

# Синтез микросетей для энергоснабжения сельскохозяйственных ферм Вьетнама

Алексей Еделев <sup>1,2</sup>, Дмитрий Карамов <sup>1,3</sup>, Van Doan Binh <sup>4</sup>, Nguyen Thi Thu Huong <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, ул. Лермонтова, д. 134, 664033, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, ул. Лермонтова, д. 130, 664033, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, д. 83, 664074, Иркутск, Россия

<sup>4</sup> Институт энергетики и окружающей среды Вьетнамской Академии наук и технологий, ул. Хоанг Куок Вьет, д. А9, 18, Ханой, Вьетнам

## Аннотация

В данной статье приведены начальные результаты совместной работы авторов по задаче синтеза микросетей для сельскохозяйственных ферм Вьетнама. На основе проведённого анализа литературы было решено строить синтез микросетей в виде двух- или трёхуровневой структурно-параметрической оптимизации локальных энергетических комплексов. Для моделирования микросетей была выбрана концепция энергетического хаба.

## Ключевые слова

микросети, структурно-параметрическая оптимизация, энергетический хаб, энергетический комплекс

## 1. Введение

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

Совместная работа накопителей электрической энергии в автономных системах электроснабжения имеет ряд факторов, влияющих как на техническую, так и экономическую эффективность использования тех или иных типов накопителей. В большей степени они касаются неравномерности генерации источниками, использующими энергию ветра и солнца в качестве первичных двигателей.

Накопители электрической энергии в микросетях, как правило, представлены разного рода аккумуляторными батареями. Они, в отличие от элементов генерации и трансформации электрической энергии, имеют определенный ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при моделировании. Исходя из условий их эксплуатации [2], к данным особенностям можно отнести внутренние процессы старения активной массы аккумуляторных батарей, включая расслоение электролита, разрушение положительного электрода, тяжелую/необратимую сульфацию, кристаллизацию и т.п.

6<sup>th</sup> International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2024), July 01–05, 2024, Irkutsk, Russia

EMAIL: flower@isem.irk.ru (A. 1); dmitriy.karamov@mail.ru (A. 2); binh.doan@ies.vn (A. 3); thuhuong.ies@gmail.com (A. 4)

ORCID: 0000-0003-2219-9754 (A. 1); 0000-0001-5360-4826 (A. 2); 0000-0001-5360-4826 (A. 3); 0000-0001-5360-4826 (A. 4)



© 2024 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ICCS-DE 2024 Workshop Proceedings

DOI: 10.47350/ICCS-DE.2024.15

Стохастическая составляющая при генерировании электрической энергии существенно сказывается на основных эксплуатационных показателях аккумуляторных батарей. Например, в автономных фотоэлектрических системах эксплуатация аккумуляторных батарей сопровождается процессами с ярко выраженным циклическим характером в течение суток.

Способы образования микросетей можно разбить на следующие большие группы: преобразование существующих систем электроснабжения, динамическое формирование микросетей, синтез многоресурсных микросетей и интеллектуальных энергетических хабов [3].

## **2. Синтез многоресурсных микросетей**

Синтез многоресурсных микросетей является задачей параметрической или структурно-параметрической оптимизации энергетических комплексов [4].

Параметрическая оптимизация отвечает за выбор типоразмеров и числа единиц технологического оборудования, определение оптимальных параметров работы технологического оборудования для каждого временного шага. Однако больший вклад в улучшение характеристик энергетических комплексов, снижение капитальных и эксплуатационных затрат вносит структурно-параметрическая оптимизация, отвечающая за подбор типов технологического оборудования и мест его установки.

Структурно-параметрическая оптимизация обычно формулируется поверх параметрической, в сравнении с которой является более сложной проблемой с математической и вычислительной точек зрения. Это выражается, в частности, в том, что пространство возможных топологических альтернатив для систем с такой высокой структурной и динамической сложностью, как ЭИ, может быть в принципе априори неизвестно [5]. Также математически доказано, что проблема структурно-параметрической оптимизации интегрированных систем энергетики является *NP*-трудной задачей [6].

