешней сети. Микросеть как подключалась к сети, так и отключалась для проведения эксперимента с автономной работой. В качестве потребителей для исследований были использованы система освещения и система вентиляции в служебном помещении. Текущее расположение панелей является фиксированным. Механизм адаптации под наиболее оптимальное для календарного периода или времени суток положение повысит эффективность данного узла микросети. Однако, для исследования это допущение не имеет критической важности.

3.2. Система мониторинга. Идея системы мониторинга основана на предоставлении удаленного доступа к данным работы микросети. Логическая схема взаимодействия с данными показана на рисунке 3.

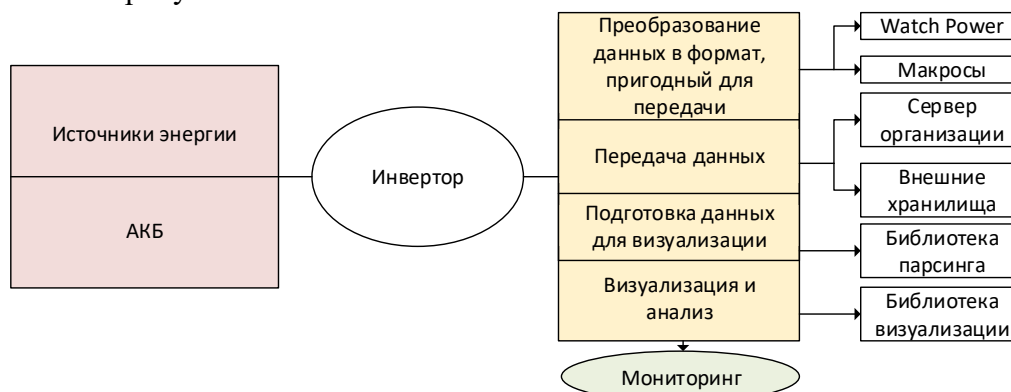


Рис. 3. Логическая схема взаимодействия с данными

Важным условием при проектировании микросети было объединение регистрируемых потоков данных в едином формате, пригодном для анализа и сопоставления. Это было реализовано корректным выбором инвертора и сопутствующего программного обеспечения, а также использованием наборов макросов. Регистрируемые данные содержатся в формате базы данных и конвертируются в пригодный для передачи формат CSV.

Передача данных реализована на текущий момент в виде статической ссылки на таблицу, которая может быть размещена как на базе доступного внешнего хранилища, так и на внутренних серверных хранилищах. Обновление данных происходит с суточной частотой, этого достаточно для функций мониторинга. В дальнейших работах будет осуществлен переход на обновление в режиме реального времени.

Обработка данных происходит на стороне серверной структуры, с использованием языка JavaScript и бесплатной библиотеки Papaparse [16]. В ходе обработки происходят необходимые преобразования формата данных, фильтрация, запись соответствующих параметров в переменные.

Интерфейс, доступный пользователю, представляет собой веб-страницу, содержащую графическое представление характеристик микросети в зависимости от времени. Пользователю доступно меню выбора одного из регистрируемых параметров системы. Графическое

представление данных осуществляется с помощью бесплатной библиотеки Google Charts. Выбор этой библиотеки обусловлен лучшей производительностью по сравнению с аналогами, так как это важно при больших объемах обрабатываемых данных.

Страница написана на языке гипертекстовой разметки HTML, взаимодействие с данными осуществляется с помощью языка JavaScript и указанных ранее бесплатных библиотек. Для оформления используются элементы языка CSS.

3.3. Анализ работы микросети. Внедрение системы мониторинга облегчило проведение анализа работы микросети. Минимальное напряжение на блоке аккумуляторов составило 11,72 В, максимальное – 14 В. В ходе эксплуатации фиксировался заряд аккумуляторного блока. На рисунке 4 представлена ситуация, при которой в ночное время зарегистрировано снижение уровня заряда ниже допустимого и была использована внешняя сеть для зарядки аккумуляторов. На следующий день заряд восполнялся в рабочее время с помощью газогенератора.

