

Поддержка принятия решений при многокритериальном выборе проекта комбинированной автономной электрогенерации

А.С. Вендин¹, А.В. Ломазов², В.А. Ломазов^{1,3}

¹Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина,

²Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва,

³Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Аннотация: Работа посвящена проблематике развития технологии MicroGrid, состоящей в построении распределенной системы энергоснабжения на базе автономных источников электрогенерации. Целью работы является построение моделей и процедур поддержки принятия решений при многокритериальном выборе проектов комбинированной автономной электрогенерации из большого числа возможных альтернатив. Для достижения цели проведен морфологический анализ предметной области (с использованием метода систематического покрытия поля Ф. Цвикки), в результате которого построено пространство альтернатив комбинированных источников энергии. Проведено групповое упорядочение критериев на основе их экспертного оценивания. Последовательное применение модифицированного метода аналитических сетей с использованием упорядоченных групп критериев позволило на каждом этапе ограничивать число учитываемых критериев (количеством критериев в группе) и последовательно сокращать число альтернатив (рассматривая только несколько лучших альтернативы предыдущего этапа). Предложенная многоэтапная процедура позволяет уменьшить (на каждом этапе) размерность суперматрицы метода аналитических сетей и, тем самым, снизить временную сложность процедуры по сравнению с прямым применением этого метода. Использование предложенной процедуры дает возможность рассмотреть большее число альтернатив с учетом большего числа критериев (по сравнению с традиционными методами поддержки принятия решений), а, значит, позволяет повысить уровень научной обоснованности технико-экономических решений при проектировании MicroGrid-систем.

Ключевые слова: MicroGrid, автономная энергосистема, поддержка принятия решений, метод аналитических сетей.

Введение

В настоящее время все большее распространение получают энергетические системы, построенные на основе технологии MicroGrid [1], предполагающей децентрализованный подход к энергоснабжению на базе автономных (как правило, возобновляемых [2]) источников энергии (АИЭ). Использование MicroGrid позволяет обеспечить надежное и качественное (минимизирующее перепады напряжения и частоты [3]) автономное электроснабжение производственных предприятий, в случаях, когда подключение к централизованной сети технологически (экономически, экологически) нецелесообразно [4].

При проектировании MicroGrid-систем одним из ключевых вопросов является выбор типа и мощности АИЭ (наряду с определением других компонентов, таких как подсистема хранения энергии, распределительная подсистема, подсистема управления и др. [5-7]). Задача выбора АИЭ осложняется, как достаточно значительным количеством учитываемых критериев, так и большим числом (с учетом комбинирования нескольких типов АИЭ) возможных альтернативных решений.

Целью работы является построение моделей и процедур поддержки принятия решений при многокритериальном выборе проектов комбинированной автономной энергогенерации из большого числа возможных альтернатив.

Формирование пространства альтернатив комбинированных автономных источников электрогенерации и групповое упорядочение критериев выбора

Пусть для функционирования производственного комплекса требуется электрогенерация установленной мощности P . Рассмотрим типы АИЭ (достаточно условно разделяемых на 3 класса), которые могут быть использованы в MicroGrid-системе (Таблица 1).

В соответствии с методом морфологического анализа Цвикки ([8]) будем рассматривать установленную мощность каждого типа генерации в виде морфем P_i ($i=1, 2, \dots, 6$). При этом (исходя из имеющейся номенклатуры микро- (мини-) электрогенераторов каждого типа) морфемы могут принимать значения p_{ij} ($i=1, 2, \dots, 6; j=1, 2, \dots, m_i$). Будем полагать, что упорядоченная по возрастанию последовательность значений $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{imi}$ такова, что первый элемент равен 0 (что соответствует отсутствию генерации i -го типа), в то время как предпоследний элемент меньше, а последний больше либо равен P (что соответствует минимально возможному превышению установленной мощности генерации i -го типа требуемой мощности P). Тогда

морфологическая матрица Цвикки будет иметь размерность $6 \times \max(m_i)$, а общее количество рассматриваемых альтернативных вариантов комбинированной энергогенерации составит $N = m_1 \times m_2 \times \dots \times m_6$

Таблица № 1.

