УДК 658.261 : 519.67
doi 10.24411/2221-0458-2020-10040

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Кенден К.В., Сарыг-оол С.М.
Тувинский государственный университет, г. Кызыл

MATHEMATICAL METHODS FOR OPTIMIZING AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS BASED ON SOLAR-DIESEL PLANTS

K.V. Kenden, S.M. Saryg-ool
Tuvan State University, Kyzyl

Для решения оптимизационных задач в настоящее время разработано большое количество математических методов и программ моделирования в области возобновляемых источников энергии. В работе рассмотрены особенности наиболее часто применяемых методов оптимизации автономных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. Для моделирования рассмотренных методов представлены характерные особенности наиболее известных оптимизационных программам моделирования. В зависимости от возможности нахождения целевой функции представлены наиболее используемые математические методы оптимизации автономных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: автономные системы электроснабжения; возобновляемые источники электроснабжения; моделирование; оптимизация

To solve optimization problems, a large number of mathematical methods and modeling programs in the field of renewable energy sources have been developed. The paper considers the features of existing methods for optimizing autonomous power supply systems using renewable energy sources. For modeling the considered methods, the characteristic features of the best known optimization modeling programs are presented. Depending on the possibility of finding the objective function the most used mathematical methods for optimizing autonomous power supply systems using renewable energy sources are presented. The paper presents the most commonly used programs for modeling autonomous power supply systems using renewable energy sources.

Keywords: autonomous power supply systems; renewable power supply sources; modeling, optimization

Задачи оптимизации сводятся к задаче поиска экстремума (минимума или максимума) целевой функции с заданными ограничениями. При этом необходимо определить значения вектора переменных $x=(x_1, x_2, \ldots, x_m)$, удовлетворяющие ограничениям вида:

$$g_i(x_1, x_2, ..., x_m) \le b_i$$

для всех $i=1,\ldots, k$ и при которых достигается максимум или минимум целевой функции $f_i(x_1, x_2, ..., x_m)$:

$$f_i(x_1, x_2, ..., x_m) \to (\max, \min).$$

Решением задачи, удовлетворяющим ее ограничениям, является пара $(x^*, f^*(x^*))$, состоящая из оптимального решения и оптимального значения целевой функции.

В зависимости от возможности нахождения экстремума в данной работе представлены наиболее популярные методы оптимизации автономных систем электроснабжения (АСЭС) с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ): «Генетический алгоритм», «Метод роя частиц» и «Моделируемый отжиг».

Входными данными могут быть метеорологические характеристики местности, экономические показатели существующей дизельной электростанции.

«Генетический алгоритм» (разработчик Джон Холлади, 1975 г.) Основан на генетическом процессе биологических организмов. В начале метод предлагает случайные размеры для системы. Каждое из случайных решений оценивается в соответствии с целевой функцией. Далее выбор определенного процента исходной популяции дает возможность предоставления новых возможных решений для достижения более высоких значений пригодности. Затем на каждой итерации продолжается выбор решений с наилучшей целевой функцией и создание новой популяции. Процедура, состоящая из цикла отбора, скрещивания и мутации, продолжается до окончания итерационного процесса.

Преимущества:

– эффективность нахождения глобального оптимума;

– подходит для сложных задач с числом элементов.

Недостатки:

– метод не гарантирует обнаружения глобального решения за приемлемое время;

– относительная сложность при кодировании алгоритма.

Метод широко используется в АСЭС с использованием солнечно-дизельных установок (СДУ) [1-3].

«Метод роя частиц» (разработчики Джеймс Кеннеди, Рассел Эберхарт, 1995 г.).

Процесс оптимизации на основе «метода роя частиц» представляет собой процедуру стохастической оптимизации на основе популяции. Каждое потенциальное

решение в популяции называется частицей. Координаты каждой частицы представляют собой возможное решение, связанное с положением и вектором скорости. Каждая частица инициализируется случайной скоростью и пролетает через пространство поиска. На каждой итерации частица движется к оптимальному решению, благодаря своей текущей скорости, личному наилучшему решению, полученному до сих пор, и глобальному наилучшему решению, полученному всеми частицами. Процедура оптимизации будет продолжаться до тех пор, пока не будут достигнуты заранее определенные критерии завершения.