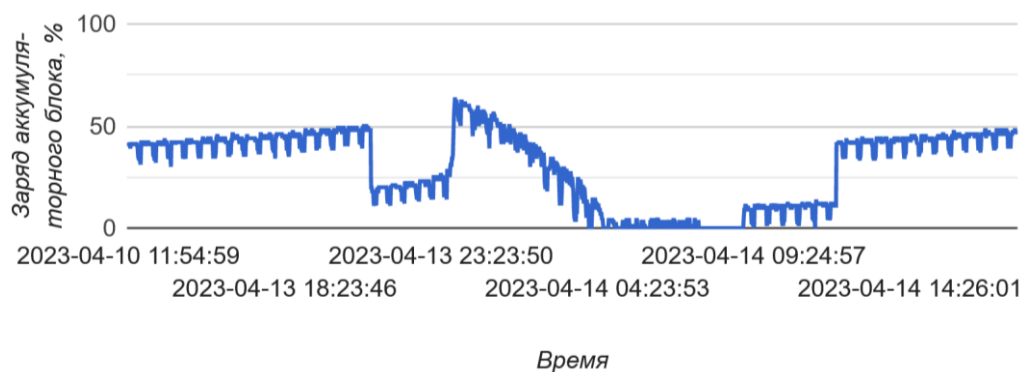


Рис. 4. Пример использования системы мониторинга для изучения микросети

Вертикальная ось отражает заряд аккумуляторов (%), горизонтальная ось – дату и время

В ходе анализа накопленных данных было отмечено, что микросеть обеспечивает стабильную работу потребителей не только за счет использования генератора и газификатора, но и за счет отсутствия нагрузки в ночное время суток в большинстве случаев. Это существенно снижает уровень потребления. Также фиксировался стабильный уровень напряжения аккумуляторного блока (рис. 5).

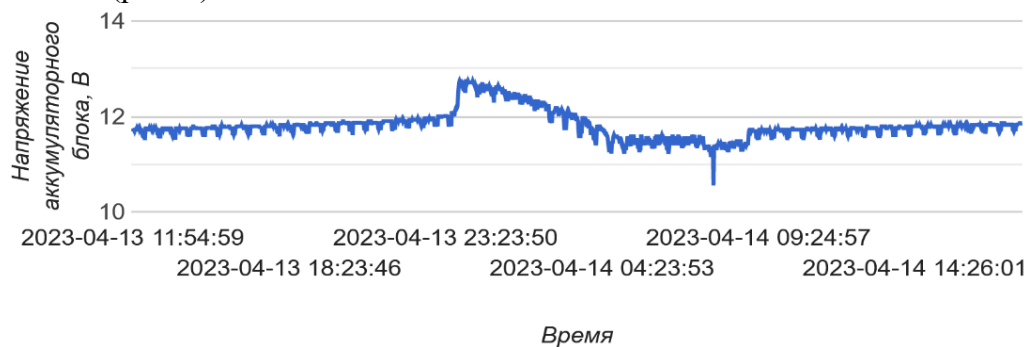


Рис. 5. Пример использования системы мониторинга для изучения микросети

Вертикальная ось отражает напряжение аккумуляторного блока, горизонтальная ось – дату и время

Ниже представлены данные из открытых источников [17] о величине облучения поверхности в точке установки панели пучком солнечных лучей (таблица 1):

Таблица 1. Данные о величине облучения панели пучком солнечных лучей

Месяц	Солнечная инсоляция, кВт*ч/м ²	Месяц	Солнечная инсоляция, кВт*ч/м ²
Январь	1,65	Июль	5,61
Февраль	2,98	Август	4,73

Март	4,43	Сентябрь	3,50
Апрель	5,29	Октябрь	2,43
Май	5,58	Ноябрь	1,85
Июнь	5,73	Декабрь	1,14

Обработка данных об инсоляции, совмещенная с данными мониторинга, позволяет вносить изменения в режимы работы установки. В месяцы низкой солнечной инсоляции требуется обеспечение работоспособности системы за счет более частого использования газификатора биомассы. Также, эти данные указывают на более высокую актуальность системы в регионах с большим количеством солнечных дней и большей величиной инсоляции относительно текущего расположения.

Основополагающей задачей при описании микросети является создание прогностической модели для различных сценариев работы. Одним из решений этой задачи является использование мониторинговых и аналитических инструментов при наличии достаточно большой базы данных.

Система мониторинга позволяет отслеживать и анализировать возникающие ситуации. Так, при мониторинге системы были замечены периоды полной или почти полной разрядки аккумуляторного блока при отсутствии солнечного света и были приняты меры по запуску электрогенераторных систем.

