

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МИКРОСЕТЕЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Чэнь С., Ду Я., Цинь Л., Велькин В.И.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
v.i.velkin@urfu.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В данной статье представлен обзор современных подходов к оптимизации планирования микросетей, включая методы многоцелевой оптимизации, учет неопределенностей и применение интеллектуальных алгоритмов. Микросети, как ключевой элемент современных энергетических систем, объединяют распределенные источники энергии, устройства накопления и нагрузки, что позволяет повысить эффективность, надежность и экологичность энергоснабжения. МЕТОДЫ. В работе рассмотрены основные модели оптимизации, такие как минимизация эксплуатационных затрат, снижение выбросов и повышение надежности электроснабжения. Особое внимание уделено методам учета неопределенностей, связанных с возобновляемыми источниками энергии и нагрузкой, а также роли систем накопления энергии и управления спросом. В статье также анализируются традиционные и интеллектуальные алгоритмы оптимизации, включая генетические алгоритмы, методы роя частиц и глубокое обучение. РЕЗУЛЬТАТЫ. Применение современных моделей, таких как SRSM-SOCR, модифицированный алгоритм Bet (MBA), глубокое обучение с подкреплением (DRL) и глубокая рекуррентная нейронная сеть (DRNN), позволило достичь сокращения эксплуатационных издержек микросетей на 18-25%, увеличения доли генерации из возобновляемых источников до 70-75% и снижения выбросов CO₂ до 60%. Также представлены реальные примеры внедрения микросетей в Германии и Греции, подтверждающие эффективность указанных подходов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основе анализа литературы выделены ключевые направления для будущих исследований, такие как интеграция миграционного обучения и глубокого обучения с подкреплением для повышения адаптивности моделей. Результаты исследования могут быть полезны для разработки эффективных стратегий управления микросетями в условиях растущей доли возобновляемых источников энергии и изменяющихся требований к энергосистемам.

Ключевые слова: микросети; оптимизация планирования; многоцелевая оптимизация; неопределенность; интеллектуальные алгоритмы; возобновляемые источники энергии; системы накопления энергии.

Для цитирования: Чэнь С., Ду Я., Цинь Л., Велькин В.И. Оптимизация планирования микросетей: современные подходы и перспективы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 130-152. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-130-152.

OPTIMIZATION OF MICROGRID SCHEDULING: CURRENT APPROACHES AND PROSPECTS

Chen X., Du Y., Qin L., Velkin V.I.

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia
v.i.velkin@urfu.ru

Abstract: THE RELEVANCE. This article provides a review of modern approaches to the optimization of microgrid planning, including multi-objective optimization methods, uncertainty considerations, and the application of intelligent algorithms. Microgrids, as a key component of modern energy systems, integrate distributed energy resources, storage devices, and loads, thereby

enhancing the efficiency, reliability, and environmental sustainability of energy supply. **METHODS.** The paper examines key optimization models, such as minimizing operational costs, reducing emissions, and improving power supply reliability. Special attention is given to methods for addressing uncertainties related to renewable energy sources and load variability, as well as the role of energy storage systems and demand response. The article also analyzes traditional and intelligent optimization algorithms, including genetic algorithms, particle swarm optimization, and deep learning. **RESULTS.** The application of modern models such as SRSM-SOCR, modified Bet algorithm (MBA), deep reinforcement learning (DRL) and deep recurrent neural network (DRNN) made it possible to reduce the operating costs of microgrids by 18-25%, increase the share of generation from renewable sources to 70-75% and reduce CO₂ emissions by up to 60%. Real-life examples of microgrids in Germany and Greece are also presented, confirming the effectiveness of these approaches. **CONCLUSION.** Based on a literature review, key directions for future research are identified, such as the integration of transfer learning and reinforcement learning to enhance model adaptability. The findings of this study can be useful for developing effective microgrid management strategies in the context of increasing renewable energy penetration and evolving energy system requirements.

Keywords: microgrids; planning optimization; multi-objective optimization; uncertainty; intelligent algorithms; renewable energy sources; energy storage systems.

For citation: Chen X., Du Y., Qin L., Velkin V.I. Optimization of microgrid scheduling: current approaches and prospects. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (5): 130-152. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-130-152.

Введение (Introduction)

В последние годы наблюдается стремительный рост использования распределенных источников энергии в микросетях, что привело к активному изучению их различных аспектов в научной литературе. Микросети представляют собой новый тип сетевой структуры управления энергопотреблением, объединяя распределённые источники питания, устройства накопления энергии, преобразователи энергии, нагрузки и другие компоненты. Они формируют автономную систему производства и распределения электроэнергии, способную работать как в параллельном режиме с внешней сетью, так и в автономном режиме 1, структура микросетки показана на рисунке 1. Оптимальное планирование микросетей является важной задачей, направленной на рациональное распределение источников энергии, эффективное взаимодействие с основной сетью и учёт системных ограничений для достижения таких целей, как минимизация эксплуатационных затрат, снижение выбросов и повышение надёжности энергоснабжения 2.

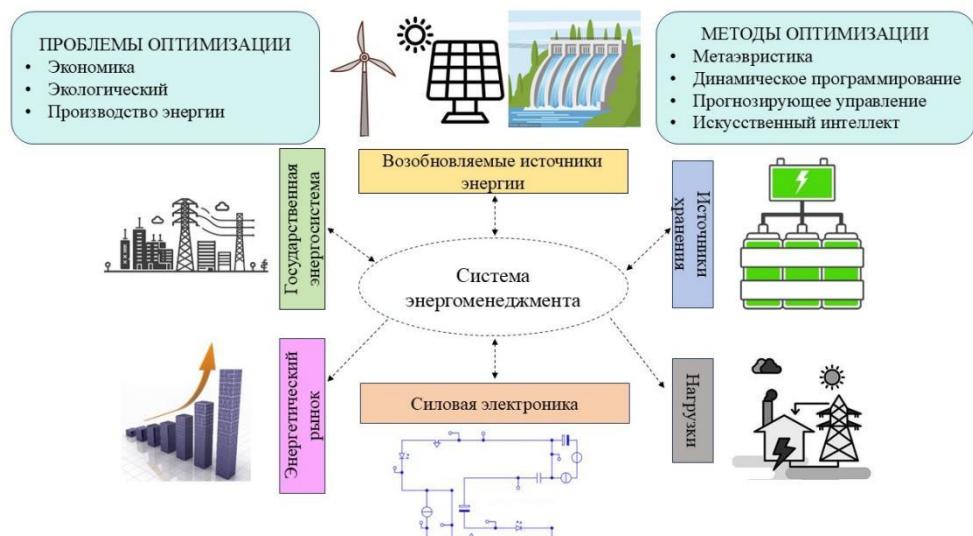


Рис. 1. Структурная схема микросети, иллюстрирующая взаимодействие распределенных источников накопителей и нагрузок

*Источник: [1] Source: [1].

Fig. 1. Structural diagram of a microgrid illustrating the interaction of distributed energy sources, storage devices and loads

Текущие исследования в области оптимизации микросетей охватывают широкий спектр тем. К настоящему времени проведено много исследований по оптимизации расписания в микросетях, например [3-10].

В литературе 3 предложен усовершенствованный алгоритм многоцелевого оптимизатора многомерной вселенной (MOMVO) для стохастической оптимизации мощности генерации в рамках автономно микросетей на основе возобновляемых источников энергии с целью снижения стоимости генерации и потерь электроэнергии. Результаты показывают, что предложенный алгоритм превосходит другие метаэвристические алгоритмы в многоцелевой оптимизации. В литературе 6 предлагается основанная на сценариях модель многоцелевой оптимизации для подключенных к сети микросетей, учитывающая затраты и выбросы углекислого газа, которая позволяет оптимизировать комбинированные экономические и экологические выгоды с помощью нового адаптивного многоцелевого генетического алгоритма (SAMOGA). Аналогичным образом, в литературе 9 достигается экономико-экологическая двузначная оптимизация с помощью оптимизатора grey wolf на основе противоположного градиента (OGGWO). В дополнение к этому, в литературе 10 рассматривается задача обеспечения надежности микросетей и достигается повышение надежности системы с наименьшими затратами за счет использования последовательного генетического алгоритма без доминирования (NSGA-II).

Анализ научной литературы показывает, что за последние пять лет было проведено множество исследований по многоцелевой оптимизации, которые обычно включают минимизацию эксплуатационных расходов 11, сокращение выбросов загрязняющих веществ 12, повышение надежности электроснабжения 13 и удовлетворение потребностей пользователей 14 и т.д. Эти цели часто противоречат друг другу, поэтому основной задачей оптимального планирования для микросетей становится достижение баланса между несколькими целями. Традиционные методы оптимизации часто обнаруживают ограничения при решении нелинейных, многоцелевых задач и задач с неопределенностью. По этой причине все больше и больше исследований начинают фокусироваться на интеллектуальных алгоритмах оптимизации, таких как генетический алгоритм 15, оптимизация роя частиц 16 и глубокое обучение 17. Эти алгоритмы способны не только эффективно решать сложные задачи оптимизации, но и обеспечивать адаптивное планирование в динамичных средах.

Несмотря на то, что большое количество исследований было посвящено оптимальному планированию микросетей, все еще остается много нерешенных вопросов. Во-первых, неопределенности в микросетях (например, нестабильность производства возобновляемой энергии 18, изменения спроса на нагрузку и колебания рыночных цен 19) создают серьезные проблемы для оптимального планирования. Во-вторых, с расширением масштабов микросетей и повышением спроса на совместную работу нескольких микросетей важным направлением исследований стало изучение того, как добиться обмена энергией и совместной оптимизации между несколькими микросетями. Кроме того, миграция и адаптивность интеллектуальных алгоритмов в практических приложениях по-прежнему требуют дальнейших исследований, чтобы обеспечить их универсальность и эффективность в различных системах с микросетями.

Цель исследования заключается в анализе современных подходов к оптимизации планирования микросетей, включая методы многоцелевой оптимизации, учет неопределенностей и применение интеллектуальных алгоритмов. В работе рассматриваются ключевые модели оптимизации, такие как минимизация эксплуатационных затрат, снижение выбросов и повышение надежности электроснабжения. Особое внимание уделяется методам учета неопределенностей, связанных с возобновляемыми источниками энергии и нагрузкой, а также роли систем накопления энергии и управления спросом.

Научная значимость исследования состоит в систематизации современных подходов к оптимизации микросетей, а также в выявлении ключевых направлений для будущих исследований, таких как интеграция миграционного обучения и глубокого обучения с подкреплением для повышения адаптивности моделей.

Практическая значимость исследования заключается в разработке эффективных стратегий управления микросетями в условиях растущей доли возобновляемых источников энергии и изменяющихся требований к энергосистемам. Результаты исследования могут быть использованы для повышения экономической эффективности, экологичности и надежности работы микросетей.

Материалы и методы (Materials and methods)

Многоцелевые модели оптимизации (Multi-objective optimization models)

Микросети обладают значительной экономической, технологической и экологической ценностью. Оптимизация их работы может включать одноцелевые или многоцелевые функции, направленные на максимизацию экономических выгод, экологических преимуществ и надёжности электроснабжения. К числу других целевых функций можно отнести удовлетворённость потребителей 20, способность к сглаживанию пиков и впадин нагрузки 21, а также минимизацию отклонений контактной линии 22. Общая форма многоцелевой оптимизационной модели может быть представлена следующим образом 23:

$$\begin{aligned} \min F(X) &= \min([f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)]^T) & (1) \\ \text{s. t. } X &\in \Omega \\ G(X) &= 0 \\ H(X) &\leq 0 \end{aligned}$$

где X – переменные оптимизации; f_i – i -я целевая функция; Ω – пространство допустимых решений, удовлетворяющих ограничениям задачи; $G(X)$ и $H(X)$ – ограничения в форме уравнений и неравенств.