Преимущества:

– метод имеет довольно простой алгоритм, включающий несколько уравнений, которые легко можно реализовать в программной среде;

– метод довольно быстро находит глобальный оптимум за короткое время;

– при использовании метода требуется меньше параметров.

Недостатки:

– надежность нахождения глобального оптимума ниже, чем в методе «генетического алгоритма»;

– не подходит для сложных задач с большим числом элементов АСЭС.

Использование метода «роя частиц» в АСЭС с использованием СДУ представлено в работах [5,6].

«Моделируемый отжиг» (разработчик Кирк Патрик, нач. 80-х гг.).

На каждой итерации случайным образом выбирается ход. Ход принимается, если он приводит к решению с лучшим значением целевой функции, чем текущее решение. В противном случае ход принимается с вероятностью, которая зависит от ухудшения значения целевой функции на основе «критериев мегаполиса». Если новое решение лучше чем текущее лучшее решение в популяции, то новое решение принимается. С другой стороны, если это новое решение имеет худшее значение целевой функции, чем текущее лучшее решение в популяции, то новое решение также может быть принято и рассмотрено для новой популяции на следующей итерации в зависимости от разницы между его значением и лучшим значением целевой функции. Процедура отжига в зависимости от декремента температуры позволяет осуществлять широкий поиск по более быстрому декременту температуры в начале итерационного процесса, затем локальный поиск вокруг лучших решений в широких шагах поиска с более медленным декрементом температуры на следующих шагах алгоритма.

Преимущества:

– возможность избежать локальных минимумов оптимизируемой функции.

Недостатки:

– относительно низкая производительность для нахождения глобального оптимума по сравнению с методами «генетического алгоритма» и «роя частиц»;

– не подходит для сложных задач с большим числом элементов АСЭС.

Использование метода «Моделируемого отжига» в АСЭС на основе СДУ не так популярно, как «Генетический алгоритм» и «Роя частиц».

Кроме перечисленных методов, в зарубежных научных работах встречаются такие методы оптимизации АСЭС на основе СДУ как «линейное программирование», «метод нейронных сетей», «поиск по симплексу» [7] и др.

Выполненный обзор математических методов оптимизации показал, что для АСЭС на основе СДУ, состоящей их трех электрогенерирующих элементов, наиболее подходящим является «метод роя частиц». Метод имеет простой алгоритм реализации в программной среде, при этом он довольно быстро находит глобальный оптимум за короткое время по сравнению с другими методами.

АСЭС на основе СДУ характеризуется сложностью на этапе выбора состава электрогенерирующих элементов, при этом фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), аккумуляторные батареи (АБ) и дизельные генераторы (ДГ) должны иметь суммарную мощность (емкость), соответствующую нагрузке потребителя электроэнергии и интенсивности СИ. По этой причине моделирование математических методов в программно-вычислительном комплексе (ПВК) позволяет значительно упростить и сократить процесс проектирования АСЭС.

На рынке существует большое количество программ моделирования АСЭС с использованием СДУ. Для анализа в работе отобраны 7 программ моделирования АСЭС на основе СДУ [8].

PV-SPS (версия 3.0)

Программа разработана австралийским деловым советом по устойчивой энергетике на электронных таблицах Excel. Программа дает три варианта состава ФЭП для среднегодового и среднемесячных значений интенсивности СИ, характерных для лета и зимы, и установленную мощность ДГ, соответствующего выбранному режиму работы системы. Несмотря на то, что при вводе берутся всего лишь два графика нагрузки и данные о выработке электроэнергии на выходе программа дает хорошее представление о производительности АСЭС на основе СДУ в течение года.

Одной из особенностей PV-SPS является ввод двух групп нагрузок, характерных для лета и зимы. При этом для каждого месяца указываются региональные

факторы сезонных нагрузок, а также данные об интенсивности СИ и температуре окружающей среды для четырех различных районов Австралии. Программа выполняет расчеты только по австралийским отраслевым стандартам для внесетевых систем [9].