В ходе мониторинга были выявлены пики энергопотребления, связанные с началом и окончанием рабочего времени. Было установлено, что средняя продолжительность работы фотовольтаических элементов составляет 9 часов, согласно расположению панелей и влиянию окружающих объектов. Выявлено, что использования только солнечных элементов хватает для поддержания стабильной работы потребителей. Проведенные эксперименты показали, что использования солнечных элементов и накапливаемой энергии достаточно для запуска и поддержания работы систем газогенератора. Выявлено снижение эффективности солнечных элементов на 15% в зимний период.

Представленные аналитические данные являются основой для последующих работ, связанных с углубленным исследованием работы микросети в различных условиях и режимах.

Заключение. В ходе работы была создана система мониторинга работы микросети лабораторного масштаба. По результатам сбора и анализа данных работы системы было установлено, что при текущей конфигурации поддерживалась автономная работа и был удовлетворен спрос потребителей. За счет фотоэлектрической энергии удавалось поддерживать автономную работу в дневное время, а аккумуляторный блок накапливал избыток электроэнергии для последующей работы микросети в ночное время. При необходимости, микросеть автоматически подключалась к узлу генератора и использовала накопленную в аккумуляторах электроэнергию.

Разработанная система является примером применения современных информационных технологий для решения научных проблем.

Текущая конфигурация системы мониторинга позволяет решать задачу удаленного доступа к данным о режимах работы микросети. Однако, в последующих работах система будет дополнена новыми функциями: автоматизированным и более частым обновлением данных, улучшенной фильтрацией данных по датам, системой удаленного управления.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2022-1215) с использованием оборудования ЦКП «Высокотемпературный контур».

Список источников

1. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z., et al. A comprehensive review of international renewable energy growth. Energy and built environment, 2024, ISSN 2666-1233, DOI:10.1016/j.enbenv.2023.12.002
2. He W., Abbas Q., Alharthi M., et al. Integration of renewable hydrogen in light-duty vehicle: Nexus between energy security and low carbon emission resources. International journal of hydrogen energy, 2020, vol. 45, iss. 51, pp. 27958-27968, DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.06.177
3. Sathish T., Agbulut Y., George S.M., et al. Waste to fuel: Synergetic effect of hybrid nanoparticle usage for the improvement of CI engine characteristics fuelled with waste fish oils. Energy, 2023, vol. 275, 127397, DOI:10.1016/j.energy.2023.127397
4. Abdin Z., Hhalaf N. Al, McGrath B. Feasibility of hydrogen hybrid energy systems for sustainable on- and off-grid integration: An Australian REZs case study. International journal of hydrogen energy, 2024, vol. 57, pp. 1197-1207, DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.01.122
5. Харченко В.В. Микросети на основе ВИЭ: концепция, принципы построения, перспективы использования / В.В. Харченко // Энергия: экономика, техника, экология, 2014. – № 5. – С. 20-27. – EDN SEQBFP
6. Sepasi S., Toledo S., Koabayashi J., et al. A practical solution for excess energy management in a diesel-backed microgrid with high renewable penetration. Renewable energy, 2023, vol. 202, pp. 581-588, DOI:10.1016/j.renene.2022.11.114
7. Stevanato N., Pellecchia G., Sangiorgio I., et al. Planning third generation minigrids: Multi-objective optimization and brownfield investment approaches in modelling village-scale on-grid and off-grid energy systems. Renewable and sustainable energy transition, 2023, vol. 3, 100053, DOI:10.1016/j.rset.2023.100053
8. Сейфуллин А.Ю. Задачи и стратегия управления конфигурацией сельской микросети, содержащей возобновляемые источники энергии / А.Ю. Сейфуллин, А.В. Виноградов, А.В. Виноградова // Вестник Казанского государственного аграрного университета, 2021. – Т. 16, – № 3(63). – С. 90-97. – DOI:10.12737/2073-0462-2021-90-97. – EDN AHMPSE.
9. Законьшек Я. Моделирование микросети с подключением силового оборудования в реальном масштабе времени / Я. Законьшек, Ф.А. Иванов, М.А. Шамис // Энергия единой сети, 2019. – № 1(43). – С. 58-67. – EDN ZYZUJN.
10. Ajay Kumar Bansal Sizing and forecasting techniques in photovoltaic-wind based hybrid renewable energy system: A review, Journal of cleaner production, 2022, vol. 369, 133376, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.133376
11. Afonaa-Mensah S., Odoi-Yorke F., Majeed I.B. Evaluating the impact of industrial loads on the performance of solar PV/diesel hybrid renewable energy systems for rural electrification in Ghana. Energy conversion and management: X, 2024, vol. 21, 100525, DOI:10.1016/j.ecmx.2024.100525
12. Kang H., Jung S., Kim H., et al. Multi-objective sizing and real-time scheduling of battery energy storage in energy-sharing community based on reinforcement learning. Renewable and sustainable energy reviews, 2023, vol. 185, 113655, DOI:10.1016/j.rser.2023.113655
13. Иванов Р.А. Организация мониторинга параметров экспериментального стенда солнечных панелей / Р.А. Иванов, Н. В. Максаков // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 4(24). – С. 77-87. – DOI:10.38028/ESI.2021.24.4.008. – EDN IIRJJB.
14. Acresto. Informer technologies, available at: <https://acresso.software.informer.com/> (accessed: 06/09/2024)
15. Charts. Google for Developers, available at: <https://developers.google.com/chart?hl=ru> (accessed: 06/10/2024).
16. Papa Parse. Powerful CSV Parser for JavaScript, available at: <https://www.papaparse.com/> (accessed: 06/10/2024).
17. Значение солнечной инсоляции в г. Иркутск (Иркутская область). Betaenergy – URL: <https://www.betaenergy.ru/insolation/irkutsk/> (дата обращения: 10.06.2024).