Оптимизация с учётом экономических выгод

Основная экономическая цель – минимизация совокупных эксплуатационных расходов системы микросетей. Эти расходы включают стоимость топлива, амортизацию оборудования, затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также расходы на взаимодействие с внешней сетью.

$$F_1(t) = C_f(t) + C_{DP}(t) + C_{OM}(t) + C_{grid}(t) \quad (2)$$

$$C_f(t) = \sum_{i=1}^n f_i P_i(t) \quad (3)$$

$$C_{DP}(t) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_{az,i}}{8760 k_i} * \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} * P_i(t) \right] \quad (4)$$

$$C_{OM}(t) = \sum_{i=1}^n K_{OM,i} P_i(t) \quad (5)$$

$$C_{grid}(t) = CP(t) * P_{grid}(t) \quad (6)$$

где $C_f(t)$, $C_{DP}(t)$ и $C_{OM}(t)$ – стоимость топлива, инвестиционные амортизационные отчисления, а также затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание каждого микроисточника питания в момент времени t ; $C_{grid}(t)$ – стоимость приобретения электроэнергии из внешней сети микросети в момент времени t ; f_i – функция стоимости топлива для i -го источника микроэнергии; $P_i(t)$ – активная мощность i -го источника микроэнергии в момент времени t ; n – количество источников микроэнергии; $C_{az,i}$ – стоимость установки i -го источника микроэлектроэнергии; k_i – коэффициент мощности i -го источника микроэлектроэнергии, который представляет собой годовую выработку электроэнергии i -м источником микроэлектроэнергии/(8760*номинальная мощность этого источника микроэлектроэнергии); r – годовая процентная ставка; n_i – срок окупаемости инвестиций в i -й микроисточник электроэнергии; $K_{OM,i}$ – коэффициент затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание на единицу электроэнергии i -го микроисточника электроэнергии; $CP(t)$ – это цена электроэнергии, приобретаемой микросетью из внешней сети в момент t ; $P_{grid}(t)$ – это количество электроэнергии, приобретаемой микросетью из внешней сети в момент t .

Экологическая оптимизация

Минимизация воздействия на окружающую среду включает сокращение выбросов загрязняющих веществ (CO_2 , SO_2 , NO_x). Экологические затраты могут быть выражены следующим уравнением:

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^W \mu_j \left(\sum_{i=1}^N K_{ij} P_{i,t} + K_{Grid,j} P_{Grid,t} \right) \right) \quad (7)$$

где F_2 – стоимость очистки от загрязняющих веществ; μ_j – стоимость очистки от j -го загрязняющего вещества (CO, SO_2, NO_x); $K_{Grid,j}$ – коэффициент выбросов загрязняющих веществ типа j для внешней сети; $P_{i,t}, P_{Grid,t}$ – мощность взаимодействия между i -м источником микромощности и сетью.

Надёжность электроснабжения

Для повышения эксплуатационной надёжности микросетей необходимо учитывать такие показатели, как отклонение напряжения 24, сетевые потери 25, ожидаемые потери при отключении электроэнергии у потребителей 26, вероятность потери нагрузки (LOLP) 26 и вероятность потери электроснабжения (LPSP) 28.

Примеры практического внедрения оптимизации микросеток

Чтобы убедиться в эффективности метода многоцелевой оптимизации при реальном управлении микросетями, можно обратиться к проекту микросети в городе Вильдпольдерид в Баварии, Германия 29. В 2012 году в городе Вильдпольдерид была внедрена интеллектуальная система microgrid, основанная на многоцелевой оптимизации. Проект объединяет фотоэлектрические системы, ветряные турбины, энергетические системы на биомассе и хранилища энергии. Алгоритмы оптимизации для рационального распределения распределенных энергетических ресурсов и объектов хранения энергии привели к повышению уровня самообеспеченности электроэнергии более чем на 300%, снижению стоимости электроэнергии на 25% и сокращению выбросов CO₂ более чем на 60%. Кроме того, в результате значительного повышения надежности среднегодовое время отключения электроэнергии в городе сократилось до менее чем 15 минут, что значительно ниже среднего показателя по Германии 30.

Еще одним примером, на который стоит обратить внимание, является проект Smart Microgrid (TILOS), расположенный на острове Тилос, Греция 31. В рамках проекта были установлены ветряные турбины мощностью 800 кВт, фотоэлектрические установки мощностью около 160 кВт и система хранения аккумуляторных батарей общей мощностью 2,8 МВтч 32. Благодаря интеллектуальному планированию и технологии многоцелевой оптимизации проект достиг максимального уровня охвата возобновляемыми источниками энергии в 75% и годового уровня энергетической самообеспеченности в 60-70%. Проект сокращает выработку дизельной электроэнергии на 1200 МВтч в год, экономит топлива около 220 тонн и сокращает выбросы углекислого газа CO₂ на 750 тонн. Кроме того, система значительно снизила затраты на электроэнергию и повысила надежность и стабильность электроснабжения острова, и во время пикового летнего потребления электроэнергии больше не возникает нехватки электроэнергии 33.

Методы решения многоцелевых задач (Methods for solving multi-objective problems)

Задача решения многоцелевой функции для оптимального планирования микросетей может быть решена путем преобразования многоцелевой функции в одноцелевую функцию с использованием метода линейного взвешенного суммирования, а затем с использованием традиционных методов или алгоритмов искусственного интеллекта для нахождения оптимального решения целевой функции; или с использованием искусственного интеллекта алгоритмы для получения набора решений по Pareto, а затем с использованием методов принятия решений для определения оптимального решения из набора решений по Pareto.

Традиционный алгоритм

Традиционные алгоритмы имеют строгую теоретическую основу и достаточно просты, чтобы найти глобальное оптимальное решение, определяемое оптимизационной моделью. Для одноцелевых моделей микросетей или моделей оптимизации с одной целью, полученных в результате многоцелевых преобразований, задача оптимизации преобразуется в задачу линейного программирования со смешанными целыми числами (MILP) с помощью линеаризации уравнений. В литературе 34 была разработана модель динамического планирования, основанная на определенных ограничениях, в которой учитывалось влияние некоторых неопределенностей на оптимальную работу микросеток. В литературе 35 для получения глобального оптимального решения использовался инструмент нелинейного планирования (Lingo). В литературе 36 задача оптимального планирования была преобразована в модель смешанного целочисленного линейного программирования с целью минимизации общих затрат энергии на микросеть. В литературе 37 была проведена линеаризация модели срока службы аккумуляторной батареи с использованием сегментированной линеаризации и методов large-M для реализации оценки потери срока службы аккумуляторной батареи в микросетях. В литературе 38 использовалось многоцелевое смешанное целочисленное линейное программирование (MO-MILP) с учетом как топологических, так и операционных ограничений для достижения цели оптимизации, заключающейся в эффективном выборе подключенных узлов микросетей и их генерирующей способности с наименьшими отклонениями. В литературе 39 для проведения исследования по оптимальному планированию микросетей для долгосрочного и краткосрочного совместного накопления энергии была построена модель планирования микросетей с целью экономической оптимизации для гибридной ветро-фотоэлектрическо-водородной системы микросетей, которая была преобразована в линейную систему со смешанным целым числом. проблема программирования была решена с помощью решателя Yalmip/Gurobi.

Интеллектуальный алгоритм

Поскольку распределенная периодически возобновляемая энергия в микросетях обычно состоит из фотоэлектрической энергии, энергии ветра и т.д., на проблему

оптимальной работы микросетей влияют многие нелинейно коррелированные переменные и множество ограничений, и проблему оптимизации традиционными методами решить сложно. По сравнению с традиционными алгоритмами, интеллектуальные алгоритмы широко используются в области оптимизации микросеток благодаря своим чрезвычайно быстрым и точным поисковым характеристикам, а их диапазон решений не ограничивается только локальными. В последние годы появляются интеллектуальные алгоритмы оптимизации, такие как многоцелевые генетические алгоритмы, алгоритмы роя частиц, улучшенные многоцелевые эволюционные алгоритмы и т.д., которые имеют широкий диапазон поиска и позволяют точно и быстро выполнять поиск по нескольким целям одновременно.

Чтобы проанализировать текущее применение интеллектуальных алгоритмов при решении многоцелевых задач микросетей, приведем следующую сводную таблицу литературы (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Сводный анализ литературы, включенной в обзор
Summary analysis of the literature included in the review

Алгоритм	Цели оптимизации	Сценарий применения	Метрики
Новая надежная многоцелевая оптимизационная модель, основанная на аффинной настраиваемой политике 40	Минимизация эксплуатационных расходов	Микросеть дата-центра в автономном режиме	Эксплуатационные расходы снизились примерно на 10%
Улучшенный многоцелевой алгоритм серого волка 41	Минимизация эксплуатационных расходов и уменьшенные колебания чистой нагрузки	Автономная микросеть с опреснительной установкой и электромобилем	При совместной работе EV+DES кривая нагрузки значительно сглаживается и повышается коэффициент использования новой энергии (конкретные значения в этой статье не приводятся).
Метод сочетания смешанного целочисленного линейного программирования и алгоритма искусственной пчелиной семьи 44	Повышение экономической эффективности; Снижение операционных рисков в микросетях	Координация и планирование работы кластера микросетей	По сравнению со стандартными ABC и GA стоимость ниже, а стабильность планирования микросетей выше (конкретное значение не указано).
Алгоритм многоцелевой поисковой оптимизации и метод нечеткой функции принадлежности 46	Комплексные эксплуатационные расходы, средняя полезная нагрузка и колебания мощности микросети	Подключенная к сети фотоэлектрическая микросеточная система	Вариант 1 (упорядоченная зарядка и разрядка EV + реагирование на участие TL) дает наилучшие результаты: общие эксплуатационные расходы составляют 12 800 евро, средняя полезная нагрузка - 665,7 кВт, а колебания - 4884 кВт.
Метод линейного взвешивания, основанный на игре с нулевой суммой для двух человек 47	Эксплуатационные и экологические затраты	Микросеточная система в автономном режиме	Эксплуатационные расходы снизились на 10,7%; доля генерирующих мощностей фотоэлектрических