RETScreen (версия 4)

Программа основана на электронных таблицах Excel, разработана Министерством природных ресурсов Канады и поддерживает базовые расчеты параметров и структуры АСЭС на основе СДУ. RETScreen отличается быстрым и простым вводом, т.к. база имеет климатические данные для более чем 6000 наземных станций (ежемесячные данные об интенсивности СИ и температуры за год). Кроме этого можно получить климатические данные для любой выбранной географической точки из базы NASA. Программа предлагается на более чем 30 языках и включает в себя широкий спектр дополнительных инструментов, охватывающих другие возобновляемые источники энергии [10].

*PV * SOL Professional (версия 3)*

Программа, разработанная в Германии, рассчитывает выработку электроэнергии АСЭС на основе СДУ и экономическую эффективность. При вводе данных о нагрузке потребителей можно ввести отдельные графики нагрузки или ограничиться годовым потреблением электроэнергии и выбором кривой нагрузки. Результаты моделирования выводятся в виде графиков (характеристические кривые для конкретных параметров) или таблиц с возможностью вывода до восьми различных переменных одновременно [11].

PVsyst (Версия 4.33)

Программа моделирования с временным шагом, разработанная в Женевском университете Швейцарии моделирует АСЭС на основе СДУ в зависимости от интенсивности СИ и нагрузки потребителей.

Графики нагрузки могут быть заданы различными способами: индивидуальные входы, создание профиля нагрузки, вероятности определенных значений мощности, импорт данных и дифференциация отдельных периодов. Выходные параметры результатов представлены в виде характерных кривых конкретных параметров [12].

Hybrid2 (версия 1.3 с R3)

Программа моделирования, разработанная Национальной лабораторией возобновляемой энергии Министерства энергетики США в сотрудничестве с Университетом Массачусетса, является одной из первых программ в этой области. Она была реализована для анализа АСЭС с несколькими источниками энергии (ФЭП, ДГ, ВЭУ) и предлагает оптимальную структуру и экономическую оценку АСЭС

с использованием ВИЭ. Отличительная особенность программы – точность расчета в промежутке интервалом от 10 минут до 1 часа [13].

PV-DesignPro (версия 6.0)

Программа моделирования временных шагов, разработанная в США, предназначена для АСЭС, в состав которого входит ФЭП и ВЭУ. Программа оптимизирует состав АСЭС, включает в себя экономический анализ, расчет выработки электроэнергии электрогенерирующих элементов.

Наряду с достаточно полной внутренней климатической базой данных о температуре, интенсивности СИ и скорости ветра имеется также база данных, включающая более 400 различных ФЭП.

HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) (версия 2.67 beta)

Программа, разработанная американской Национальной Лабораторией возобновляемых источников энергии (NREL), предназначена для расчета энергосистем малой мощности и сравнения различных способов производства энергии. «HOMER» моделирует физическое поведение энергосистемы и её стоимость за период эксплуатации, включая стоимость установки и затраты на дальнейшую эксплуатацию. «HOMER» позволяет проектировщику сравнить множество различных вариантов конструкции энергосистемы и определить её технические и экономические достоинства, помогает определить риски, связанные с изменчивостью погодных условий. При помощи комплекса «HOMER» можно рассчитать автономную энергосистему, которая содержит различные комбинации источников энергии (ФЭП, ветрогенераторы, микро-ГЭС, биогазовые установки, ДВС, микротурбины, топливные элементы, АКБ и водородные источники).

Структура программы содержит 3 основных модуля: моделирование, оптимизация и анализ чувствительности. «HOMER» представляет результаты проектирования в виде таблиц и графиков, что облегчает сравнение различных конфигураций и позволяет определить экономические и технические преимущества различных систем.

Общий вид окна программы представлен на рисунке 1.

Файл программы HOMER» содержит всю информацию о технологических вариантах, затратах и доступности ресурса, которые необходимо проанализировать при проектировании.

