

УДК 004.942

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОСЕТЕЙ

**Чекан М.А.***ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН»,  
Иркутск, e-mail: chekoopa@mail.ru*

Статья фокусируется на проблеме моделирования микросетей – локальных систем энергетики, характеризующихся наличием собственных инфраструктур, в общем случае способных к автономной работе и включающих разнообразные источники генерации энергии. В настоящее время данная проблема является чрезвычайно актуальной, так как определение требуемых структурных и параметрических характеристик таких сложных систем обуславливает необходимость проведения исследований различных режимов их функционирования с разными конфигурациями используемых источников генерации энергии. Как правило, в процессе моделирования изучаются такие свойства микросетей, как их живучесть и надёжность, способность к самоорганизации, возможности регулирования спроса и предложения энергоресурсов, степень использования возобновляемых ресурсов и другие важные особенности. В статье проводится сравнительный анализ известных инструментальных средств, разрабатываемых и применяемых для автоматизации процесса моделирования микросетей. Выделяются ключевые характеристики, которыми должны обладать такие инструментальные средства. Обсуждаются функциональные возможности рассматриваемых средств. Показывается, что для эффективного исследования микросетей необходимо применение развитых средств построения их моделей, подготовки и проведения крупномасштабных экспериментов с использованием параллельных и распределённых вычислений. Выделяются возможные направления подобных инструментальных средств.

**Ключевые слова:** микросети, моделирование, автоматизация, инструментальные средства, сравнительный анализ

## COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE FOR AUTOMATING THE PROCESS OF MICROGRID MODELING

**Chekan M.A.***Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS,  
Irkutsk, e-mail: chekoopa@mail.ru*

The paper focuses on the problem of microgrid modeling. Microgrids are local energy systems characterized by the presence of their own infrastructures. Microgrids are generally capable of autonomous operation and include various sources of power generation. At present, the problem is significantly relevant, since the determination of the required structural and parametric characteristics of such complex systems necessitates studying various modes of their operation with different configurations of power generation. Generally, modeling is used to study such properties of microgrids as their survivability and reliability, the ability to self-organize, the ability to regulate the supply and demand of energy resources, the degree of renewable resources usage, and other important features. The paper provides a comparative analysis of well-known tools developed and used to automate the process of microgrid modeling. It also highlights key characteristics that such tools should have. The functionality of the described tools is discussed. It is shown that for the effective study of microgrids, it is necessary to use advanced tools for building their models, and preparing and conducting large-scale experiments using parallel and distributed computing. Possible directions for such tools are highlighted.

**Keywords:** microgrid, modeling, automation, tools, comparative analysis

В настоящее время решение вопросов, связанных с интеллектуализацией и цифровизацией технологий обработки и анализа данных применительно к исследованию процессов функционирования экологически чистых и ресурсосберегающих систем энергетики, является составной частью ключевых направлений развития энергетики как в России, так и за рубежом. При этом в последнее десятилетие новым важным технологическим трендом в области развития энергетики является развитие микросетей [1]. В этой связи актуализируется проблема моделирования таких сетей.

Целью исследования является сравнительный анализ известных инструменталь-

ных средств, разрабатываемых и применяемых для моделирования микросетей.

### Материалы и методы исследования

*Микросети.* Микросеть (рис. 1) представляет собой локальную систему энергетики со своей собственной энергетической инфраструктурой, в общем случае способной к автономной работе [2]. Такая система характеризуется использованием разнообразных технологий распределённой генерации энергии, в том числе возобновляемых источников энергии (солнечных батарей и ветрогенераторов), а также различных накопителей энергии. Как правило, диверсификация источников энергии в микросети

способствует повышению её энергонезависимости и надёжности поставок электроэнергии потребителям, а также улучшению распределения энергоресурсов, экологичности и других критериев качества работы сети. В частности, использование микросетей имеет ключевое значение для уникальных природных территорий с точки зрения поддержки природосбережения.

Каждый регион имеет свои драйверы развития и внедрения микросетей, постепенно переходя на них в рамках строительства новых энергосетей и обновления существующих. Совокупная мощность микросетей стабильно растёт от года к году. Так, аналитики [3] утверждают, что она превысит 29 ГВт к 2029 г. График с прогностическими данными приведён

на рис. 2. Но микросети являются частью энергетической инфраструктуры, которая в свою очередь представляет собой сложную человеко-машинную систему. Определение допустимой или тем более оптимальной структуры, состава и значений характеристик такой сложной системы невозможно без проведения исследований различных режимов работы входящих в её состав подсистем и всей системы в целом. Так как проведение натурных экспериментов является весьма затратным, а часто вообще невозможным, то необходимы исследования, поддерживающие анализ структуры микросетей и выявление необходимых условий их работы путём моделирования и проведения вычислительных экспериментов.