Типы АИЭ, применяемых в MicroGrid-системах

№	Тип АИЭ	Обозн.	Установленная мощность
1.	Тепловые (дизельные) электростанции	S_1	Микро-ДЭС – до 15 кВт. Мини- ДЭС – до 100 кВт. Малые ДЭС – до 2 МВт.
2.	Ветряные электростанции	S_2	Микро-ВЭУ – до 5 кВт. Мини- ВЭУ – до 100 кВт. Малые ВЭУ – до 1 МВт.
3.	Солнечные электростанции	S_3	Микро-СЭС – до 20 кВт. Мини-СЭС – до 100 кВт. Малые СЭС – до 200 кВт
4.	Гидроэлектростанции	S_4	Микро-ГЭС – до 100 кВт. Мини-ГЭС– до 1 МВт. Малые ГЭС – до 30 МВт.
5.	Биомассовые (биогазовые) электростанции	S_5	Микро-БГЭС – до 30 кВт. Мини- БГЭС – до 100 кВт. Малые БГЭС – до 1 МВт.
6.	Геотермальные электростанции (тепловые насосы)	S_6	Микро-ГТЭС – до 20 кВт. Мини- ГТЭС – до 100 кВт. Малые ГТЭС – до 300 кВт.

В соответствии с методом морфологического анализа Цвикки ([8]) будем рассматривать установленную мощность каждого типа генерации в виде морфем P_i ($i=1,2,\dots, 6$). При этом (исходя из имеющейся номенклатуры микро- (мини-) электрогенераторов каждого типа) морфемы могут принимать значения p_{ij} ($i=1,2,\dots, 6; j=1,2,\dots, m_i$). Будем полагать, что упорядоченная по возрастанию последовательность значений $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{imi}$ такова, что первый элемент равен 0 (что соответствует отсутствию генерации i -го типа), в то время как предпоследний элемент меньше, а последний больше либо равен P (что соответствует минимально возможному превышению

установленной мощности генерации i -го типа требуемой мощности P). Тогда морфологическая матрица Цвикки будет иметь размерность $6 \times \max(m_i)$, а общее количество рассматриваемых альтернативных вариантов комбинированной энергогенерации составит $N = m_1 \times m_2 \times \dots \times m_6$

В случае, когда морфемы могут принимать от 2 до 4 возможных значений количество различных альтернативных вариантов комбинированных АИЭ будет находиться в диапазоне 64 до 4096. Несколько снизить количество альтернатив можно заранее исключив из рассмотрения некоторые типы электрогенерации (например, природные условия не позволяют построить в данной местности мини- (микро-) гидроэлектростанцию или ее строительство/использование будет заведомо нерентабельным). Однако даже в этом случае количество альтернатив будет достаточно большим, имея в виду, что получившие наибольшее распространение методы многокритериального иерархического выбора (метод анализа иерархий и метод аналитических сетей [9], а также их многочисленные модификации) эффективно работают при небольшом (до нескольких десятков) числе альтернатив ([10, 11]). Следует отметить, что при рассмотренном способе формирования альтернатив общая установленная мощность комбинированного АИЭ может быть как меньше, так и больше P . В первом случае считается, что недостаток автономной мощности компенсируется централизованным энергоснабжением. Во втором случае превышение установленной мощности АИЭ, хотя и негативно сказывается на рентабельности MicroGrid, но улучшает ее надежность (за счет дублирования мощностей), что иногда бывает оправданным.

Задача выбора АИЭ при проектировании MicroGrid носит многокритериальный характер в силу комплексности влияния распределенной энергетики на развитие территорий. Необходимость учета достаточно большого числа различных технологических, экономических,

социальных и экологических аспектов приводит к высокой размерности M множества критериев $C = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$. Например, такой значимый аспект как надежность электрогенераторных установок определяется (в соответствии с ГОСТ Р 53176–2008) на основе 6 показателей (средняя наработка на отказ, среднее время восстановления работоспособного состояния, назначенный ресурс до капитального ремонта и др.), основные из которых могут служить критериями при выборе АИЭ. В зависимости от конкретной постановки задачи многокритериального выбора АИЭ речь может идти о нескольких десятках критериев.