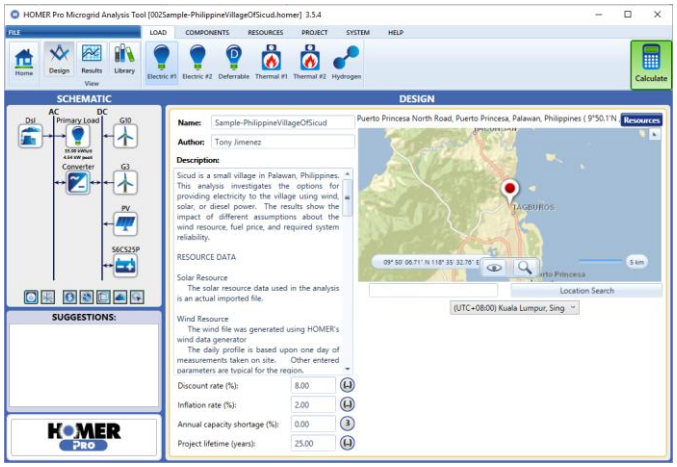

Рисунок 1 - Интерфейс программы моделирования АСЭС на основе ВИЭ «Homer»

Характерные особенности описанных ПВК для оптимизации АСЭС на основе СДУ представлены в таблице 1.5.

Таблица 1

Обзор программного обеспечения и моделирования АСЭС на основе СДУ

№	Программа, версия	Страна	Языковые варианты	Элементы	Наличие базы данных интенсивности СИ	Экономи-ческий анализ
1	**PV-SPS, 3.0**	Австралия	Англ.	ФЭП+ДГ+АБ	Только для 4 районов Австралии	нет
2	**RETScreen, 4**	Канада	Более 30	ФЭП+ДГ+АБ+ВИЭ	600 станций, NASA	есть
3	**PV*Sol, 3.0**	Германия	5	ФЭП+ДГ+АБ	NASA	есть
4	**PVsyst,4.33**	Швейцария	5	ФЭП+ДГ+АБ+др. ВИЭ	NASA	есть
5	**Hybrid2,** 1,3c R3	США	Англ.	ФЭП+ДГ+АБ+ВЭУ	NASA	есть
6	**PV-DesignPro, 6.0**	США	Англ.	ФЭП+ДГ+АБ+ВЭУ	NASA	есть
7	**HOMER, 2.67**	США	Англ.	ФЭП+ДГ+АБ+ др. ВИЭ	NASA	есть

Рассмотренные ПВК выполняют оптимизацию в основном для любой географической точки на земле по базе данных NASA и по графикам нагрузки потребителей. В программе «*PV-DesignPro»* наряду с достаточно полной внутренней климатической базой данных о температуре, интенсивности СИ и скорости ветра имеется также база данных, включающая более 400 различных ФЭП. В ПВК при оптимизации предусмотрена экономическая оценка полученных вариантов (за исключением «**PV-SPS»**). Программы «HOMER» и «Hybrid2» оптимизируют состав не только АСЭС на основе СДУ, но других видов ВИЭ, что усложняет процесс оптимизации ПВК.

Однако в рассмотренных ПВК следует отметить ряд недостатков, которые влияют на оптимизацию АСЭС на основе СДУ:

–Использование среднемесячных данных по интенсивности СИ;

–Отсутствие комплексного учета влияния климатических факторов местности и внутренних параметров и способа ориентации ФЭП на величину выработки ФЭП;

–Отсутствие учета корреляции между реальной выработкой ФЭП и режимами заряда и разряда АБ, и их влиянием на расход ДТ;

–Отсутствие влияния на экономические показатели реального срока службы и числа замен АБ с учетом режимов заряда и разряда.

Библиографический список

1. Suchitra D. Optimization of a hybrid stand-alone power system using Multi-objective genetic algorithm / B. Suchitra, R. Utthra, R. Jegadeesan, B. Tushar. Transactions on Electronics Engineering, 2013. Vol.1. P.114-120.
2. Yang H., Zhou W., Lu L., Fang Z. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm. Solar Energy 2008;82(4): P. 354-67.
3. Khatib, Tamer, Azah Mohamed, and K. Sopian. "Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: Case study of Kuala Terengganu, Malaysia." Energy and Buildings 47 (2012): P. 321-331.
4. Hakimi S.M., Tafreshi S.M.M., Kashefi A. Unit sizing of a stand-alone hybrid powersystem using particle swarm optimization (PSO). In: IEEE international conference on automation and logistics. 2007. P. 3107-12.
5. Tafreshi SMM, Hakimi SM. Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization (PSO). In: International powerengineering conference (IPEC). 2007. P. 960-5.
6. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization

of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. Applied Energy 2010; 87(2) : 592-8.