Рис. 1. Компоненты микросети

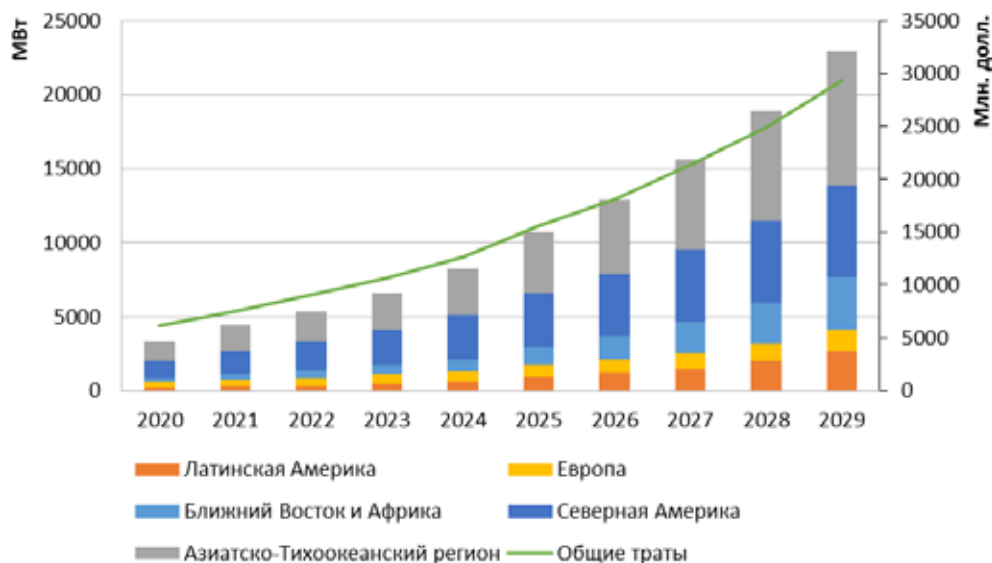


Рис. 2. Совокупная мощность микросетей и прибыль от их эксплуатации

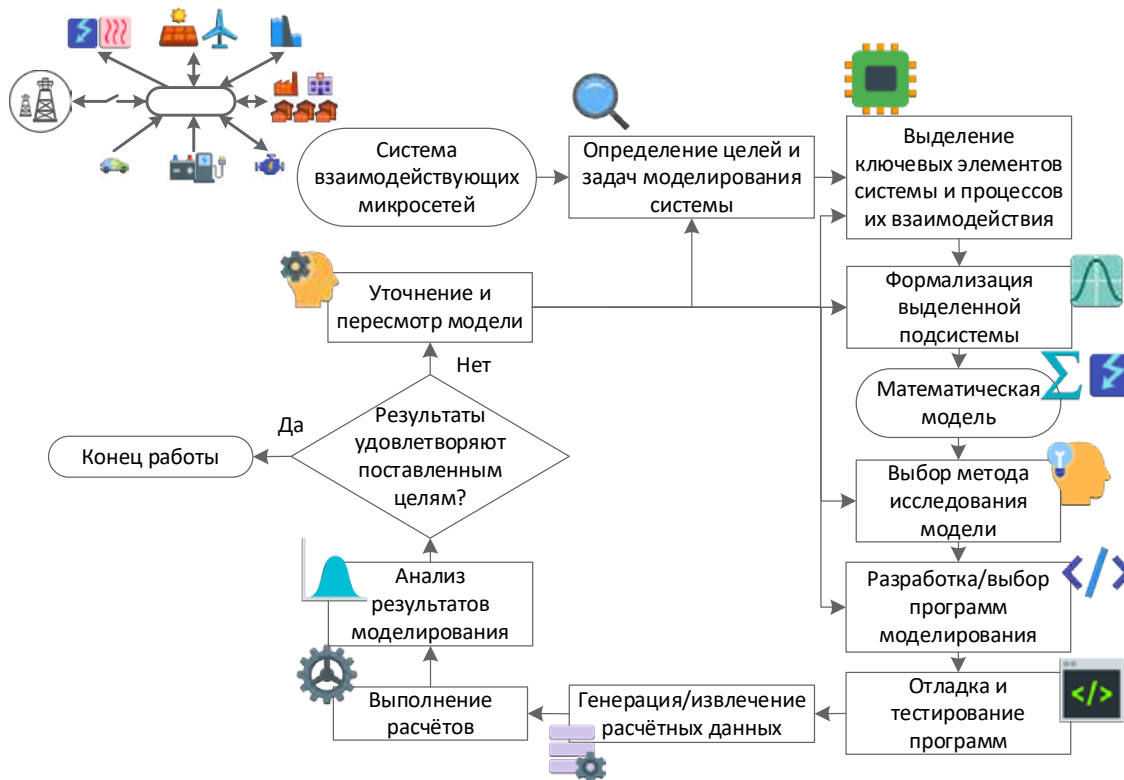


Рис. 3. Схема работы с моделью микросети

Сравнительный анализ средств автоматизации моделирования микросетей. Исследование микросети как сложной системы на основе математического моделирования обуславливает следующие характеристики модели микросети: большое число переменных её модели и математических уравнений, описывающих зависимости между этими переменными; присутствие в модели случайных величин с различными законами их распределения; разнообразие связей между элементами модели; наличие ограничений разных типов и зависимости от времени. Этапы создания и применения модели микросети приведены на рис. 3. Очевидно, что решение задачи анализа показателей работы микросети с учётом взаимодействия с другими подобными системами обоснованно требует привлечения развитых методов и средств построения её модели, а также подготовки и проведения экспериментов с использованием параллельных и распределённых вычислений, в том числе ресурсоёмких расчётов в гетерогенной распределённой вычислительной среде (ГРВС).

В настоящее время как в России, так и за рубежом наблюдается тенденция разработки специализированных методов

и инструментальных средств автоматизации анализа процессов работы микросетей, включая их взаимодействие между собой. Результаты подобных исследований отражены в широком спектре работ российских и зарубежных учёных [4–6].

Основываясь на этих результатах, можно утверждать, что передовые методы и средства в данной области исследования базируются на применении методов экономического регулирования спроса и предложения энергоресурсов, многокритериального анализа эффективности и сбалансированности их генерации, распределения и потребления, а также специализированных мультиагентных технологий принятия решений. Здесь, как правило, мультиагентные технологии направлены на автоматизацию и интеллектуализацию процесса принятия решений путем делегирования прав и обязанностей субъектов микросети программным сущностям (агентам), динамически выполняющим согласование противоречивых в общем случае критериев на основе конкуренции и кооперации в процессе самоорганизации мультиагентной системы, осуществляемой в автоматическом режиме.