Баденко Владислав Вадимович. Инженер-исследователь, аспирант отдела теплоэнергетических систем ИСЭМ СО РАН. Основные направления исследований - термохимическая конверсия биомассы, численное моделирование процессов горения и комбинированные энергетические установки для разложения биомассы. AuthorID: 1186521, SPIN: 5115-6229, ORCID: 0009-0007-0992-564X, badenko@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Козлов Александр Николаевич. Кандидат технических наук, заведующий лабораторией термодинамики, отдел теплоэнергетических систем ИСЭМ СО РАН. Основные направления исследований - сжигание гетерогенных твердых топлив (биомасса, уголь) и разработка инженерных методов расчета процесса газификации. AuthorID: 217821, SPIN: 5451-8611, ORCID: 0000-0002-5983-5884, kozlov@isem.irk.ru, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

UDC 620.91

DOI:10.25729/ESI.2024.35.3.006

Initial analysis of the performance of a laboratory-scale hybrid microgrid using a monitoring system

Vladislav V. Badenko, Alexander N. Kozlov

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, *badenko@isem.irk.ru*

Abstract. One of the directions of the modern energy industry is the development of systems involving the utilization of solar energy, wind energy, and the recycling of secondary energy resources (waste). This paper considers an energy system, denoted as a laboratory-scale hybrid microgrid, that incorporates the use of such sources. The energy system includes solar panels, a biomass gasifier, and an electric generator. Of great importance for such systems are monitoring tools to analyze the modes of operation and make modifications. With this in mind, a monitoring system was developed to track various parameters of the laboratory equipment. Thanks to the developed system, data on the operation of the microgrid was obtained, and its limitations and weaknesses were identified.

Keywords: solar energy, biomass, monitoring

Acknowledgements: The research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (no. 075-15-2022-1215) using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center