Структурно-параметрическая оптимизация энергетических комплексов выполняется по двух- или трёхуровневой схеме, где на верхних уровнях происходит подбор типов технологического оборудования и мест его установки, выбор типоразмеров и числа единиц. Информация о выбранном оборудовании передаётся на нижний уровень, где производится оптимизация режимов работы энергетического комплекса с учётом решений, принятых на верхних уровнях. Затем расчётные данные об эффективности выбранного оборудования возвращаются нижним уровнем обратно наверх.

В литературе представлено множество подходов к структурно-параметрической оптимизации энергетических комплексов [7, 8].

## **3. Сложность моделей энергетических комплексов**

Так как задача структурно-параметрической оптимизации энергетических комплексов в целом является *NP*-сложной, то добиться синтеза многоресурсных микросетей за приемлемое время достаточно сложно. Последнее обстоятельство влияет на вычислительные затраты, точность результатов расчётов и практическую применимость найденных конфигураций энергетических комплексов [9]. При этом, как говорят исследования [10-12], повышение детализации (сложности) энергетических моделей, влекущее за собой увеличение вычислительных затрат, не обязательно гарантирует рост точности моделирования или нахождение более эффективных системных конфигураций. По этим причинам в литературе до сих пор остаётся открытым вопрос подбора необходимой степени сложности моделей структурно-параметрической оптимизации энергетических комплексов.

После анализа нескольких десятков моделей структурно-параметрической оптимизации энергетических комплексов в работах [9, 11, 13] были выделены следующие факторы, определяющих сложность данных моделей:

- временная детализация исходных данных [14] и горизонт планирования [15],

- пространственная детализация исходных данных [16],
- тип модели (линейная, нелинейная и т.д.) [17] и подход к учёту неопределённости данных [8, 18],
- детализация представления и моделирования различных компонент энергетических комплексов [19].

Вышеперечисленные четыре фактора скорее определяют сложность модели энергетического комплекса нижнего уровня схемы структурно-параметрической оптимизации, нежели верхнего уровня. Сложность модели энергетического комплекса верхнего уровня по большей части определяется типом численного метода поиска оптимальных решений, используемым для оптимизации развития энергетических комплексов. Данные методы можно разделить на две дополняющие друг друга группы: эвристические и оптимизационные [20]. Эвристические методы, как правило, эффективны для быстрого получения хороших решений. Однако эти методы не могут гарантировать оптимальности, главным образом из-за последовательного характера и математически недоказанной сходимости. Оптимизационные методы, учитывающие структурные особенности ЭИ одновременно с конструктивными требованиями способны найти точное решение для практически любой целевой функции [21]. Обратной стороной оптимизационных методов по сравнению с эвристическими методами являются высокие вычислительные затраты и потенциально долгое время счёта.

#### 4. Энергетический хаб

Для моделирования микросетей в настоящее время часто используется идея энергетического хаба, предложенная в 2007 году [22]. Она описывает в обобщенном виде технологии преобразования и накопления энергии. Энергетический хаб представляет собой посредника между различными энергетическими инфраструктурами и потребителями. На входы хаба, которые соединены с внешними энергосистемами, подаются различные энергоресурсы, такие как электричество и различные виды топлива: природный газ, уголь и т.д. Выходы хаба соединяются с потребителями, которые обеспечиваются энергетическими услугами необходимого качества, такими как электроснабжение, отопление и хладоснабжение. В хабе энергия преобразуется и аккумулируется с использованием технологий комбинированного производства тепла и электроэнергии, трансформаторов, силовой электроники, компрессоров, теплообменников и прочего оборудования [23].

Энергетический хаб обычно состоит из следующих элементов:  $n$  входов,  $d$  преобразователей энергии,  $k$  накопителей энергии и  $m$  выходов [24]. На рисунке 1 показан пример энергетического хаба, состоящего из 2 входов: электроэнергии и топлива, 2 выходов: электроэнергии и теплоэнергии, 3 преобразователей: электрического трансформатора, мини ТЭЦ для производства тепла и электроэнергии, электрического котла для покрытия пиковых потребностей в тепле, 2 накопителей: электрического аккумулятора и накопителя тепла.