Анализ критериев выбора варианта АИЭ на практике, зачастую, позволяет предварительно оценить их значимости $v(c_m)$, $m=1, 2, \dots, M$, которые должны удовлетворять условиям неотрицательности и нормировки:

$$v(c_m) \geq 0, \quad m=1, 2, \dots, M; \quad v(c_1) + v(c_2) + \dots + v(c_M) = 1$$

Проведем групповое упорядочение множества критериев C , отнеся в одну группу C_r критерии близкой (приблизительно равной с заданной точностью) значимости и введя отношение частичного порядка между группами $\succ$ в соответствии со значимостями входящих в них критериев. Формально это можно представить в виде:

$$C = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_R, \quad C_1 \succ C_2 \succ \dots \succ C_R,$$

$$C_r = \{c_{r1}, c_{r2}, \dots, c_{rM(r)} \mid v(c_{r1}) \approx v(c_{r2}) \approx \dots \approx v(c_{rM(r)})\}$$

где $C_i \succ C_j$, если $v(c^*) > v(c^{**}) \quad \forall c^* \in C_i, \forall c^{**} \in C_j$

Следует отметить, что предложенное групповое упорядочение возможно только при выполнении компактности и отделимости критериев по значимости, что наглядно представлено на рис. 1, где на числовой оси показаны значимости девяти критериев $c_1, c_2, \dots, c_9$, сгруппированных в три группы C_1, C_2, C_3

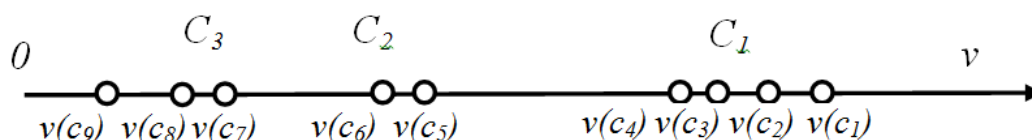


Рис. 1. Пример группировки и группового упорядочения критериев

Сделанные предположения относительно возможности указанного структурирования множества критериев позволяют построить на базе метода аналитических сетей (МАС) процедуру выбора АИЭ с последовательным сокращением области поиска при поочередном (в соответствии с групповым упорядочением) использовании построенных групп критериев.

Процедура выбора АИЭ на основе последовательного сокращения области поиска

Разработанная процедура (упрощенная схема представлена на рис.2) содержит следующие основные этапы:

1. Ввод формализованных представлений вариантов АИЭ, критериев и параметров процедуры
2. Построение исходной области поиска методом Ф. Цвикки.
3. Рассмотрение исходного множества критериев выбора.
4. Групповое упорядочение критериев выбора и рассмотрение первой группы критериев.
5. Решение задачи выбора для рассматриваемого множества альтернатив с использованием очередной группы критериев, состоящее в определении заданного количества наихудших альтернатив и их исключения из области поиска.
6. Если перечень групп критериев исчерпан (условие останова), то вывод сокращенной области поиска и конец работы процедуры, иначе переход на п.5 с рассмотрением следующей группы критериев для новой области поиска.