References

1. Hassan Q., Algburi S., Sameen A.Z., et al. A comprehensive review of international renewable energy growth. Energy and built environment, 2024, ISSN 2666-1233, DOI:10.1016/j.enbenv.2023.12.002
2. He W., Abbas Q., Alharthi M., et al. Integration of renewable hydrogen in light-duty vehicle: Nexus between energy security and low carbon emission resources. International journal of hydrogen energy, 2020, vol. 45, iss. 51, pp. 27958-27968, DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.06.177
3. Sathish T., Agbulut Y., George S.M., et al. Waste to fuel: Synergetic effect of hybrid nanoparticle usage for the improvement of CI engine characteristics fuelled with waste fish oils. Energy, 2023, vol. 275, 127397, DOI:10.1016/j.energy.2023.127397
4. Abdin Z., Hhalaf N. Al, McGrath B. Feasibility of hydrogen hybrid energy systems for sustainable on- and off-grid integration: An Australian REZs case study. International journal of hydrogen energy, 2024, vol. 57, pp. 1197-1207, DOI:10.1016/j.ijhydene.2024.01.122
5. Harchenko V.V. Mikroseti na osnove VIE: koncepciya, principy postroeniya, perspektivy ispol'zovaniya [Microgrids based on RES: concept, principles of construction, prospects of use]. Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya [Energy, Economy, Technology, Ecology], 2014, no. 5, pp. 20-27.
6. Sepasi S., Toledo S., Koabayashi J., et al. A practical solution for excess energy management in a diesel-backed microgrid with high renewable penetration. Renewable energy, 2023, vol. 202, pp. 581-588, DOI: 10.1016/j.renene.2022.11.114
7. Stevanato N., Pellicchia G., Sangiorgio I., et al. Planning third generation minigrids: Multi-objective optimization and brownfield investment approaches in modelling village-scale on-grid and off-grid energy systems. Renewable and sustainable energy transition, 2023, vol. 3, 100053, DOI:10.1016/j.rset.2023.100053
8. Seyfullin A.Y., Vinogradov A.V., Vinogradova A.V. Zadachi i strategiya upravleniya konfiguraciej sel'skoj mikroseti, soderzhashchej vozobnovlyaemye istochniki energii [Objectives and strategy for managing the configuration of a rural micro-grid containing renewable energy sources]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Kazan state agrarian university], 2021, vol.16, no.3, pp. 90-97, DOI:10.12737/2073-0462-2021-90-97
9. Zakonshek Y., Ivanov F.A., Shamis M.A. Modelirovanie mikroseti s podklyucheniem silovogo oborudovaniya v real'nom masshtabe vremeni [Modeling of microgrid with power equipment connection in real time]. Energy of the Energiya yedinoj seti [Unified Grid], 2019, no. 1, pp. 58-67.
10. Ajay Kumar Bansal Sizing and forecasting techniques in photovoltaic-wind based hybrid renewable energy system: A review, Journal of cleaner production, 2022, vol. 369, 133376, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.133376
11. Afonaa-Mensah S., Odoi-Yorke F., Majeed I.B. Evaluating the impact of industrial loads on the performance of solar PV/diesel hybrid renewable energy systems for rural electrification in Ghana. Energy conversion and management: X, 2024, vol. 21, 100525, DOI:10.1016/j.ecmx.2024.100525
12. Kang H., Jung S., Kim H., et al. Multi-objective sizing and real-time scheduling of battery energy storage in energy-sharing community based on reinforcement learning. Renewable and sustainable energy reviews, 2023, vol. 185, 113655, DOI:10.1016/j.rser.2023.113655

13. Ivanov R.A., Maksakov N.V. Organizaciya monitoringa parametrov eksperimental'nogo stenda solnechnyh panelj [Organization of monitoring of the parameters of the experimental stand of solar panels]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no.24, pp. 77-87, DOI:10.38028/ESI.2021.24.4.008
14. Acresto. Informer technologies, available at: <https://acresso.software.informer.com/> (accessed: 06/09/2024)
15. Charts. Google for Developers, available at: <https://developers.google.com/chart?hl=ru> (accessed: 06/10/2024).
16. Papa Parse. Powerful CSV Parser for JavaScript, available at: <https://www.papaparse.com/> (accessed: 06/10/2024).
17. Znachenie solnechnoj insoljatsii v g. Irkutsk (Irkutskaja oblast') [Value of solar insolation in Irkutsk (Irkutsk region)]. Betaenergy, available at: <https://www.betaenergy.ru/insolation/irkutsk/> (accessed: 06/10/2024).

Vladislav Vadimovich Badenko. *Research engineer, postgraduate student of the heat and power systems department of ISEM SB RAS. Main research areas - thermochemical conversion of biomass, numerical modelling of combustion processes and combined heat and power plants for biomass decomposition. AuthorID: 1186521, SPIN: 5115-6229, ORCID: 0009-0007-0992-564X, badenko@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermontova St., 130.*

Alexander Nikolaevich Kozlov. *Senior researcher (PhD) at the department of thermal power systems at ESI SB RAS. His research interests focus on heterogeneous solid fuel (biomass, coal) combustion and the design of simple engineering techniques for the calculation of the gasification process. AuthorID: 217821, SPIN: 5451-8611, ORCID: 0000-0002-5983-5884, kozlov@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermontova St., 130.*

Статья поступила в редакцию 18.06.2024; одобрена после рецензирования 16.07.2024; принята к публикации 10.10.2024.

The article was submitted 06/18/2024; approved after reviewing 07/16/2024; accepted for publication 10/10/2024.