			электростанций, которая не поступает в сеть и поглощается нагрузкой, снизилась на 21,3%; LPSP<3%
Усовершенствованный алгоритм оптимизации поиска пищи бактериями 48	Эксплуатационные расходы	Режим подключения	По сравнению с PSO затраты снижаются на 3,79%; по сравнению с традиционным BFO затраты снижаются на 5,23%
Генетический алгоритм 49	Общие инвестиционные затраты, затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также выбросы углекислого газа в системе	Автономная гибридная энергетическая микросеть	Срок службы дизель-генераторов увеличился на 42,9% ; Общая стоимость снижена на 3,5% ; Выбросы углекислого газа сократились на 0,7%
Алгоритм поиска sparrow, основанный на случайному блуждании(RSSA) 50	Эксплуатационные и экологические затраты	Микросеточная система с ССНР, включающая пиролиз и газификацию биомассы	По сравнению с алгоритмами PSO, SSA и CSSA эксплуатационные расходы, рассчитанные с помощью алгоритма RSSA, были снижены на 3,2%, 2,9% и 0,09% соответственно, а затраты на охрану окружающей среды были снижены на 6,2%, 3,4% и 6,2% соответственно.
Усовершенствованный алгоритм создания искусственной пчелиной семьи, основанный на алгоритме поиска усиков жука (BAS-ABC) 51	Ежедневные затраты на диспетчеризацию выработки электроэнергии и ежедневные затраты на очистку окружающей среды от загрязняющих веществ	Подключенная к сети микросеть с ССНР	Скорость сходимости алгоритма BAS-ABC выше, чем у традиционного алгоритма ABC ; Минимальная стоимость микросетки, решаемой с помощью BAS-ABC, ниже, чем у традиционного алгоритма ABC (конкретное значение не указано).
Улучшенный алгоритм поиска sparrow (ISSA) 52	Эксплуатационные расходы микросети и удовлетворение потребностей в электроэнергии на стороне потребителя	Подключенная к сети микросеть с СНР	План, который всесторонне учитывает эксплуатационные расходы и удовлетворенность пользователей, является более экономичным: затраты увеличились всего на 0,67%, но неудовлетворенность пользователей снизилась на 72,97%.
Алгоритм оптимизации содержания рыбы в илистом грунте (MSFOA) 53	Общая стоимость производства	Режим подключения автономный режим	Предлагаемый метод MSFOA минимизирует общую стоимость производства по

			сравнению с методом прогнозирования на основе эвристической модели, предиктором-корректором-проксимальным множителем и улучшенным алгоритмом дифференциального поиска на 3,76%, 8,32% и 19,3% соответственно.
Улучшенный алгоритм Mayfly 54	Эксплуатационные расходы микросети и затраты на очистку от загрязняющих веществ	Автономная микросеть, включающая термоэлектрическую (дизельную), фотоэлектрическую и ветровую энергию	По сравнению с базовым алгоритмом MA, общие эксплуатационные расходы и выбросы снижаются при четырех режимах нагрузки (конкретное значение не указано).
Многостратегический алгоритм плавления шламовых плесеней (MFSMA) 55	Эксплуатационные расходы микросети и затраты на очистку от загрязняющих веществ	Двухрежимная микросеть (подключенная к сети/автономная)	По сравнению со стандартными SMA, SSA, GWO, PSO и т.д., MFSMA работает быстрее, имеет самую низкую среднюю стоимость и затраты на загрязнение окружающей среды, а качество оптимального решения на 7,08-28,5% выше.
Усовершенствованный алгоритм оптимизации бабочки (BOA), основанный на косой хаотической карте, мутации Коши и симплексном методе 56	Эксплуатационные расходы микросети и экологические затраты	Кластерная система микросети	В микросети, подключенной к сети, стоимость PSO составляет 4338,14 ю, стоимость WOA - 4165,94 ю, стоимость SSA - 4046,61 ю, стоимость BOA - 4105,38 ю, а стоимость IBOA - 3957,49 ю.
Сверточная нейронная сеть, основанная на физике 79	Быстро подбирайте оптимальное решение для планирования, снижайте эксплуатационные расходы.	Автономная микросеть с несколькими источниками энергии	По сравнению со стандартными CNN и ANN ошибка прогнозирования снижена на 21%, а затраты на планирование снижены на 9,4%; модель обладает большей стабильностью.
Алгоритм DRL "Актер-критик" (AC), основанный на знаниях и опирающийся на данные 80	Максимизация преимуществ использования возобновляемых источников энергии и реагирования на нагрузку	Подключенная к сети микросеть с нагрузкой на базовую станцию 5G	Алгоритм "knowledge-assist AC" дополнительно сокращает общие затраты на 3,87% и выбросы углекислого газа на 3,43%.
Двухступенчатый алгоритм DRL (GAN-DDPG) 81	Максимизируйте коэффициент использования возобновляемых	Экологичная микросеть, включающая энергию ветра,	Предлагаемая схема GAN-DDPG позволяет снизить совокупные затраты до 35% при

	источников энергии и минимизируйте затраты на планирование	фотоэлектричество и накопители энергии	снижении выбросов углекислого газа на 23% по сравнению с традиционным алгоритмом DRL.
Персонализированное федеративное мультиагентное обучение с подкреплением на основе кластеризации (C-PFMARL) 82	Достижение экономических и низкоуглеродных выгод	Взаимосвязанные системы с несколькими микросетями (MMG)	Общая комплексная стоимость системы MMG была снижена на 5,78 %, а выбросы углекислого газа сократились на 8,43 %.
Алгоритм DRL с расширенной информацией (IE-DRL) 83	Максимально эффективное использование возобновляемых источников энергии и снижение затрат на планирование	Гибридная микросеть с подключением к сети/автономным, которая учитывает контрольные периоды	Расширенные версии четырех базовых алгоритмов DRL (IE-DDPG, IE-SAC, IE-TD3 и IE-PPO) позволили снизить эксплуатационные расходы на 5,63%, 12,85%, 7,87% и 6,52% соответственно.

*Источник: составлено авторами на основе источников литературы, указанных в таблице

*Source: compiled by the authors based on the references listed in the table

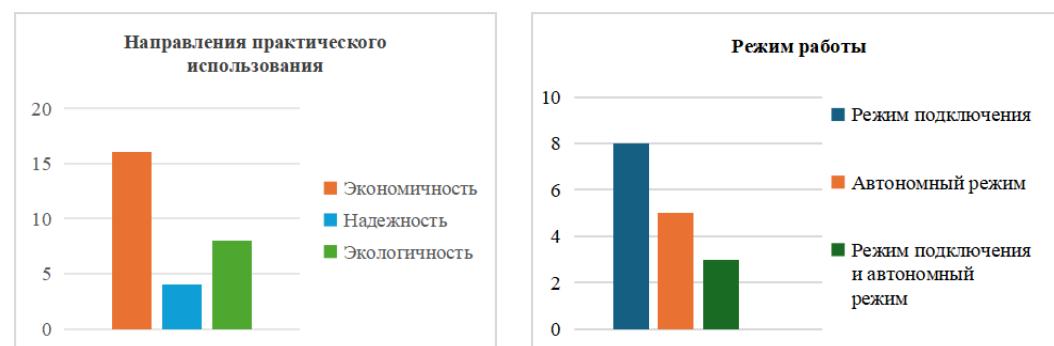


Рис. 2. Результаты анализа характеристик, выделенных в этом обзоре, и частота их использования

Fig. 2. Plot of results for the characteristics identified in this review and the frequency of use

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 2 видно, что экономическая эффективность является приоритетной задачей при изучении оптимального планирования микросетей. В случае микросетей экономическая цель требует рационального распределения различных распределенных источников энергии и требований к нагрузке для снижения затрат на производство и улучшения использования энергии при условии удовлетворения требований к нагрузке. Для автономных микросетей, которые не зависят от внешних источников энергии или электросетей и обеспечивают системную самодостаточность за счет диверсификации энергопотребления и оптимизации диспетчеризации, их экономические цели часто напрямую связаны с эффективным использованием энергии 40, 41 и контролем затрат 49, 54, чтобы обеспечить экономичное энергоснабжение и экономическую безопасность для потребителей долгосрочное развитие. Для подключенных к сети микросетей, режимы работы которых необходимо гибко переключать между автономной работой и взаимодействием с основной сетью, их экономически оптимальное планирование направлено на снижение эксплуатационных расходов и повышение эффективности использования энергии при одновременном максимизации доходов за счет разумного распределения производства, накопления и потребления энергии. В условиях подключения к электросети микросеть взаимодействует с основной сетью и может гибко достигать экономической оптимизации в зависимости от рыночных тарифов, спроса на нагрузку и условий энергоснабжения. Реализация технологии экономичного планирования для микросетей, подключенных к сети, основана на различных передовых технологиях и инструментах для оптимизации планирования энергопотребления с помощью точного

прогнозирования, динамического управления и интеллектуальных алгоритмов, например, систем управления энергопотреблением (EMS) 43, 53, алгоритмов прогнозирования 42, 47, 52, алгоритмов оптимизации 48, 50, 51 и т.д.

Важность экологически чистого оптимального планирования в микросетях возрастает в связи с глобальным переходом к энергетике и повышением осведомленности о защите окружающей среды. Цель обеспечения экологичности микросетей заключается в минимизации воздействия использования энергии на окружающую среду, особенно с точки зрения сокращения выбросов углекислого газа 54, 55 и улучшения использования энергии 40.

Кроме того, решающее значение также имеет влияние задач по обеспечению надежности на оптимальное планирование работы микросетей, что связано со способностью микросетей стабильно и непрерывно предоставлять высококачественные услуги электроснабжения потребителям в различных условиях эксплуатации. Планирование оптимизации надежности включает в себя: обеспечение непрерывности энергоснабжения 53, снижение показателя эксплуатационного риска 44, диагностику неисправности 46, удовлетворение потребностей клиентов 52 и т.д.

Методы оптимизации с учетом неопределенности (Optimization methods taking into account uncertainty)

Микросети могут интегрировать распределенные энергоблоки и возобновляемые источники энергии с помощью передовых информационных технологий управления, обеспечивая надежное энергоснабжение потребителей электроэнергии в микромасштабных масштабах и в то же время максимизируя экономические выгоды и защиту окружающей среды. Однако, учитывая разнообразие энергетических нагрузок и растущее распространение возобновляемых источников энергии, природные условия влияют на распределенные возобновляемые источники энергии, такие как энергия ветра и фотоэлектрические установки, а также их большую непостоянность 57, и эти неопределенности создают новые проблемы для оптимизации работы микросетей. Например, возобновляемые источники энергии для выработки электроэнергии зависят от природных условий, в то время как погода непредсказуема и ее трудно точно предсказать, что усложняет оптимизацию микросетей; Оптимальное планирование требует минимизации экономических и экологических затрат при одновременном обеспечении эффективности планирования, а энергетическая неопределенность усложняет модели планирования. В дополнение к неопределенности, связанной с возобновляемыми источниками энергии, нестабильность нагрузки на стороне потребителя может привести к возможному дисбалансу спроса и предложения при разработке графиков диспетчеризации на сутки вперед и в режиме реального времени, что требует всестороннего учета предложения на стороне нагрузки и спроса 58.

Неопределенность в области возобновляемых источников энергии и нагрузки

Чтобы обеспечить эффективную и стабильную работу микросетей, они обычно интеллектуально управляются и автоматически планируются для принятия решений системами энергоменеджмента. Целью долгосрочной оптимизации энергоменеджмента микросетей является минимизация эксплуатационных расходов и потерь в микросети при максимальном использовании распределенных источников энергии, а также оснащение сети устройствами накопления энергии и обеспечение управления на уровне спроса для обеспечения удовлетворения потребностей в надежности электроснабжения.