Исходя из специфики решаемой задачи можно выделить следующие ключевые

характеристики, необходимые для средств автоматизации моделирования микросетей:

- средства описания предметной области (UML, XML, JSON, семантическая сеть и др.);

- определяемые параметры сети и её элементов (структурные, функциональные);

- масштаб моделируемой сети (отдельная сеть, кластер микросетей) и критерии оценки её работы (стоимость, объём выбросов, надёжность, живучесть и др.);

- моделируемые экономические механизмы регулирования спроса и предложения энергоресурсов и вид моделирования процесса функционирования микросетей (аналитическое, имитационное, агентное или комбинированное моделирование);

- архитектура прикладного программного обеспечения (монологичное приложение, библиотека программ, пакет прикладных программ и т.п.), вид приложения (десктопное, сетевое, сервис-ориентированное и др.), вычислительная среда (ПК, НРС-кластер, Grid-система, облачная среда, платформа туманных вычислений, гетерогенная вычислительная среда) и масштабируемость вычислений (низкая, средняя, высокая);

- анализ результатов моделирования (однокритериальный или многокритериальный);

- способ использования, распространения и поддержки программного обеспечения.

Разработан широкий спектр специализированных моделей, алгоритмов, методов и средств поддержки исследования микросетей (например, [7–9]). В частности, в работе [10] демонстрируется применение системы Matlab для моделирования функционирования микросетей. В ней рассматривается реализация стратегии управления при работе без внешней сети. Стратегия доказала свою эффективность в удовлетворении критического спроса при помощи микроисточников и накопителей. Однако возможности этой системы для анализа и прогнозирования весьма ограничены, поскольку модель предлагается в качестве учебной.