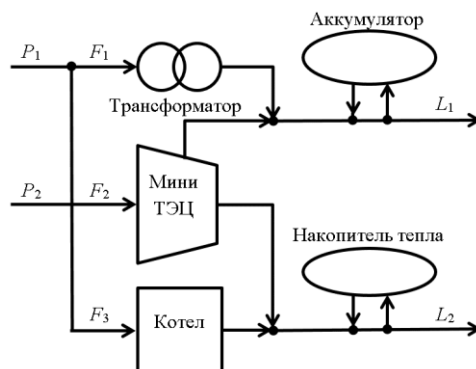


Рисунок 1: Пример энергетического хаба

Распределение потоков энергии от входов энергетического хаба к его выходам обычно описывается в матричной форме [25]:

$$L = \eta V^{-1}P - SQ^{ch} + SQ^{dis} + U, \quad (1)$$

где  $P$  – вектор, компоненты которого соответствуют потокам на входах хаба,  $L$  – вектор, компоненты которого соответствуют потокам на выходах хаба,  $\eta$  – матрица преобразования, компоненты которой равны значениям коэффициентов преобразования одного вида энергии в другой,  $V$  – матрица диспетчеризации потоков от входов хаба до преобразователей,  $S$  – матрица связывания потоков в накопителях энергии с выходными потоками хаба,  $Q^{ch}$  – вектор, компоненты которого соответствуют потокам заряда в накопителях энергии,  $Q^{dis}$  – вектор, компоненты которого соответствуют потокам разряда в накопителях энергии,  $U$  – вектор, компоненты которого равны значениям непокрытой части нагрузки на выходах хаба.

Потоки к конверторам можно выразить через входные потоки  $P$  как

$$F = V^{-1}P, \quad (2)$$

где  $F$  – вектор, компоненты которого соответствуют потокам в преобразователях. С учетом (2) уравнение (1) можно переписать как

$$L = \eta F - SQ^{ch} + SQ^{dis} + U. \quad (3)$$

Для примера на рисунке 1 матрицы и вектора из уравнений (1)-(3) будут иметь следующий вид:

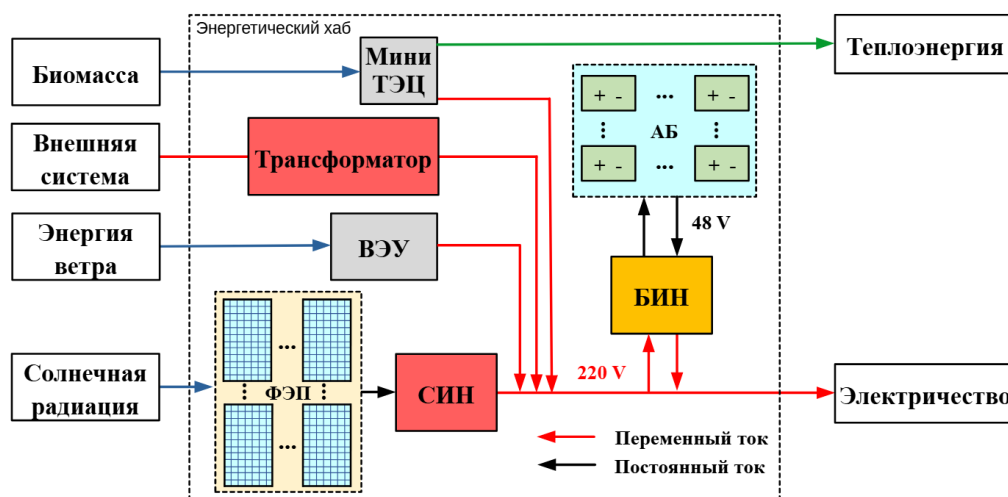
$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}, \eta = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{21} & 0 \\ 0 & \eta_{22} & \eta_{32} \end{bmatrix}, Q^{ch} = \begin{bmatrix} Q_1^{ch} \\ Q_2^{ch} \end{bmatrix}, Q^{dis} = \begin{bmatrix} Q_1^{dis} \\ Q_2^{dis} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix},$$