В литературе 59 предложена стохастическая стратегия оптимизации планирования микросетей со стохастическими колебаниями в поставках возобновляемой энергии и спросе на нагрузку с использованием моделирования методом поверхности стохастического отклика (SRSM) и оптимальных решений на основе конусной релаксации второго порядка (SOQR). В частности, на основе теории SRSM стохастическое распределение неопределенности преобразуется в независимое стандартное нормальное распределение с помощью преобразования Nataf, а хаотические полиномы Эрмита формулируются для описания процесса стохастического реагирования при регулировании микросетей. На этой основе они также построили модель стохастической оптимизации (SO) с многоцелевой функцией на основе SRAM для достижения наиболее экономичной работы, контроля колебаний затрат и снижения выбросов углекислого газа. Хотя методы SRSM и SOQR могут эффективно справляться с моделированием случайности, они предъявляют высокие требования к качеству данных и высокой вычислительной сложности для распределения вероятностей и хаотического полиномиального моделирования. В литературе 60 предложена система управления энергопотреблением для подключенной к сети микросети с возобновляемыми источниками энергии, включающей фотоэлектрическую энергию (PV), энергию ветра, топливные элементы, микрогазовую турбину и систему хранения

аккумуляторных батарей. Для работы фотоэлектрических систем в микросетях они предложили новую математическую модель для оценки влияния различной интенсивности излучения на планирование работы микросетей на день вперед в разные даты и в разное время года. Неопределенность в выходной мощности фотоэлектрической энергосистемы, ошибки прогнозирования спроса на нагрузку и вариации предложения в сети моделируются с помощью сценарного анализа, а затем решаются с помощью модифицированного алгоритма Bet (Modified Bet Algorithm, MBA), который эффективно повышает точность системы управления энергопотреблением и способен снизить общие эксплуатационные расходы. Этот метод имеет преимущества в повышении точности оптимизации, но в задачах оптимизации большой размерности могут возникнуть проблемы с медленной сходимостью и локальной оптимизацией. В литературе 61 была разработана многоцелевая модель оптимального планирования для островных микросетей, учитываяющая неопределенность производства возобновляемой энергии, с учетом экономической эффективности и частоты колебаний микросетей в качестве целей оптимизации, и предложен двухэтапный метод оптимального планирования, основанный на классификации мощности. Во-первых, метод Монте-Карло используется для оценки математического ожидания и дисперсии целевой функции, и в результате выборки получается определенное количество выборок; во-вторых, алгоритм оптимизации роя частиц используется для определения графиков установки источника питания FM и источника питания базовой нагрузки с целью минимизации среднего значения стоимость выборки; и, наконец, нейронная сеть обратного распространения используется для построения политики FM для источника питания FM. Результаты показывают, что модель и предложенный метод двухэтапного планирования являются разумными и эффективными в контексте большого количества выборок. Этот метод хорошо справлялся с неопределенностью, но общая вычислительная сложность высока и существуют определенные ограничения в режиме реального времени. В то же время результаты моделирования зависят от сходимости и установки начального значения при обучении нейронной сети. В литературе 62 для решения задачи предварительного суточного планирования аккумуляторных систем применён алгоритм медоеда (Honey Badger Algorithm, HBA). Результаты показывают, что основанная на HBA двухуровневая стратегия управления энергопотреблением обеспечивает оптимальную экономичную работу подключенной к сети микросети в режиме реального времени в условиях неопределенности погоды, тарифов на коммунальные услуги и нагрузки прогнозирования. Алгоритм HBA обладал определенной способностью к глобальному поиску, но он чувствителен к настройкам параметров и подходит для небольших и среднемасштабных систем. В литературе 63 предложена стратегия оптимального планирования на нескольких временных масштабах для микросетей, учитываяющая неопределенность нагрузки источника. На этапе планирования на сутки вперед разрабатывается двухэтапная модель надежного оптимального планирования распределения с целью минимизации затрат на интегрированное планирование на сутки вперед для микросети, и оптимальная схема планирования на сутки вперед определяется в соответствии с распределением вероятности наихудшего сценария. На этапе внутридневного планирования, основанный на высокоточных прогнозах источника и нагрузки, метод прогнозирующего управления распределенной моделью используется для построения оптимальной модели внутридневной скользящей оптимизации и корректировки в режиме реального времени, которая обеспечивает эффективное выполнение плана на день вперед и эффективно подавляет колебания мощности в контактной линии. Результаты моделирования показывают, что предложенный метод оптимальной диспетчеризации с несколькими временными рамками позволяет не только поддерживать бесперебойную подачу электроэнергии на контактную линию, но и обеспечить надежную и экономичную работу микросети. Этот метод учитывал надежность и экономичность, но структура модели сложна и требует больших вычислительных ресурсов.

Неопределенность в области накопления энергии и реагирования на спрос

Система накопления энергии также является важной частью микросети, которая может смягчить колебания мощности, вызванные перебоями в работе возобновляемых источников энергии, и ее конфигурация мощности также окажет влияние на работу микросети. Оптимизированная работа системы накопления энергии важна для снижения эксплуатационных расходов микросети. Литература 64 В связи с оптимизированным планированием микросетей с учетом батарей и систем аккумулирования энергии был разработан новый метод расчета, основанный на временных интервалах. Для достижения этой цели в данной статье сначала моделируется оптимизированное планирование микросетей для хранения энергии с насосом и аккумуляторных батарей, которые учитывают

реакцию на спрос. Затем для устранения неопределенности используется новая формула, основанная на интервалах. Наконец, предложенная модель была проверена с помощью моделирования при различных обстоятельствах, и результаты подтвердили эффективность новой формулы, основанной на интервалах, для оптимизации планирования микросетей с накопителями энергии с накачкой и аккумуляторами в неопределенных условиях. Этот метод повышает точность планирования, но модель интервалов сложна в настройке, и при настройке параметров необходимо соблюдать осторожность. В литературе 65 сначала предложен усовершенствованный метод глубокого обучения на основе активационной функции swish для прогнозирования фотоэлектрической генерации и спроса на нагрузку. Затем, основываясь на результатах прогнозирования, был использован не требующий моделирования, легкий, управляемый данными адаптивный алгоритм обучения с подкреплением для решения оптимального планирования работы накопителей энергии, которое позволило разработать онлайн-стратегию хранения энергии в режиме реального времени. Хотя этот метод легко адаптируется, он в значительной степени зависит от данных и обладает ограниченной надежностью модели.

При реальной эксплуатации микросети также существуют разные пользователи с разным спросом на электроэнергию, реагирование на спрос является средством потребления возобновляемой энергии, включая два разных типа реагирования – стимулирующее и тарифное, и их неопределенность также вызывает озабоченность ученых. В литературе 66 предложен многоэтапный метод оптимизации управления энергией микросети с учётом неопределённостей, связанных с рынком торговли выбросами углерода и откликом со стороны потребителей (DSR). Во-первых, метод сценарного анализа используется для устранения неопределённостей, связанных с возобновляемыми источниками энергии в микросети, и генерируются четыре типичных сценария использования возобновляемых источников энергии. Затем, исходя из предпосылки рассмотрения рынка торговли выбросами углерода, рассматривается гибкая конфигурация и эксплуатационные ограничения каждого источника питания в микросети. Третий этап включает в себя объединение характеристик различных типов нагрузки и использование методов DSR, основанных на цене и переносе нагрузки, для анализа влияния различных процентных соотношений жилой и промышленной нагрузки соответственно. Наконец, для получения оптимального решения используется алгоритм оптимизации роя квантовых частиц (QPSO). Полученные результаты доказывают эффективность предложенной многоэтапной системы оптимизации энергопотребления. Многоступенчатая модель оптимизации улучшал систематизацию стратегии планирования, но ее вычислительная сложность высока, а время решения может оказаться слишком большим. В литературе 67 рассмотрено влияние фотоэлектрической энергии и неопределенности нагрузки потребителей в долгосрочных масштабах и предлагается стратегия системы накопления энергии, учитывающая рекомендации по реагированию на спрос. Этот метод учитывает долгосрочную гибкость, однако в значительной степени зависит от точности прогноза. В литературе 68 разработана основанная на риске стохастическая модель оптимального управления энергопотреблением для микросетей с возобновляемыми источниками энергии, хранилищами энергии и управлением нагрузкой с помощью процедур реагирования на спрос, основанных на времени. Теория принятия решений о нехватке информации (IGDT) была использована для решения проблемы неопределенности нагрузки и разработки стратегии управления энергопотреблением, управляемой микросетями. Они исследовали три различные стратегии управления рисками, такие как модель неприятия риска, модель нейтрализации риска и модель поиска риска. Результаты показывают, что неприятие риска лицом, принимающим решения, или стремление к риску влияют на работу системы. Кроме того, использование планов реагирования на спрос в методах неприятий рисков и поиска рисков влияет на потребление и общие затраты. Лица, принимающие решения, могут снизить риски за счет увеличения потребления энергии или снизить затраты, используя планы реагирования на спрос для сокращения потребления. Предложенная модель хорошо описывает предпочтения в отношении риска, однако требует предварительного задания доверительного интервала и зависит от субъективных параметров, что ограничивает её обобщающую способность.

Прогнозирование нагрузки

В процессе планирования электросетевого хозяйства важную роль играет прогнозирование электрической нагрузки на основе возобновляемых источников энергии, и повышение уровня прогнозирования электрической нагрузки имеет большое значение для планирования потребления электроэнергии, плана технического обслуживания энергоблоков, рациональной организации режима работы сети и улучшения социальных

льгот. Прогнозирование нагрузки на микросети отличается от традиционного прогнозирования нагрузки на электроэнергию. Возобновляемые источники энергии, такие как фотоэлектрическая энергия и энергия ветра, будут подвержены влиянию погодных условий и других факторов окружающей среды при выработке электроэнергии, а выходная мощность будет нестабильной с перебоями и случайностью 69; в то же время, в микросети происходят колебания контролируемых нагрузок, что увеличивает сложность оптимального планирования. Чтобы обеспечить эффективную и стабильную работу микросетей и добиться регулирования микроисточников питания, накопителей энергии и нагрузок в микросетях, необходимо учитывать баланс нагрузок и мощности. В литературе 70 разработана модель глубокой рекуррентной нейронной сети (DRNN-LSTM) с блоками долговременной и кратковременной памяти для прогнозирования общей электрической нагрузки и фотоэлектрической генерации (PV) в микросети сообщества. Между тем, были разработаны оптимальные модели диспетчеризации нагрузки для подключенных к сетям общественных микросетей, включая электрические нагрузки в жилых домах, фотоэлектрические системы, электромобили (EVS) и системы накопления энергии (ESSS), в рамках трех различных сценариев диспетчеризации. Чтобы обеспечить баланс между спросом и предложением, в модели учитывается неопределенность в потреблении электроэнергии в домашних хозяйствах и производстве фотоэлектрической энергии. Наконец, для оптимизации распределения нагрузки подключенной к сети микроэлектростанции сообщества был использован алгоритм оптимизации роя частиц (PSO). Несмотря на высокую способность модели DRNN-LSTM к обработке временных рядов, её обучение требует значительных затрат времени и чувствительно к качеству долгосрочных исторических данных. Кроме того, алгоритм PSO подвержен риску преждевременной сходимости в условиях высокоразмерного пространства поиска, что может повлиять на достижение глобального оптимума в задачах диспетчеризации. В литературе 71 разработан одноступенчатый метод многопериодного прогнозирования, основанный на принципе "PER-AutoR", для выполнения многопериодного прогнозирования выработки и нагрузки на возобновляемые источники энергии; во-вторых, для минимизации общих эксплуатационных расходов строится модель диспетчеризации, учитывающая реакцию спроса; наконец, исходная модель диспетчеризации преобразуется в простое в решении линейное программирование со смешанными целыми числами для решения этой задачи. Результаты показывают, что предложенный метод значительно снижает эксплуатационные расходы системы за счет повышения точности прогнозирования по сравнению с традиционной моделью планирования без прогнозирования. Несмотря на значительное улучшение прогноза, метод обладает высокой степенью интеграции, что снижает интерпретируемость модели. Сложная нейронная сеть, которая сочетает в себе сверточную нейронную сеть (CNN) с Gated Recurrent Unit (GRU) для прогнозирования производства возобновляемой энергии, тарифов и нагрузок, была предложена в работе 72. Однако традиционное обучение под наблюдением требует высококачественных наборов данных для обучения, чтобы получить идеальную производительность прогнозирования, что в некоторой степени ограничивает применение таких методов в реальных системах. В работе 73 предложена новая модель прогнозирования GA-AWPSO-LSTM-GAM, основанная на глубоком обучении, для решения проблемы неопределенности в отношении выработки энергии из возобновляемых источников, нагрузки и цены на сутки вперед (DAP).