В работе [11] приводится описание мультиагентной модели микросети, обозначенной как «активный потребитель». Рассматриваемая микросеть состоит из обобщённого производственного цеха, представленного тремя типами станков, и распределённой солнечно-ветровой генерации. Модель разработана в имитационной среде AnyLogic и позволяет варьировать параметры для проведения экспериментов и проверки гипотез. Авторы подчёркивают успешность запуска модели и делают вывод о состоятельности выбранного подхода. В то же время данная модель ограничена

единственной предметной областью. Будучи сфокусированной на экономическом критерии, она не предусматривает работу без внешней сети или возможность расширения элементами с иным поведением.

В работе [12] рассматривается применение программного обеспечения HOMER для проектирования и анализа характеристик микросети, состоящей из системы солнечных и ветряных генераторов, а также дизельной электростанции. Авторы привели процесс описания модели (к слову, достаточно подробно проработанной) и её оптимизации, в результате которой определяется наилучшая возможная конфигурация моделируемой системы. В то же время некоторые случаи анализа требуют интеграции с внешними системами. Официальный сайт HOMER [13] упоминает функцию подключения системы Matlab, правда, лишь для алгоритма распределения (dispatch). HOMER не поддерживает интеграцию с внешними моделями и, более того, представляет собой монологичное desktop-приложение, в то время как многие сценарии анализа и прогноза требуют большего масштаба расчётов, предполагающего применение облачных и туманных вычислений.

Здесь следует упомянуть Calliope [14] – один из открытых свободных аналогов HOMER. Это программное обеспечение использует текстовое описание модели на языке разметки YAML, поддерживает распределённые вычисления, а также интерактивные графики и визуализации, естественные для языка программирования Python, на котором и реализовано Calliope. Математическая модель в Calliope по большей части фиксирована и сложно поддаётся расширению, в том числе в части механизмов распределения ресурсов. С другой стороны, Calliope является полноценным инструментом моделирования, который может служить примером и даже основой для разработки новых программных средств.

Тенденцию к универсальности и открытости также поддерживает oemof [15], позиционирующийся как набор инструментов (фреймворк) для моделирования и оптимизации энергетических систем, а именно модели компонентов энергосистемы (источники, потребители, шины) для построения топологии и интерфейс для подключения оптимизатора (solph). В частности, авторы подчёркивают гибкость фреймворка, призванную обеспечить моделирование систем с постоянно растущей сложностью и склонностью к децентрализации. Это позволяет говорить о возможности задавать как собственные элементы модели, так и собствен-

ный механизм балансировки. При этом сам по себе фреймворк не решает поставленную задачу и используется сторонними разработчиками для создания кода под конкретный сценарий, что очевидно требует знания языка программирования Python 3 и делает oemof менее доступным. Также предлагаемый модуль оптимизации не предусматривает использование распределённых вычислений, что ограничивает эффективный масштаб производимых расчётов.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В таблице приведены характеристики ряда программных средств моделирования микросетей. Результаты анализа рассмотренных средств показывают, что ряд вопросов, включая исследование моделей различных масштабов с разными механизмами балансировки энергоресурсов, поддержку внешних моделей и их гибкую настройку на специфику решаемых задач, а также адаптацию этих средств к применению в ГРВС, не решён в полной мере. Можно заметить, что основной сферой применения рассмотренных систем является аналитическое моделирование отдельно взятой микросети со встроенными механизмами балансировки энергоресурсов на ПК. Моделирование взаимодействия микросетей поддерживается только в Calliope и oemof. При этом Calliope обеспечивает использование НРС-кластера. Учёт аспектов ин-

теллектуального управления микросетью возможен в AnyLogic, где поддерживается мультиагентное моделирование. Использование внешних моделей ограничено во всех рассматриваемых средствах. Таким образом, актуальными направлениями развития подобных инструментальных средств являются поддержка их интеграции с внешними моделями, алгоритмами работы и взаимодействия микросетей, а также применение в параллельных и распределённых вычислительных системах.

#### Заключение

Проведён сравнительный анализ средств автоматизации моделирования микросетей. Концепция микросетей сочетает передовые технологии и разработки в области энергетики, телекоммуникаций и обработки информации для построения саморегулирующихся и более надёжных, по сравнению с традиционными, систем энергетики. Применение микросетей приводит к повышению эффективности энергоснабжения, оптимальному использованию существующей инфраструктуры, минимизации необходимости в её расширении, облегчению интеграции возобновляемых источников энергии, особенно в форме распределённой генерации на стороне потребителя. Результаты анализа средств автоматизации моделирования микросетей позволили выделить ключевые направления их развития.