где  $P_1$  – входной поток электроэнергии,  $P_2$  – входной поток топлива,  $L_1$  – выходной поток электроэнергии,  $L_2$  – выходной поток теплоэнергии,  $F_1$  – поток электроэнергии через трансформатор,  $F_2$  – поток природного газа в мини ТЭЦ,  $F_3$  – поток электроэнергии в электрический котел,  $\eta_{11}$  – коэффициент полезного действия трансформатора,  $\eta_{21}$  – удельный расход топлива на выработку электроэнергии в мини ТЭЦ,  $\eta_{22}$  – удельный расход топлива на выработку тепла в мини ТЭЦ,  $\eta_{32}$  – коэффициент полезного действия электрического котла,  $Q_1^{ch}$  – поток заряда в электрический аккумулятор,  $Q_1^{dis}$  – поток разряда из электрического аккумулятора,  $Q_2^{ch}$  – поток теплоэнергии в накопитель,  $Q_2^{dis}$  – поток теплоэнергии из накопителя,  $U_1$  – непокрытая часть потребности в электричестве,  $U_2$  – непокрытая часть потребности в тепле.

## 5. Синтез микросетей для сельскохозяйственных ферм Вьетнама

На текущий момент авторами разработана типовая схема энергоснабжения сельскохозяйственных ферм Вьетнама, показанная в виде энергетического хаба на рисунке 2.

Микросеть на рисунке 2 состоит из следующих компонент: фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), сетевой инвертор (СИН), аккумуляторные батареи (АБ), батарейный инвертор (БИН), ветроэлектрическая установка (ВЭУ) и установка для комбинированной выработки тепла и электричества из биомассы (миниТЭЦ). Также микросеть имеет подключение к внешней энергосистеме для покупки электроэнергии в случае нехватки собственных мощностей. Максимальная электрическая нагрузка не превышает 500 кВт.



**Рисунок 2:** Пример энергетического хаба

Предполагается, что энергоснабжение сельскохозяйственных ферм контролируется цифровым двойником микросети, который подчиняется следующим правилам:

- если суммарная генерация микросети превышает уровень нагрузки, то выполняется прямое снабжение потребителя и аккумулярование энергии в АБ;
- если генерации от микросети недостаточно, то необходимый объем энергии поступает из АБ и внешней энергосистемы.

Синтез микросетей для сельскохозяйственных ферм Вьетнама будет заключаться в выборе типоразмеров и числа единиц оборудования для ФЭП, АБ, ВЭУ и миниТЭЦ.

## 6. Заключение

В данной статье приведены начальные результаты совместной работы авторов по задаче синтеза микросетей для сельскохозяйственных ферм Вьетнама. На основе проведенного анализа литературы было решено строить синтез микросетей в виде двух- или трёхуровневой структурно-параметрической оптимизации локальных энергетических комплексов. Для моделирования микросетей была выбрана концепция энергетического хаба.

## 7. Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», , рег. № 124052100088-3).

## 8. Список литературы

- [1] Карамов Д.Н. Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 5. С. 113–130.
- [2] Svoboda V., Wenzl H., Kaiser R., Jossen A., Baring-Gould I., Manwell J., Lundsager P., Bindner H., Cronin T., Nørgaard P., Ruddell A., Perujo A., Douglas K., Rodrigues C., Joyce A., Tselepis S., van der Borg N., Nieuwenhout F., Wilmot N., Mattera F., Sauer D. U. Operating conditions of batteries in off-grid renewable energy systems. Solar Energy, 2007, 81, pp. 1409–1425.