Как справиться с неопределенностью производства возобновляемой энергии и нагрузки на нее, является ключевым вопросом для изолированной микросети, которая имеет относительно небольшую мощность и не может получать поддержку от основной сети 74. В самом начале работы 75 была предложена экономичная модель эксплуатации микросетей, которая учитывает такие ограничения, как когенерация микросетей и резервная мощность, и основана на использовании различных форм распределенных источников энергии. В литературе 76 применён метод робастной оптимизации, в рамках которого диапазоны изменений выработки энергии ветрогенераторами и потребительской нагрузки выражены с учётом неопределённости. В литературе 77 разработана сквозная моделируемая двунаправленная, долгосрочная и краткосрочная сверточная нейронная сеть (E2E BiLSTM-CNN) для прогнозирования изменения мощности ветра и нагрузки в течение 24-часового периода. Данная модель обладает высокой способностью к извлечению временных признаков и распознаванию локальных шаблонов, обеспечивая высокую точность прогноза. Однако сложность архитектуры модели приводит к увеличенному времени обучения, а её эффективность снижается в условиях ограниченного объёма данных или при высоких требованиях к обобщающей способности. В литературе 78 авторы установили оптимальное распределение вероятностей, основанное на исторических данных о выходе и нагрузке

WTG, а затем использовали подход программирования с ограниченными возможностями для планирования микросетей. Такой подход обеспечивает баланс экономичности и надежности работы микросети, но при этом в качестве входных данных для планирования используются выходные данные WTG и данные о нагрузке в виде усредненных значений, что не может служить надежной основой для модели планирования.

Заключение (Conclusion)

В статье выполнен систематический анализ современных исследований в области оптимизации планирования микросетей, предложена модель многоцелевой оптимизации, рассмотрены методы решения соответствующих задач. Особое внимание удалено неопределённостям, связанным с генерацией возобновляемой энергии, прогнозированием нагрузки, системами накопления энергии и управлением спросом. Несмотря на богатство результатов исследований и их практическую значимость, анализ научной литературы выявил ряд существенных препятствий для широкого внедрения представленных методов на практике:

- (I) Основные барьеры для внедрения существующих методов
 - 1) Высокая вычислительная сложность и ресурсоёмкость алгоритмов

Широко используемые интеллектуальные методы оптимизации, такие как глубокое обучение и эволюционные алгоритмы, характеризуются высокой вычислительной сложностью и значительными требованиями к ресурсам. Это существенно затрудняет применение таких методов в микросетях малой и средней мощности, ограничивая их практическое использование.

- 2) Низкая адаптивность и ограниченная переносимость моделей

Существующие модели оптимизации обладают низкой способностью к переносу решений, полученных в одних условиях, на микросети с иными характеристиками и параметрами. В силу значительного различия между реальными микросетями это сильно ограничивает широкое внедрение разработанных методов.

- 3) Недостаток качественных данных

Эффективность интеллектуальных методов напрямую зависит от качества и доступности исторических и оперативных данных. Однако во многих практических случаях инфраструктура сбора и обработки данных не развита, что негативно сказывается на качестве работы оптимизационных алгоритмов.

- 4) Ограниченные возможности применения алгоритмов в реальном времени

Многие существующие алгоритмы требуют продолжительного времени расчёта и не способны быстро реагировать на изменения условий эксплуатации в режиме реального времени. Это затрудняет их применение для планирования работы микросетей в реальном времени.

- 5) Нормативные и экономические ограничения

Отсутствие четких нормативно-правовых механизмов и экономических стимулов снижает интерес инвесторов и компаний к применению новых технологий, что усложняет внедрение инновационных решений.

С учётом указанных проблем и вызовов дальнейшие исследования должны быть направлены на решение следующих задач:

- (II) Перспективные направления дальнейших исследований

- 1) Снижение вычислительной сложности алгоритмов и повышение их оперативности

Разработка оптимизационных алгоритмов с пониженной вычислительной сложностью, обеспечивающих высокую скорость расчётов, позволит эффективно использовать их в микросетях любого масштаба в условиях реального времени.

- 2) Повышение адаптивности и переносимости моделей

Исследование и разработка методов интеграции миграционного обучения (transfer learning) и глубокого обучения с подкреплением (deep reinforcement learning) обеспечит повышение универсальности и адаптивности моделей, позволяя переносить решения между микросетями с разными характеристиками и условиями эксплуатации.

- 3) Совершенствование систем сбора и обработки данных

Необходимо развивать инфраструктуру сбора и предварительной обработки данных, повышать качество формируемых баз данных, чтобы обеспечить надежную информационную основу для эффективного функционирования интеллектуальных алгоритмов.

- 4) Моделирование и совместная оптимизация с учетом различных неопределённостей

Разработка новых моделей оптимизации, одновременно учитывающих различные неопределённости (например, связанные с ветровой и солнечной энергией, нагрузками, системами накопления), позволит повысить точность и надёжность решений, принимаемых

в реальных условиях эксплуатации микросетей.

5) Разработка методов оптимального планирования и координации работы группы микросетей

Исследования должны быть направлены на создание эффективных методов совместного планирования нескольких микросетей как в автономном, так и в сетевом режиме, что позволит обеспечить стабильность и экономическую эффективность всей энергосистемы.

6) Исследование нормативной базы и экономических механизмов

Необходимо активизировать междисциплинарные исследования в области экономики и права с целью разработки и внедрения эффективных нормативных и экономических механизмов, стимулирующих инвестиции и внедрение интеллектуальных оптимизационных решений.

Таким образом, целенаправленное преодоление перечисленных барьеров и реализация предложенных перспективных направлений позволят существенно повысить эффективность и практическую востребованность современных методов оптимизации планирования микросетей.

Литература

1 Гуломзода А.Х., Сафаралиев М.Х., Люханов Е.А. Модифицированный способ синхронизации Microgrid внешней изолированной энергосистемой // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3(52). С. 72-80. Doi:10.18503/2311-8318-2021-3(52)-72-80

2 Gu W., Wu Z., Bo R., et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2014. Vol. 54. pp. 26-37. Doi: 10.1016/j.ijepes.2013.06.028

3 Upasana L., Nasreen B., Irraivan E., et al. An Enhanced Multi-Objective Optimizer for Stochastic Generation Optimization in Islanded Renewable Energy Microgrids // Mathematics. 2023. Vol. 11, N9. 2079. Doi: 10.3390/math11092079

4 Seddaoui N., Boulouma S., Rahmani L. A hybrid Improved Salp Swarm Algorithm and Harris Hawk Optimizer for energy planning in microgrids with minimum operating cost // International Journal of Green Energy. 2024. Vol. 22, N1. pp. 72–89. Doi: 10.1080/15435075.2024.2406844

5 Wu X., Shan Y., Fan K. A Modified Particle Swarm Algorithm for the Multi-Objective Optimization of Wind/Photovoltaic/Diesel/Storage Microgrids // Sustainability. 2024. Vol. 16, N03. 1065. Doi: 10.3390/su16031065

6 Zhu X., Peng C., Geng H. Multi-Objective Sizing Optimization Method of Microgrid Considering Cost and Carbon Emissions // 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Beijing, China. 2022. pp. 2278-2283. Doi:10.1109/SPIES55999.2022.10082041.

7 Wang X., Wang S., Ren J., et al. Optimizing Economic Dispatch for Microgrid Clusters Using Improved Grey Wolf Optimization // Electronics. 2024. Vol. 13, N16. 3139. Doi: 10.3390/electronics13163139

8 Dong A., Lee S-K. The Study of an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Economic Dispatch in Microgrids // Electronics. 2024. Vol. 13, N20. 4086. Doi: 10.3390/electronics13204086

9 Rajagopalan A., Nagarajan K., Montoya O. D., et al. Multi-Objective Optimal Scheduling of a Microgrid Using Oppositional Gradient-Based Grey Wolf Optimizer // Energies. 2022. Vol. 15, N23. 9024. Doi:10.3390/en15239024

10 Maël R., Florian D., Dominique G., et al. Multi-Objective Optimization of Autonomous Microgrids with Reliability Consideration // Energies. 2021. Vol. 14, N15. 4466. Doi: 10.3390/en14154466

11 Younes Z., Alhamrouni I., Mekhilef S., et al. A memory-based gravitational search algorithm for solving economic dispatch problem in micro-grid // Ain Shams Engineering Journal. 2021. Vol. 12, N2. pp. 1985–1994. Doi: 10.1016/j.asej.2020.10.021

12 Karthik N., Rajagopalan A., Bajaj M. et al. Chaotic self-adaptive sine cosine multi-objective optimization algorithm to solve microgrid optimal energy scheduling problems // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. 18997. Doi: 10.1038/s41598-024-69734-4

13 Yang X., Leng Z., Xu S., et al. Multi-objective optimal scheduling for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented ϵ -constraint method // Renewable Energy. 2021. Vol.172. pp. 408-423. Doi: 10.1016/j.renene.2021.02.165

14 Zhao G., Luo J., Song N., et al. Multi-objective optimal dispatch of island microgrid considering a novel scheduling resource // Electric Power Systems Research. 2025. Vol.241:111378. Doi:10.1016/j.epsr.2024.111378

15 Ren Z., Qu X., Wang M., et al. Multi-Objective Optimization for DC Microgrid Using Combination of NSGA-II Algorithm and Linear Search Method // IEEE Journal on Emerging and Selected