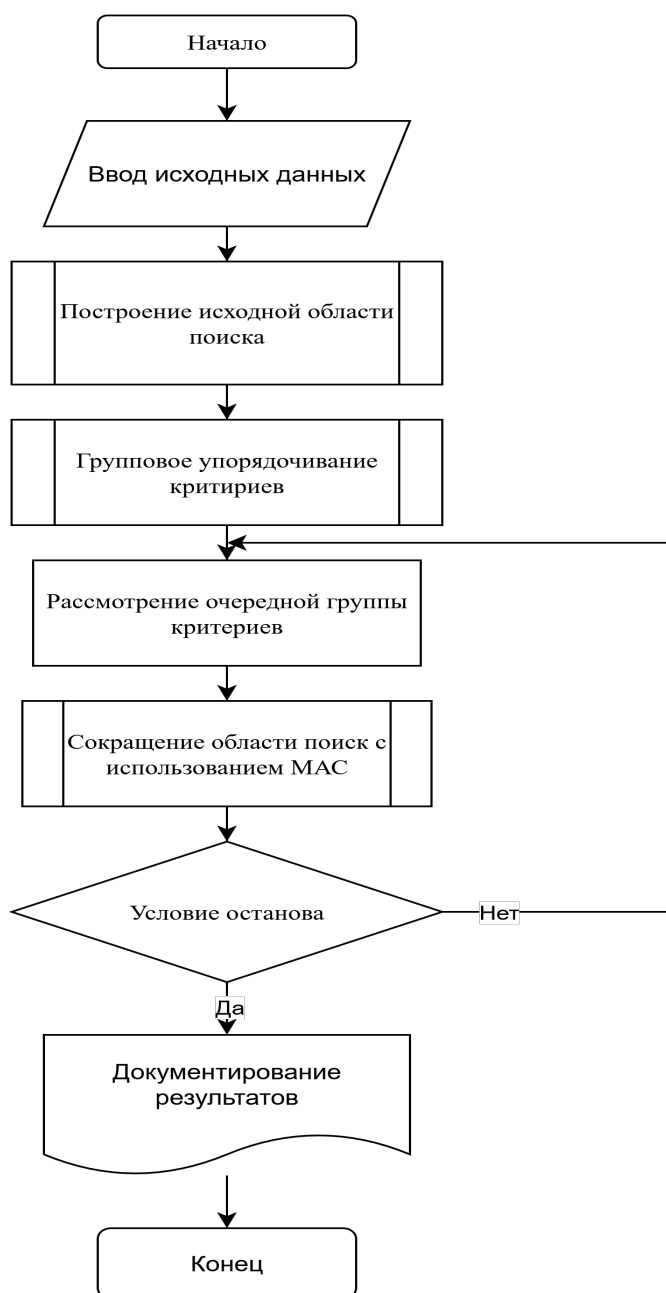


Рис. 2. Упрощенная схема процедуры выбора АИЭ на основе последовательного сокращения области поиска

В результате работы процедуры область поиска сокращается до небольшого (3-5) числа альтернатив, после чего окончательный выбор варианта АИЭ осуществляется ЛПР (лицо, принимающее решение) на основе собственных (зачастую, не формализуемых) предпочтений.

Результаты вычислительных экспериментов и выводы

Для проверки эффективности разработанной процедуры выбора АИЭ проведены вычислительные эксперименты, состоящие в нахождении решения с использованием МАС и с использованием разработанной процедуры (программно реализованной на языке Python с применением Python-библиотек `ruamp`, `scipy`), после чего производилось сравнение затраченного машинного времени в общей области применимости. В рамках расчетов оценки альтернатив по каждому критерию формировались случайным образом с равномерной функцией распределения и последующей нормировкой. Первая группа критериев состояла из одного (главного) критерия. При случайном формировании значимостей остальных критериев для обеспечения возможности их группового упорядочения (т.е. обеспечения компактности и разделимости) использовались суммы гауссовых распределений с последующей нормировкой. При этом количество слагаемых соответствовало числу групп критериев. Результаты вычислительных экспериментов приведены в таблице 2. Как видно из результатов вычислительных экспериментов эффект достигается в случае когда количество критериев близко или превосходит количество альтернатив.

Таблица № 2.

Соотношение времени выполнения процедур поиска решения при использовании разработанной процедуры и МАС

		Количество критериев				
		10	20	30	40	50
Количество альтернатив	20	0.8	0.37	0.22	0.14	0.09
	50	1.02	0.61	0.4	0.27	0.23
	100	1.23	0.79	0.73	0.58	0.46

В качестве вывода следует отметить, что разработанную процедуру можно рассматривать в качестве предназначенной для решения задачи выбора при большом числе критериев и альтернатив модификации МАС, основанной на групповом упорядочении критериев и последовательном сокращении области поиска. Применение этой процедуры целесообразно при выполнении предположений относительно возможности корректного группового упорядочения критериев.

Заключение

Проектирование MicroGrid-систем представляет собой сложную научно-техническую задачу, решение которой требует обеспечения информационно-аналитической поддержки с использованием инструментария автоматизации научных исследований и, в частности, систем поддержки принятия проектных решений (СПППР).