Сводная таблица характеристик средств моделирования микросетей

Средство моделирования	Масштаб модели	Механизм балансировки энергоресурсов	Поддержка внешних моделей	Тип моделирования	Вычислительная среда
На основе MatLab	Микросеть	Встроенный	Отсутствует	Аналитическое	ПК
На основе AnyLogic	Микросеть	Встроенный	Отсутствует	Мультиагентное, имитационное	ПК
НOMER	Микросеть	Встроенный или пользовательский алгоритм распределения из MatLab	Частичная	Аналитическое	ПК
Calliope	Кластер (с помощью секторов)	Встроенный или пользовательский (через модификацию кода Calliope)	Частичная	Аналитическое	ПК, НРС-кластер
oemof	Любой	Встроенный или пользовательский модуль	Поддерживается на уровне дополнительного кода	Аналитическое	ПК

**Список литературы**

1. Alomoush M.I. Microgrid combined power-heat economic-emission dispatch considering stochastic renewable energy resources, power purchase and emission tax. *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 200. P. 112090. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112090.
2. Ton D.T., Smith M.A. The US department of energy's microgrid initiative. *The Electricity Journal*. 2012. Vol. 25. No. 8. P. 84–94. DOI: 10.1016/j.tej.2012.09.013.
3. Asmus P., Gunjan P. DER Deployments for Microgrids. *Guidehouse Insights*. 3Q 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://guidehouseinsights.com/reports/der-deployments-for-microgrids> (дата обращения: 25.08.2022).
4. Hirsch A., Parag Y., Guerrero J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 90. P. 402–411. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.040.
5. Han Y., Zhang K., Li H., Coelho E.A.A., Guerrero J.M. MAS-based Distributed Coordinated Control and Optimization in Microgrid and Microgrid Clusters: A Comprehensive Overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33. No. 8. P. 6488–6508. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2761438.
6. Sharma S., Sood Y.R. Microgrids: A Review of Status, Technologies, Software Tools, and Issues in Indian Power Market. *IETE Technical Review*. 2020. Vol. 39. P. 411–432. DOI: 10.1080/02564602.2020.1850367.
7. Kariniotakis G.N., Soultanis N.L., Tsouchnikas A.I., Papathanasiou S.A., Hatzigargyriou N.D. Dynamic modeling of microgrids. *Proceedings of the International Conference on Future Power Systems*. IEEE. 2005. P. 1–3. DOI: 10.1109/FPS.2005.204227.
8. Francés A., Asensi R., García O., Prieto R., Uceda J. How to model a DC microgrid: Towards an automated solution. *Proceedings of the Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*. IEEE. 2017. P. 609–616. DOI: 10.1109/ICDCM.2017.8001110.
9. Feng W., Jin M., Liu X., Bao Y., Marnay C., Yao C., Yu J. A review of microgrid development in the United States – A decade of progress on policies, demonstrations, controls, and software tools. *Applied energy*. 2018. Vol. 228. P. 1656–1668. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.06.096.
10. Basak P., Saha A.K., Chowdhury S. Microgrid: Control techniques and modeling. *Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. IEEE. 2009. P. 1–5. [Электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5429547> (дата обращения: 25.08.2022).
11. Роженцова Н.В., Регир О.С., Коцюбинский А.В. Многоагентный подход к моделированию активных потребителей // *Вестник КГЭУ*. 2019. № 2 (42). С. 47–55.
12. Restrepo D., Restrepo-Cuevas B., Trejos A. Microgrid analysis using HOMER: a case study. *DYNA*. 2018. Vol. 85. No. 207. P. 129–134. DOI: 10.15446/dyna.v85n207.69375.
13. HOMER Pro. URL: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html> (дата обращения: 25.08.2022).
14. Pfenninger S., Pickering B. Calliope: a multi-scale energy systems modelling framework. *Journal of Open Source Software*. 2018. Vol. 3. No. 29. P. 825. DOI: 10.21105/joss.00825.
15. Hilpert S. et al. The Open Energy Modelling Framework (oemof) – A new approach to facilitate open science in energy system modeling. *Energy strategy reviews*. 2018. Vol. 22. P. 16–25. DOI: 10.1016/j.esr.2018.07.001.