- Topics in Circuits and Systems. 2023. Vol. 13, N3. pp. 789-796. Doi:10.1109/JETCAS.2023.3284061.
- 16 Huang Y., He G., Pu Z., et al. Multi-objective particle swarm optimization for optimal scheduling of household microgrids // Front. Energy Res. 2024. Vol. 11. 1354869. Doi:10.3389/fenrg.2023.1354869
- 17 Alabdullah M.H., Abido M. A. Microgrid energy management using deep Q-network reinforcement learning // Alexandria Engineering Journal. 2022. Vol. 61, N11. pp. 9069-9078. Doi: 10.1016/j.aej.2022.02.042
- 18 Nguyen Q. M., Nguyen D. L., Nguyen T. K. A mixed-integer linear programming model for microgrid optimal scheduling considering BESS degradation and RES uncertainty // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 104. Pt. B. 114663. Doi: 10.1016/j.est.2024.114663
- 19 Amirkhossein B., Hamidreza A., Somayeh M. Day-ahead optimal scheduling of microgrid with considering demand side management under uncertainty // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 209. 107965. Doi: 10.1016/j.epsr.2022.107965
- 20 Tang W., Gao F. Optimal operation of household microgrid day-ahead energy considering user satisfaction // High Voltage Engineering. 2017. Vol. 43, N1. pp. 140-148. Doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20161227019
- 21 He L. Research on optimal scheduling of multi-microgrid economics considering peak shaving and valley filling strategies // Proceedings of Excellent Papers of Zhejiang Electric Power Society of China 2022 (Power Grid Technology). 2023. pp. 175-187.
- 22 Zhu L., Zhou X., Tang L., et al. Multi-objective optimal dispatch of microgrid using particle swarm optimization combined with bacterial foraging algorithm // Power System Technology. 2017. Vol. 41, N6. pp. 1847-1854. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2504
- 23 Xing Y., Liu L., Wang Y. An application model of multi-objective optimization algorithm // Success (Education Edition). 2011. N5. pp. 242. Doi: CNKI:SUN:CJY.0.2011-05-211
- 24 Cao Z., Zhou L., Zhang Y., et al. Microgrid planning based on power supply reliability // Power System Protection and Control. 2015. Vol. 43, N14. pp. 6. Doi: JournalArticle/5b3bd98ec095d70f00940949
- 25 Xu Y., Ai Q. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids // Electric Power Automation Equipment. 2016. Vol. 36, N11. pp. 18-26. Doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.11.003
- 26 Xu T., Ai Q. Coordinated optimal scheduling method for active distribution networks containing microgrids // Electric Power Automation Equipment. 2016. Vol. 36, N11. pp.18-26. Doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.11.003
- 27 Yu Z., Guo L., Liu W., et al. Stochastic optimal planning software for stand-alone microgrids and its implementation // Power System Automation. 2015. Vol. 39, N6. pp. 18-23. Doi: 10.7500/AEPS20140207002
- 28 Tong N., Li Y., Shen H., et al. Optimal scheduling of microgrids based on improved black hole algorithm // Journal of Power Science and Technology. 2021. Vol. 36, N05. pp.113-119. Doi: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.014
- 29 Li J., Yuan M. Green Energy Town Construction in Germany: Ideas, Strategies and Experiences // Journal of Shandong University of Science and Technology: Social Sciences. 2015. Vol. 17, N6. Doi: 10.16452/j.cnki.sdkjsk.20151225.010
- 30 Christie A. German Village Achieves Energy Independence... And Then Some // BioCycle August 2011. Vol. 52, N8. pp.37.
- 31 Kaldellis J., Zafirakis D. Prospects and challenges for clean energy in European Islands.The TILOS paradigm // Renewable Energy. 2020. Vol. 145. pp.2489-2502. Doi: 10.1016/j.renene.2019.08.014
- 32 Nottou G., Nivet M. -L., Zafirakis D., et al. Tilos, the first autonomous renewable green island in Mediterranean: A Horizon 2020 project // 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria. 2017. pp.102-105. Doi:10.1109/ELMA.2017.7955410.
- 33 Boulogiorgou D., Ktenidis P. TILOS local scale Technology Innovation enabling low carbon energy transition // Renewable Energy. 2020. Vol. 146. pp.397-403. Doi: 10.1016/j.renene.2019.06.130
- 34 Li W., Li E., Wang P. The Technical Status and Development Tendency of Microgrid // Telecom Power Technology. 2015. N05. pp: 202-207. Doi: CNKI:SUN:TXDY.0.2015-05-065
- 35 Zhu L., Zhou X., Tang L., et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads // Power System Technology. 2017. Vol. 41, N6. pp. 1847-1854. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2504
- 36 Nikolaos E., Myronas G., Michael C. Optimal energy planning and scheduling of microgrids // Chemical Engineering Research and Design. 2018. Vol. 131, N03. pp. 318-332. Doi:10.1016/j.cherd.2017.07.030
- 37 Xue X., Ai X., Fang J., et al. Real-Time Schedule of Microgrid for Maximizing Battery Energy Storage Utilization // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2022. Vol. 13, N3. pp. 1356-1369. Doi:10.1109/TSTE.2022.3153609.
- 38 Moein B., Mona G. A Multi-Objective Optimization Scheme for Resilient, Cost-Effective

Planning of Microgrids // IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2020. Vol. 8. pp. 206325-206341. Doi:10.1109/ACCESS.2020.3038133

39 Qiu Y., Li Q., Ai Y., et al. Optimal scheduling for microgrids considering long-term and short-term energy storage // Journal of Energy Storage. 2024. Vol 93. pp. 112-137. Doi: 10.1016/j.est.2024.112137

40 Lian Y., Li Y., Zhao Y., et al. Robust multi-objective optimization for islanded data center microgrid operations // Applied Energy. 2023. Vol. 330. 120344. Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120344

41 Zhu W., Guo J., Zhao G. Multi-Objective Dispatching Optimization of an Island Microgrid Integrated with Desalination Units and Electric Vehicles // Processes. 2021. Vol. 9, N5. 798. Doi: 10.3390/pr9050798

42 Huang Z., Xu L., Wang B., et al. Optimizing power systems and microgrids: A novel multi-objective model for energy hubs with innovative algorithmic optimization // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 69, N5. pp. 927-943. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.341

43 Jhon M., Juan G., Oscar G., et al. Techno-economic approach for energy management system: Multi-objective optimization algorithms for energy storage in standalone and grid-connected DC microgrids // Journal of Energy Storage. 2024. Vol. 102. Pt. 1. 114069. Doi: 10.1016/j.est.2024.114069

44 Zhang Z., Wang Z., Wang H., et al. Research on Bi-Level Optimized Operation Strategy of Microgrid Cluster Based on IABC Algorithm // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol.9. pp. 15520-15529. Doi: 10.1109/access.2021.3053122

45 Ren Z., Qu X., Wang M., et al. Multi-Objective Optimization for DC Microgrid Using Combination of NSGA-II Algorithm and Linear Search Method // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems. 2023. Vol. 13, N3. pp. 789-796. Doi:10.1109/JETCAS.2023.3284061.

46 Hou H., Xue M., Xu Y., et al. Multi-objective economic dispatch of a microgrid considering electric vehicle and transferable load // Applied Energy. 2020. Vol. 262. 114489.

Doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114489

47 Mei Y., Li B., Wang H., et al. Multi-objective optimal scheduling of microgrid with electric vehicles // Energy Reports. 2022. Vol.8. pp. 4512-4524. Doi: 10.1016/j.egyr.2022.03.131

48 Zhang Y., Lv Y., Zhou Y. Research on Economic Optimal Dispatching of Microgrid Based on an Improved Bacteria Foraging Optimization // Biomimetics. 2023. Vol. 8, N2. 150. Doi: 10.3390/biomimetics8020150

49 Premadasa P. N. D., Silva C. M. M. R. S., Chandima D. P., et al. A multi-objective optimization model for sizing an off-grid hybrid energy microgrid with optimal dispatching of a diesel generator // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 68. 107621. Doi: 10.1016/j.est.2023.107621

50 Qiao M., Yu Z., Dou Z., et al. Study on Economic Dispatch of the Combined Cooling Heating and Power Microgrid Based on Improved Sparrow Search Algorithm // Energies. 2022. Vol. 15, N14. 5174. Doi: 10.3390/en15145174

51 Shan J., Lu R. Multi-objective economic optimization scheduling of CCHP micro-grid based on improved bee colony algorithm considering the selection of hybrid energy storage system // Energy Reports. 2021. Vol.7. pp. 326-341. Doi: 10.1016/j.egyr.2021.10.026

52 Jia S., Kang X. Multi-Objective Optimal Scheduling of CHP Microgrid Considering Conditional Value-at-Risk // Energies. 2022. Vol. 15, N9. 3394. doi:10.3390/en15093394

53 Veluchamy K., Veluchamy M. A new energy management technique for microgrid system using muddy soil fish optimization algorithm // International Journal of Energy Research. 2021. Vol. 45. 14824–14844. Doi:10.1002/er.6758

54 Nagarajan K., Rajagopalan A., Angalaeswari S. et al. Combined Economic Emission Dispatch of Microgrid with the Incorporation of Renewable Energy Sources Using Improved Mayfly Optimization Algorithm // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Vol. 2022, N01. 6461690. Doi: 10.1155/2022/6461690

55 Zhang Y., Zhou Y. Research on Microgrid Optimal Dispatching Based on a Multi-Strategy Optimization of Slime Mould Algorithm // Biomimetics. 2024. Vol. 9, N3. 138. Doi: 10.3390/biomimetics9030138

56 Zhang Y., Zhou H., Xiao L., et al. Research on economic optimal dispatching of microgrid cluster based on improved butterfly optimization algorithm // International Transactions Electrical Energy Systems. 2022. Vol. 2022, N01. 7041778. Doi: 10.1155/2022/7041778

57 Wang F., Xuan Z., Zhen Z., et al. A day-ahead PV power forecasting method based on LSTM-RNN model and time correlation modification under partial daily pattern prediction framework // Energy Convers Manage. 2020. Vol.212. 112766. Doi: 10.1016/j.enconman.2020.112766

58 Liu L., Yang G. Distributed Optimal Energy Management for Integrated Energy Systems // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2022. Vol. 18. N10. pp. 6569-6580. Doi:10.1109/TII.2022.3146165.

59 Liang Y., Xu Z., Li H., et al. A random optimization strategy of microgrid dispatching based on stochastic response surface method considering uncertainty of renewable energy supplies and load demands // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol.154. 109408. Doi: 10.3390/pr9050798

10.1016/j.ijepes.2023.109408

60 Luo L., Abdulkareem S-S., Rezvani A., et al. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty // Journal of Energy Storage. 2020. Vol.28. 101306. Doi: 10.1016/j.est.2020.101306

61 Yang M., Cui Y., Wang J. Multi-Objective optimal scheduling of island microgrids considering the uncertainty of renewable energy output // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2023. Vol.144. 108619. Doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108619

62 Hassaballah E-G., Keshta H-E., Latif-Abdel K-M., et al. A novel strategy for real-time optimal scheduling of grid-tied microgrid considering load management and uncertainties // Energy. 2024. Vol.299. 131419. Doi: 10.1016/j.energy.2024.131419

63 Hou J., Yu W., Xu Z., et al. Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty // Electric Power Systems Research. 2023. Vol.216. 109037. Doi: 10.1016/j.epsr.2022.109037

64 Ahmadi S., Marcos T-V., Ali A-G., et al. A novel interval-based formulation for optimal scheduling of microgrids with pumped-hydro and battery energy storage under uncertainty // International Journal of Energy Research. 2022. Vol. 46, N9. pp. 11523-13110. Doi: 10.1002/er.8058

65 Zhou K., Zhou K., Yang S. Reinforcement learning-based scheduling strategy for energy storage in microgrid // Journal of Energy Storage. 2022. Vol.51. 104379. Doi:10.1016/j.est.2022.104379

66 Goh H-H., Shi S., Liang X., et al. Optimal energy scheduling of grid-connected microgrids with demand side response considering uncertainty // Applied Energy. 2022. Vol.327. 120094.

Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120094

67 Nan B., Dong S., Tang K., et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load // Power System Technology. 2023. Vol. 47, N04. pp. 1340-1349. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0798

68 Sahar S-B., Mehdi A., Behnam M-I., et al. Optimal scheduling of a microgrid based on renewable resources and demand response program using stochastic and IGDT-based approach // Journal of Energy Storage. 2024. Vol.86, Pt. B. 111306. Doi: 10.1016/j.est.2024.111306

69 Kumar A., Verma A., Talwar R. Optimal techno-economic sizing of a multi-generation microgrid system with reduced dependency on grid for critical health-care educational and industrial facilities // Energy. 2020. Vol. 208. 118248. Doi: 10.1016/j.energy.2020.118248

70 Wen L., Zhou K., Yang S., et al. Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting // Energy. 2019. Vol.171. pp.1053-1065. Doi: 10.1016/j.energy.2019.01.075

71 Li Y., Wang R., Yang Z. Optimal Scheduling of Isolated Microgrids Using Automated Reinforcement Learning-Based Multi-Period Forecasting // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2022. Vol. 13, N01. pp. 159-169. Doi: 10.1109/TSTE.2021.3105529.