- [3] Hussain, A., Bui, V.H. and Kim, H.M., 2019. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied energy*, 240, pp.56-72.
- [4] Sustaining Power Resources through Energy Optimization and Engineering / P. Vasant and Nikolai Voropai, editors. Description: Hershey PA: Engineering Science Reference, 2016 by IGI Global. - 126 p.
- [5] Wang, L., Yang, Z., Sharma, S., Mian, A., Lin, T.E., Tsatsaronis, G., Maréchal, F. and Yang, Y. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants. *Energies*, 2018, vol. 12(1), p.73.
- [6] Goderbauer, S., Comis, M. and Willamowski, F.J., 2019. The synthesis problem of decentralized energy systems is strongly NP-hard. *Computers & Chemical Engineering*, 124, pp.343-349
- [7] Frangopoulos, C.A. Recent developments and trends in optimization of energy systems. *Energy*, 2018, vol. 164, pp. 1011-1020.
- [8] Schmeling, L., Schönfeldt, P., Klement, P., Vorspel, L., Hanke, B., von Maydell, K. and Agert, C. A generalised optimal design methodology for distributed energy systems. *Renewable Energy*, 2022, vol. 200, pp.1223-1239.
- [9] Cuisinier, E., Lemaire, P., Ruby, A., Bourasseau, C. and Penz, B., 2023. Impact of operational modelling choices on techno-economic modelling of local energy systems. *Energy*, 276, p.127599.
- [10] Nolting L, Praktijnjo A. Is the more complex model always the better one? Evidence from the assessment of security of electricity supply. In: *ENERDAY 2019 – the 13th international conference on energy economics and technology*. doi:10.13140/RG.2.2.32770.63684.
- [11] Wirtz, M., Hahn, M., Schreiber, T. and Müller, D., 2021. Design optimization of multi-energy systems using mixed-integer linear programming: Which model complexity and level of detail is sufficient?. *Energy Conversion and Management*, 240, p.114249.
- [12] Orth, R., Staudinger, M., Seneviratne, S.I., Seibert, J. and Zappa, M., 2015. Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. *Journal of Hydrology*, 523, pp.147-159.
- [13] Ridha, E., Nolting, L. and Praktijnjo, A., 2020. Complexity profiles: A large-scale review of energy system models in terms of complexity. *Energy Strategy Reviews*, 30, p.100515.
- [14] Hoffmann, M., Priesmann, J., Nolting, L., Praktijnjo, A., Kotzur, L. and Stolten, D., 2021. Typical periods or typical time steps? A multi-model analysis to determine the optimal temporal aggregation for energy system models. *Applied Energy*, 304, p.117825.
- [15] Teichgraber, H. and Brandt, A.R., 2022. Time-series aggregation for the optimization of energy systems: Goals, challenges, approaches, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, p.111984.
- [16] Simoes, S., Zeyringer, M., Mayr, D., Huld, T., Nijs, W. and Schmidt, J., 2017. Impact of different levels of geographical disaggregation of wind and PV electricity generation in large energy system models: A case study for Austria. *Renewable energy*, 105, pp.183-198.
- [17] Ommen, T., Markussen, W.B. and Elmegaard, B., 2014. Comparison of linear, mixed integer and non-linear programming methods in energy system dispatch modelling. *Energy*, 74, pp.109-118.
- [18] Gabrielli, P., Fürer, F., Mavromatidis, G. and Mazzotti, M., 2019. Robust and optimal design of multi-energy systems with seasonal storage through uncertainty analysis. *Applied energy*, 238, pp.1192-1210.
- [19] Gils, H.C., Pregger, T., Flachsbarth, F., Jentsch, M. and Dierstein, C., 2019. Comparison of spatially and temporally resolved energy system models with a focus on Germany's future power supply. *Applied Energy*, 255, p.113889.
- [20] Kumar, M., Soomro, A.M., Uddin, W. and Kumar, L. Optimal Multi-Objective Placement and Sizing of Distributed Generation in Distribution System: A Comprehensive Review // *Energies*. – 2022. – Vol. 5, N. 21. - P. 7850.
- [21] Wang, L., Yang, Z., Sharma, S., Mian, A., Lin, T.E., Tsatsaronis, G., Maréchal, F. and Yang, Y. A review of evaluation, optimization and synthesis of energy systems: methodology and application to thermal power plants // *Energies*. – 2018. – Vol. 12, N. 1. - P. 73.
- [22] Geidl M., Koeppl G., Favre-Perrod P., Klockl B., Andersson G., Frohlich K. Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 2007, 5(1), pp.24-30.
- [23] Xu, Y., Yan, C., Liu, H., Wang, J., Yang, Z. and Jiang, Y., 2020. Smart energy systems: A critical review on design and operation optimization. *Sustainable Cities and Society*, p.102369.

- [24] Huang, W., Zhang, N., Wang, Y., Capuder, T., Kuzle, I. and Kang, C., 2020. Matrix modeling of energy hub with variable energy efficiencies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119, p.105876.
- [25] Aghamohamadi, M. and Mahmoudi, A., 2019. From bidding strategy in smart grid toward integrated bidding strategy in smart multi-energy systems, an adaptive robust solution approach. *Energy*, 183, pp.75-91.