7. Report IEA-PVPS T11- 01:2011 World-wide overview of design and simulation tools for hybrid PV systems. http://www.ecowrex.org/document/world-wide- overview-design-and-simulation-tools-hybrid-PV- systems, 2011
8. Clean energy council : [сайт]. URL: http://www.cleanenergycouncil.org.au/cec/accreditation/Solar-PVаккредитация/формы.html/ (дата обращения: 11.12.2015). Текст : электронные.
9. Natural Resources Canada [сайт]. URL: https://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465 (дата обращения: 11.12.2015 г.). Текст : электронные.
10. Pvsyst photovoltaic software [сайт]. URL: http://www.pvsyst.com/5.2/index.php (дата обращения: 11.12.2015 г.). Текст : электронные.
11. Battery and Energy Technologies [сайт]. URL: http://www.pvsyst.com/5.2/index.php (дата обращения: 11.12.2015 г.). Текст : электронные.
12. Maui Solar Energy Software Corporation. [сайт]. URL: http://www.mauisolarsoftware.com/ (дата обращения: 11.12.2015). Текст : электронные.
13. Homer Energy. [сайт]. URL: http://www.homerenergy.com/ (дата обращения: 11.12.2015). Текст : электронные.

References

1. Suchitra D. et al. Optimization of a hybrid stand-alone power system using Multi-objective genetic algorithm. Transactions on Electronics Engineering: 2013. - Vol.1- P.114-120.
2. Yang H., Zhou W., Lu L. and Fang Z. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm. Solar Energy 2008; 82 (4): 354-67.
3. Khatib, Tamer, Azah Mohamed, and K. Sopian. "Optimization of a PV / wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative / genetic algorithm: Case study of Kuala Terengganu, Malaysia. Energy and Buildings, 47 (2012): 321-331.
4. Hakimi S.M., Tafreshi S.M.M., Kashefi A. Unit sizing of a stand-alone hybrid powersystem using particle swarm optimization (PSO). In: IEEE international conference on automation and logistics. 2007, p. 3107-12.
5. Tafreshi S.M.M, Hakimi S.M. Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization (PSO). In: International powerengineering conference (IPEC). 2007, p. 960-5.

6. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV / wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing. Applied Energy 2010; 87 (2): 592-8.
7. Report IEA-PVPS T11-01: 2011 World-wide overview of design and simulation tools for hybrid PV systems. Available at: http://www.ecowrex.org/document/world-wide- overview-design-and-simulation-tools-hybrid-PV- systems, 2011
8. Clean energy council. Web site. Available at: http://www.cleanenergycouncil.org.au/cec /accreditation/Solar-PV accreditation / forms.html / (access date: 11.12.2015).
9. Natural Resources Canada Website. Available at: access: https://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465 (access date: 11.12.2015).
10. Pvsyst photovoltaic software Website. Available at: http://www.pvsyst.com/5.2/index.php (access date: 11.12.2015).
11. Battery and Energy Technologies Website. Available at: http://www.pvsyst.com/5.2/index.php (access date: 11.12.2015).
12. Maui Solar Energy Software Corporation. Web site. Available at: http://www.mauisolarsoftware.com/ (access date: 11.12.2015).
13. Homer Energy. Web site. Available at: http://www.homerenergy.com/ (access date: 11.12.2015).

Кенден Кара-кыс Вадимовна – старший преподаватель Тувинского государственного университета, г. Кызыл, e-mail.ru: Kuca08@mail.ru

Сарыг-оол Сайлык Маар-ооловна – старший преподаватель Тувинского государственного университета, г. Кызыл, e-mail.ru: anandyy@yandex.ru

Kenden Kara-Kys Vadimovna – Senior Lecturer, Tuvan State University, Kyzyl, e-mail.ru: Kuca08@mail.ru

Saryg-ool Saylyk Maar-oolovna – Senior Lecturer, Tuvan State University, Kyzyl, e-mail.ru: anandyy@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26.08.2020.