72 Afrasiabi M., Mohammadi M., Rastegar M., et al. Multi-agent microgrid energy management based on deep learning forecaster // Energy. 2019. Vol. 186. 115873. Doi:10.1016/j.energy.2019.115873

73 Kim H.J., Kim M.K. A novel deep learning-based forecasting model optimized by heuristic algorithm for energy management of microgrid // Applied Energy. 2023. Vol.332. 120525.

Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120525

74 Arriaga M., Cañizares C. A., Kazerani M. Northern lights: Access to electricity in Canada's northern and remote communities // IEEE Power and Energy Magazine. 2014; Vol. 12, N4. pp. 50-59. Doi: 10.1109/MPE.2014.2317963.

75 Hernandez-Aramburo C. A., Green T. C., Mugniot N. Fuel consumption minimization of a microgrid // IEEE Transactions on Industry Applications. 2005. Vol. 41, N03. pp. 673-681. Doi: 10.1109/TIA.2005.847277.

76 Mohammad R E., Amjadi N. Adaptive robust optimization framework for day-ahead microgrid scheduling // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol.107. pp. 213-223. Doi: 10.1016/j.ijepes.2018.11.029

77 Dong W., Sun H., Mei C., et al. Forecast-driven stochastic optimization scheduling of an energy management system for an isolated hydrogen microgrid // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 277. 116640. Doi: 10.1016/j.enconman.2022.116640

78 Ciftci O., Mehrtash M., Kargarian A. Data-driven nonparametric chance-constrained optimization for microgrid energy management // IEEE Transations on Industrial Informatics. 2020. Vol. 16, N04. pp. 2447-2457. Doi: 10.1109/tnii.2019.2932078

79 Ge X., Khazaei J. Physics-informed Convolutional Neural Network for Microgrid Economic Dispatch // arXiv -EE-Systems and Control. 2024. Doi: arxiv-2404.18362

80 Deng S., Zhong J., Liang H., et al. Optimal microgrid dispatch with 5G communication base stations: A knowledge-assist deep reinforcement learning method // Electric Power Systems Research. 2025. Vol.248. 111982. Doi: 10.1016/j.epsr.2025.111982

81 Luo R., Gao W., Zhao X., et al. A Two-Stage Green Energy Dispatch Scheme for Microgrid using Deep Reinforcement Learning // in *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2025. Doi: 10.1109/TGCN.2025.3560143

82 Yang T., Xu Z., Ji S., et al. Cooperative optimal dispatch of multi-microgrids for low carbon economy based on personalized federated reinforcement learning // *Applied Energy*. 2025. Vol. 378. Pt. A. 124641. Doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124641

83 Liu W., Mao Z. Microgrid economic dispatch using Information-Enhanced Deep Reinforcement Learning with consideration of control periods // *Electric Power Systems Research*. 2025. Vol. 239. 111244. Doi: 10.1016/j.epsr.2024.111244

Авторы публикации

Чэн Сяоюй – аспирант, кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. ORCID*: 0000-0001-8417-9463. schen@urfu.ru

Ду Ян – аспирант, кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. ORCID*: 0000-0001-6563-2621. erica002@163.com

Цинь Лисун – аспирант, кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. ORCID*: 0009-0008-2342-4961. 382445630@qq.com

Велькин Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ), г. Екатеринбург, Россия. v.i.velkin@urfu.ru

References

- 1 Ghulomzoda AH, Safaraliev MKh, Lyukhanov EA. Modified Method for Synchronizing Microgrid with an External Isolated Power System. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2021; 3(52):2-80. (In Russ). Doi:10.18503/2311-8318-2021-3(52)-72-80
- 2 Gu W, Wu Z, Bo R, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014; 54:26-37. Doi: 10.1016/j.ijepes.2013.06.028
- 3 Upasana L, Nasreen B, Irraivan E, et al. An Enhanced Multi-Objective Optimizer for Stochastic Generation Optimization in Islanded Renewable Energy Microgrids. *Mathematics*. 2023; 11(9):2079. Doi: 10.3390/math11092079
- 4 Seddaoui N, Boulouma S, Rahmani L. A hybrid Improved Sarp Swarm Algorithm and Harris Hawk Optimizer for energy planning in microgrids with minimum operating cost. *International Journal of Green Energy*. 2024; 22(1):72–89. Doi: 10.1080/15435075.2024.2406844
- 5 Wu X, Shan Y, Fan K. A Modified Particle Swarm Algorithm for the Multi-Objective Optimization of Wind/Photovoltaic/Diesel/Storage Microgrids. *Sustainability*. 2024; 16(03):1065. Doi: 10.3390/su16031065
- 6 Zhu X, Peng C, Geng H. Multi-Objective Sizing Optimization Method of Microgrid Considering Cost and Carbon Emissions. *2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES), Beijing, China*. 2022:2278-2283. Doi:10.1109/SPIES55999.2022.10082041.
- 7 Wang X, Wang S, Ren J, et al. Optimizing Economic Dispatch for Microgrid Clusters Using Improved Grey Wolf Optimization. *Electronics*. 2024; 13(16):3139. Doi: 10.3390/electronics13163139
- 8 Dong A, Lee S-K. The Study of an Improved Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Economic Dispatch in Microgrids. *Electronics*. 2024; 13(20):4086. Doi: 10.3390/electronics13204086
- 9 Rajagopalan A, Nagarajan K, Montoya OD, et al. Multi-Objective Optimal Scheduling of a Microgrid Using Oppositional Gradient-Based Grey Wolf Optimizer. *Energies*. 2022; 15(23): 9024. Doi:10.3390/en15239024
- 10 Maël R, Florian D, Dominique G, et al. Multi-Objective Optimization of Autonomous Microgrids with Reliability Consideration. *Energies*. 2021; 14(15):4466. Doi: 10.3390/en14154466
- 11 Younes Z, Alhamrouni I, Mekhilef S, et al. A memory-based gravitational search algorithm for solving economic dispatch problem in micro-grid. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021; 12(2):1985–1994. Doi: 10.1016/j.asej.2020.10.021
- 12 Karthik N, Rajagopalan A, Bajaj M, et al. Chaotic self-adaptive sine cosine multi-objective

optimization algorithm to solve microgrid optimal energy scheduling problems. *Scientific Reports*. 2024; 14:18997. Doi: 10.1038/s41598-024-69734-4

13 Yang X, Leng Z, Xu S, et al. Multi-objective optimal scheduling for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented ϵ -constraint method. *Renewable Energy*. 2021; 172:408-423. Doi: 10.1016/j.renene.2021.02.165

14 Zhao G, Luo J, Song N, et al. Multi-objective optimal dispatch of island microgrid considering a novel scheduling resource. *Electric Power Systems Research*. 2025; 241:111378. Doi:10.1016/j.epsr.2024.111378

15 Ren Z, Qu X, Wang M, et al. Multi-Objective Optimization for DC Microgrid Using Combination of NSGA-II Algorithm and Linear Search Method. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*. 2023; 13(3):789-796. Doi:10.1109/JETCAS.2023.3284061.

16 Huang Y, He G, Pu Z, et al. Multi-objective particle swarm optimization for optimal scheduling of household microgrids. *Front. Energy Res.* 2024; 11:1354869. Doi:10.3389/fenrg.2023.1354869

17 Alabdullah MH, Abido MA. Microgrid energy management using deep Q-network reinforcement learning. *Alexandria Engineering Journal*. 2022; 61(11):9069-9078. Doi: 10.1016/j.aej.2022.02.042

18 Nguyen QM, Nguyen DL, Nguyen TK. A mixed-integer linear programming model for microgrid optimal scheduling considering BESS degradation and RES uncertainty. *Journal of Energy Storage*. 2024; 104(Pt B):114663. Doi: 10.1016/j.est.2024.114663

19 Amirhossein B, Hamidreza A, Somayeh M. Day-ahead optimal scheduling of microgrid with considering demand side management under uncertainty. *Electric Power Systems Research*. 2022; 209:107965. Doi: 10.1016/j.epsr.2022.107965

20 Tang W, Gao F. Optimal operation of household microgrid day-ahead energy considering user satisfaction. *High Voltage Engineering*. 2017; 43(1):140-148. Doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.20161227019

21 He L. Research on optimal scheduling of multi-microgrid economics considering peak shaving and valley filling strategies. *Proceedings of Excellent Papers of Zhejiang Electric Power Society of China 2022 (Power Grid Technology)*. 2023:175-187.

22 Zhu L, Zhou X, Tang L, et al. Multi-objective optimal dispatch of microgrid using particle swarm optimization combined with bacterial foraging algorithm. *Power System Technology*. 2017; 41(6):1847-1854. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2504

23 Xing Y, Liu L, Wang Y. An application model of multi-objective optimization algorithm. *Success (Education Edition)*. 2011; 5:242. Doi: CNKI:SUN:CJJY.0.2011-05-211

24 Cao Z, Zhou L, Zhang Y, et al. Microgrid planning based on power supply reliability. *Power System Protection and Control*. 2015; 43(14):10-15. Doi: JournalArticle/5b3bd98ec095d70f00940949

25 Xu Y, Ai Q. Coordinated optimal dispatch of active distribution network with microgrids. *Electric Power Automation Equipment*. 2016; 36(11):18-26. Doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.11.003

26 Xu T, Ai Q. Coordinated optimal scheduling method for active distribution networks containing microgrids. *Electric Power Automation Equipment*. 2016; 36(11):18-26. Doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.11.003

27 Yu Z, Guo L, Liu W, et al. Stochastic optimal planning software for stand-alone microgrids and its implementation. *Power System Automation*. 2015; 39(6):18-23. Doi: 10.7500/AEPS20140207002

28 Tong N, Li Y, Shen H, et al. Optimal scheduling of microgrids based on improved black hole algorithm. *Journal of Power Science and Technology*. 2021; 36(5):113-119. Doi: 10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.014

29 Li J, Yuan M. Green Energy Town Construction in Germany: Ideas, Strategies and Experiences. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Social Sciences*. 2015; 17(6). Doi: 10.16452/j.cnki.sdkjsk.20151225.010

30 Christie A. German Village Achieves Energy Independence... And Then Some. *BioCycle August 2011*. 2011. 52(8):37.

31 Kaldellis J, Zafirakis D. Prospects and challenges for clean energy in European Islands.The TILOS paradigm. *Renewable Energy*. 2020; 145:2489-2502. Doi: 10.1016/j.renene.2019.08.014

32 Notton G, Nivet M. -L, Zafirakis D, et al. Tilos, the first autonomous renewable green island in Mediterranean: A Horizon 2020 project. *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria*. 2017; 1:102-105. Doi:10.1109/ELMA.2017.7955410.

33 Boulogiorgou D, Ktenidis P. TILOS local scale Technology Innovation enabling low carbon energy transition. *Renewable Energy*. 2020; 146:397-403. Doi: 10.1016/j.renene.2019.06.130

34 Li W, Li E, Wang P. The Technical Status and Development Tendency of Microgrid. *Telecom Power Technology*. 2015; 5:202-207. Doi: CNKI:SUN:TXDY.0.2015-05-065

35 Zhu L, Zhou X, Tang L, et al. Multi-objective optimal operation for microgrid considering interruptible loads. *Power System Technology*. 2017; 41(6):1847-1854. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2504

36 Nikolaos E, Myronas G, Michael C. Optimal energy planning and scheduling of microgrids.

Chemical Engineering Research and Design. 2018; 131(03):318-332. Doi:10.1016/j.cherd.2017.07.030

37 Xue X, Ai X, Fang J, et al. Real-Time Schedule of Microgrid for Maximizing Battery Energy Storage Utilization. *IEEE Transactions on Sustainable Energy.* 2022; 13(3):1356-1369. Doi:10.1109/TSTE.2022.3153609.