Рассмотренная в работе задача многокритериального выбора АИЭ MicroGrid-системы имеет высокую размерность, связанную с большим числом и критериев, и альтернатив, что делает неэффективным использование ставших уже традиционными методов иерархического выбора (МАИ, МАС). Предложенная в работе процедура, основанная на многократном применении МАС с последовательным сокращением числа критериев и размерности области поиска, позволяет существенно уменьшить время работы процедур выбора и делает целесообразным ее использование в рамках алгоритмического обеспечения СПППР, что может способствовать решению задачи повышения уровня научной обоснованности технико-экономических решений при проектировании MicroGrid-систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 24-21-00059.

Литература

1. Xing X., Jia L. Energy management in microgrid and multi-microgrid // IET Renewable Power Generation. 2023. 18(15). Pp. 3480-3508.
2. Шеина С.Г., Пирожникова А.П. Тенденции развития альтернативной энергетики в странах мира и России // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720.
3. Chen Y., Zhao J., Wan K., Yu M. Delay-tolerant hierarchical distributed control for DC microgrid clusters considering microgrid autonomy// Applied Energy. 2025. 378. P.124905.
4. Lomazov V. A., Lomazov A. V., Akupiyani O. S., Akupiyani A. N., Nesterova E.V. Decision support in the management of multi-stage regional environmental projects // Proceedings of SPIE. 2023. 12637. P. 126370P.
5. Yokoyama R., Zhou Y. MicroGrid Designer: user-friendly design, operation and control assist tools for resilient microgrid and autonomous community // Global Energy Interconnection. 2022. 5(3). 249-258.
6. Ковалёв В.З., Парамзин А.О. Анализ подходов к оптимизации структуры и состава генерирующего комплекса в задачах распределенной генерации // Инженерный вестник Дона. 2022. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7997.
7. Вендин А.С., Вохменов С.В., Голованова Е.В., Ломазов А.В., Ломазов В.А. Поддержка принятия решений при выборе проекта автономной электрогенерации для малых производственных предприятий // Инженерный вестник Дона. 2024. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9351.
8. Vetokhin S., Tulekbayeva A., Sabyrkhanov D. Morphological approach in inventive act and management //Industrial Technology and Engineering. 2016. № 1 (18). pp. 89-95.

9. Saaty T.L. Decision making – the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP) //Journal of Systems Science and Systems Engineering. 2004. №13. Pp. 1-35.

10. Munier N., Hontorio E. Uses and Limitations of the AHP Method A Non-Mathematical and Rational Analysis. Management for Professionals. Switzerland:Springer Nature. 2021. 130 p.

11. Liu Q. Identifying and correcting the defects of the Saaty analytic hierarchy/network process: A comparative study of the Saaty analytic hierarchy/network process and the Markov chain-based analytic network process // Operations Research Perspectives. 2022. 9. P. 100244.

References

1. Xing X., Jia L. IET Renewable Power Generation. 2023. 18(15). Pp. 3480-3508.

2. Sheina S.G., Pirozhnikova A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3720.

3. Chen Y., Zhao J., Wan K., Yu M. Applied Energy. 2025. 378. P.124905.

4. Lomazov V. A., Lomazov A. V., Akupiyani O. S., Akupiyani A. N., Nesterova E.V. Proceedings of SPIE. 2023. 12637. P. 126370P.

5. Yokoyama R., Zhou Y. Global Energy Interconnection. 2022. 5(3). 249-258.

6. Kovalev V.Z., Paramzin A.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7997.

7. Vendin A.S., Vokhmenov S.V., Golovanova E.V., Lomazov A.V., Lomazov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2024/9351.

8. Vetokhin S., Tulekbayeva A., Sabyrkhanov D. Industrial Technology and Engineering. 2016. № 1 (18). pp. 89-95.



9. Saaty T.L. Journal of Systems Science and Systems Engineering. 2004. №13. Pp. 1-35.
10. Munier N., Hontorio E. Management for Professionals. Switzerland:Springer Nature. 2021. 130 p.
11. Liu Q. Operations Research Perspectives. 2022. 9. P. 100244.

Дата поступления: 11.09.2025

Дата публикации: 26.10.2025