38 Moein B, Mona G. A Multi-Objective Optimization Scheme for Resilient, Cost-Effective Planning of Microgrids. *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM).* 2020; 8:206325-206341. Doi:10.1109/ACCESS.2020.3038133

39 Qiu Y, Li Q, Ai Y, et al. Optimal scheduling for microgrids considering long-term and short-term energy storage. *Journal of Energy Storage.* 2024; 93:112-137. Doi: 10.1016/j.est.2024.112137

40 Lian Y, Li Y, Zhao Y, et al. Robust multi-objective optimization for islanded data center microgrid operations. *Applied Energy.* 2023; 330:120344. Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120344

41 Zhu W, Guo J, Zhao G. Multi-Objective Dispatching Optimization of an Island Microgrid Integrated with Desalination Units and Electric Vehicles. *Processes.* 2021; 9(5):798. Doi: 10.3390/pr9050798

42 Huang Z, Xu L, Wang B, et al. Optimizing power systems and microgrids: A novel multi-objective model for energy hubs with innovative algorithmic optimization. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2024; 69(5):927-943. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.341

43 Jhon M, Juan G, Oscar G, et al. Techno-economic approach for energy management system: Multi-objective optimization algorithms for energy storage in standalone and grid-connected DC microgrids. *Journal of Energy Storage.* 2024; 102(Pt 1):114069. Doi: 10.1016/j.est.2024.114069

44 Zhang Z, Wang Z, Wang H, et al. Research on Bi-Level Optimized Operation Strategy of Microgrid Cluster Based on IABC Algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2021; 9:15520-15529. Doi: 10.1109/access.2021.3053122

45 Ren Z, Qu X, Wang M, et al. Multi-Objective Optimization for DC Microgrid Using Combination of NSGA-II Algorithm and Linear Search Method. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems.* 2023; 13(3):789-796. Doi:10.1109/JETCAS.2023.3284061.

46 Hou H, Xue M, Xu Y, et al. Multi-objective economic dispatch of a microgrid considering electric vehicle and transferable load. *Applied Energy.* 2020. 262:114489.

Doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114489

47 Mei Y, Li B, Wang H, et al. Multi-objective optimal scheduling of microgrid with electric vehicles. *Energy Reports.* 2022; 8:4512-4524. Doi: 10.1016/j.egyr.2022.03.131

48 Zhang Y, Lv Y, Zhou Y. Research on Economic Optimal Dispatching of Microgrid Based on an Improved Bacteria Foraging Optimization. *Biomimetics.* 2023; 8(2):150. Doi: 10.3390/biomimetics8020150

49 Premadasa PND, Silva CMMRS, Chandima DP, et al. A multi-objective optimization model for sizing an off-grid hybrid energy microgrid with optimal dispatching of a diesel generator. *Journal of Energy Storage.* 2023; 68:107621. Doi: 10.1016/j.est.2023.107621

50 Qiao M, Yu Z, Dou Z, et al. Study on Economic Dispatch of the Combined Cooling Heating and Power Microgrid Based on Improved Sparrow Search Algorithm. *Energies.* 2022; 15(14):5174. Doi: 10.3390/en15145174

51 Shan J, Lu R. Multi-objective economic optimization scheduling of CCHP micro-grid based on improved bee colony algorithm considering the selection of hybrid energy storage system. *Energy Reports.* 2021; 7:326-341. Doi: 10.1016/j.egyr.2021.10.026

52 Jia S, Kang X. Multi-Objective Optimal Scheduling of CHP Microgrid Considering Conditional Value-at-Risk. *Energies.* 2022; 15(9):3394. doi:10.3390/en15093394

53 Veluchamy K, Veluchamy M. A new energy management technique for microgrid system using muddy soil fish optimization algorithm. *International Journal of Energy Research.* 2021; 45:14824–14844. Doi:10.1002/er.6758

54 Nagarajan K, Rajagopalan A, Angalaeswari S, et al. Combined Economic Emission Dispatch of Microgrid with the Incorporation of Renewable Energy Sources Using Improved Mayfly Optimization Algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience.* 2022; 2022(01):6461690. Doi: 10.1155/2022/6461690

55 Zhang Y, Zhou Y. Research on Microgrid Optimal Dispatching Based on a Multi-Strategy Optimization of Slime Mould Algorithm. *Biomimetics.* 2024; 9(3)138. Doi: 10.3390/biomimetics9030138

56 Zhang Y, Zhou H, Xiao L, et al. Research on economic optimal dispatching of microgrid cluster based on improved butterfly optimization algorithm. *International Transactions Electrical Energy Systems.* 2022. 2022(01):7041778. Doi: 10.1155/2022/7041778

57 Wang F, Xuan Z, Zhen Z, et al. A day-ahead PV power forecasting method based on LSTM-RNN model and time correlation modification under partial daily pattern prediction framework. *Energy Convers Manage.* 2020; 212:112766. Doi: 10.1016/j.enconman.2020.112766

58 Liu L, Yang G. Distributed Optimal Energy Management for Integrated Energy Systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics.* 2022; 18(10):6569-6580. Doi:10.1109/TII.2022.3146165.

59 Liang Y, Xu Z, Li H, et al. A random optimization strategy of microgrid dispatching based on

stochastic response surface method considering uncertainty of renewable energy supplies and load demands. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023; 154:109408.

Doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109408

60 Luo L, Abdulkareem S-S, Rezvani A, et al. Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty. *Journal of Energy Storage*. 2020; 28:101306. Doi: 10.1016/j.est.2020.101306

61 Yang M, Cui Y, Wang J. Multi-Objective optimal scheduling of island microgrids considering the uncertainty of renewable energy output. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2023; 144:108619. Doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108619

62 Hassaballah E-G, Keshta H-E, Latif-Abdel K-M, et al. A novel strategy for real-time optimal scheduling of grid-tied microgrid considering load management and uncertainties. *Energy*. 2024; 299:131419. Doi: 10.1016/j.energy.2024.131419

63 Hou J, Yu W, Xu Z, et al. Multi-time scale optimization scheduling of microgrid considering source and load uncertainty. *Electric Power Systems Research*. 2023; 216:109037. Doi: 10.1016/j.epsr.2022.109037

64 Ahmadi S, Marcos T-V, Ali A-G, et al. A novel interval-based formulation for optimal scheduling of microgrids with pumped-hydro and battery energy storage under uncertainty. *International Journal of Energy Research*. 2022; 46(9):11523-13110. Doi: 10.1002/er.8058

65 Zhou K, Zhou K, Yang S. Reinforcement learning-based scheduling strategy for energy storage in microgrid. *Journal of Energy Storage*. 2022; 51:104379. Doi: 10.1016/j.est.2022.104379

66 Goh H-H, Shi S, Liang X, et al. Optimal energy scheduling of grid-connected microgrids with demand side response considering uncertainty. *Applied Energy*. 2022; 327:120094.

Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120094

67 Nan B, Dong S, Tang K, et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load. *Power System Technology*. 2023; 47(04):1340-1349. Doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0798

68 Sahar S-B, Mehdi A, Behnam M-I, et al. Optimal scheduling of a microgrid based on renewable resources and demand response program using stochastic and IGDT-based approach. *Journal of Energy Storage*. 2024; 86 (Pt B):111306. Doi: 10.1016/j.est.2024.111306

69 Kumar A, Verma A, Talwar R. Optimal techno-economic sizing of a multi-generation microgrid system with reduced dependency on grid for critical health-care educational and industrial facilities. *Energy*. 2020; 208: 118248. Doi: 10.1016/j.energy.2020.118248

70 Wen L, Zhou K, Yang S, et al. Optimal load dispatch of community microgrid with deep learning based solar power and load forecasting. *Energy*. 2019; 171:1053-1065. Doi: 10.1016/j.energy.2019.01.075

71 Li Y, Wang R, Yang Z. Optimal Scheduling of Isolated Microgrids Using Automated Reinforcement Learning-Based Multi-Period Forecasting. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2022; 13(01):159-169. Doi: 10.1109/TSTE.2021.3105529.

72 Afrasiabi M, Mohammadi M, Rastegar M, et al. Multi-agent microgrid energy management based on deep learning forecaster. *Energy*. 2019; 186:115873. Doi: 10.1016/j.energy.2019.115873

73 Kim HJ, Kim MK. A novel deep learning-based forecasting model optimized by heuristic algorithm for energy management of microgrid. *Applied Energy*. 2023; 332:120525.

Doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120525

74 Arriaga M, Cañizares CA, Kazerani M. Northern lights: Access to electricity in Canada's northern and remote communities. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2014; 12(4):50-59.

Doi: 10.1109/MPE.2014.2317963.

75 Hernandez-Aramburu CA, Green TC, Mugniot N. Fuel consumption minimization of a microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2005; 41(03):673-681.

Doi: 10.1109/TIA.2005.847277.

76 Mohammad RE, Amjadi N. Adaptive robust optimization framework for day-ahead microgrid scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019; 107:213-223. Doi: 10.1016/j.ijepes.2018.11.029

77 Dong W, Sun H, Mei C, et al. Forecast-driven stochastic optimization scheduling of an energy management system for an isolated hydrogen microgrid. *Energy Conversion and Management*. 2023; 277:116640. Doi: 10.1016/j.enconman.2022.116640

78 Ciftci O, Mehrtash M, Kargarian A. Data-driven nonparametric chance-constrained optimization for microgrid energy management. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020; 16(04):2447-2457. Doi: 10.1109/tnii.2019.2932078

79 Ge X, Khazaei J. Physics-informed Convolutional Neural Network for Microgrid Economic Dispatch. *arXiv -EE-Systems and Control*. 2024. Doi: arxiv-2404.18362

80 Deng S, Zhong J, Liang H, et al. Optimal microgrid dispatch with 5G communication base stations: A knowledge-assist deep reinforcement learning method. *Electric Power Systems Research*. 2025;

48:111982. Doi: 10.1016/j.epsr.2025.111982

81 Luo R, Gao W, Zhao X, et al. A Two-Stage Green Energy Dispatch Scheme for Microgrid using Deep Reinforcement Learning. *in IEEE Transactions on Green Communications and Networking*. 2025. Doi: 10.1109/TGCN.2025.3560143

82 Yang T, Xu Z, Ji S, et al. Cooperative optimal dispatch of multi-microgrids for low carbon economy based on personalized federated reinforcement learning. *Applied Energy*. 2025; 378(Pt A):124641. Doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124641

83 Liu W, Mao Z. Microgrid economic dispatch using Information-Enhanced Deep Reinforcement Learning with consideration of control periods. *Electric Power Systems Research*. 2025; 239:111244. Doi: 10.1016/j.epsr.2024.111244

Authors of the publication

Chen Xiaoyu – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID**: 0000-0001-8417-9463. schen@urfu.ru

Du Yang – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID**: 0000-0001-6563-2621. erica002@163.com

Qin Lisong – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. *ORCID**: 0009-0008-2342-4961. 382445630@qq.com

Vladimir I. Velkin – Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. v.i.velkin@urfu.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **27.03.2025 г.**

Отредактировано **05.10.2025 г.**

Принято **15.10.2025 г.**