

Махмутхонов Султонхужа Комолхужа угли
кандидат наук, старший преподаватель, ТГТУ
Makhmutkhonov Sultonkhoja, TSTU

Самиев Шохрух Салим угли,
Ассистент, ТГТУ
Samiev Shohrukh, TSTU

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS FOR OPTIMAL DESIGN OF DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS

Аннотация. В условиях активного развития электроэнергетических систем и внедрения распределённой генерации задача оптимального проектирования распределённых электрических сетей приобретает особую актуальность. Современные распределительные сети характеризуются сложной топологией, нелинейными режимами работы и наличием множества технических и экономических ограничений, что существенно усложняет применение классических детерминированных методов оптимизации. В связи с этим в данной статье рассматривается использование генетических алгоритмов как эффективного инструмента для решения задачи оптимального проектирования распределённых электрических сетей. В работе сформулирована многокритериальная задача оптимизации, направленная на минимизацию потерь активной мощности, капитальных и эксплуатационных затрат при одновременном обеспечении допустимых уровней напряжения в узлах сети, ограничений по токам в линиях и сохранении радиальной структуры сети. Разработана математическая модель распределённой электрической сети, включающая энергетические и топологические ограничения. В рамках генетического алгоритма предложен способ кодирования конфигурации сети, а также метод формирования функции приспособленности с использованием штрафных коэффициентов за нарушение технических ограничений. Для оценки эффективности предложенного подхода проведено численное моделирование на тестовой распределённой сети. Полученные результаты демонстрируют значительное снижение потерь активной мощности, улучшение профиля напряжений и повышение общей технико-экономической эффективности по сравнению с исходной конфигурацией сети.

Abstract. In the context of the rapid development of power systems and the increasing integration of distributed generation, the problem of optimal design of electrical distribution networks has become particularly relevant. Modern distribution networks are characterized by complex topologies, nonlinear operating conditions, and numerous technical and economic constraints, which significantly complicates the application of classical deterministic optimization methods. Therefore, this paper investigates the use of genetic algorithms as an effective tool for solving the optimal design problem of electrical distribution networks. In this study, a multi-objective optimization problem is formulated with the aim of minimizing active power losses as well as capital and operating costs, while simultaneously satisfying voltage limits at network buses, current constraints in distribution lines, and maintaining a radial network structure. A mathematical model of the electrical distribution network is developed, incorporating power flow equations and topological constraints. Within the framework of the genetic algorithm, an efficient encoding scheme for network configurations is proposed, along with a fitness function formulation that employs penalty factors to handle technical constraint violations. To evaluate the effectiveness of the proposed approach, numerical simulations are carried out on a test distribution network. The obtained



results demonstrate a significant reduction in active power losses, an improvement in voltage profiles, and an overall enhancement of techno-economic performance compared to the initial network configuration

Ключевые слова: Генетический алгоритм, распределённых электрических сетей, оптимизация, проектирование, расчет режимов, капитальные затраты, математическая модель, надёжность

Keywords: Genetic algorithm, electrical distribution networks, optimization, design, power flow analysis, capital costs, mathematical model, reliability

Введение. Современный этап развития электроэнергетических систем характеризуется активным ростом нагрузок, усложнением структуры распределённых электрических сетей и широким внедрением распределённой генерации. В этих условиях обеспечение энергоэффективности, надёжности и экономичности распределительных сетей становится одной из ключевых задач электроэнергетики. Проектирование распределённых электрических сетей требует учёта множества взаимосвязанных технических, экономических и топологических факторов, что существенно усложняет процесс принятия оптимальных инженерных решений.

Традиционные методы проектирования и оптимизации распределительных сетей, основанные на детерминированных алгоритмах и аналитических подходах, часто оказываются недостаточно эффективными при решении задач большой размерности с нелинейными ограничениями. Кроме того, наличие дискретных переменных, таких как выбор конфигурации сети, сечений линий и коммутационных аппаратов, ограничивает возможности применения классических методов оптимизации. В связи с этим возрастает интерес к использованию интеллектуальных и эвристических методов, способных обеспечивать поиск близких к оптимальным решений в сложных условиях. Одним из наиболее перспективных методов решения подобных задач являются генетические алгоритмы, относящиеся к классу эволюционных методов оптимизации. Генетические алгоритмы основаны на принципах естественного отбора и наследственности и обладают высокой гибкостью при работе с многокритериальными, нелинейными и дискретными задачами. Их применение позволяет учитывать одновременно технические ограничения, экономические показатели и требования по надёжности функционирования распределённых электрических сетей.

В последние годы генетические алгоритмы находят широкое применение при решении задач оптимизации конфигурации распределённых сетей, минимизации потерь активной мощности, выбора оптимальных параметров оборудования и снижения капитальных затрат. При этом особое значение приобретает корректный расчёт режимов работы сети, который, как правило, осуществляется на основе численных методов, включая метод Гаусса, обеспечивающий решение систем нелинейных уравнений установившегося режима. Несмотря на значительное количество исследований в данной области, задача комплексного оптимального проектирования распределённых электрических сетей с одновременным учётом потерь мощности, капитальных затрат, режимных ограничений и показателей надёжности остаётся актуальной и требует дальнейшего развития. В этой связи разработка и исследование методов оптимального проектирования распределённых электрических сетей на основе генетических алгоритмов представляет собой важную научно-практическую задачу.

Целью данной работы является разработка математической модели и алгоритмического подхода к оптимальному проектированию распределённых электрических сетей с использованием генетических алгоритмов, а также оценка эффективности предложенного метода на основе численного моделирования.

Постановка задачи. В рамках настоящего исследования разрабатываемая методика оптимального проектирования распределённых электрических сетей на основе генетических алгоритмов ориентирована на решение следующих основных задач:



- определение оптимальной конфигурации распределённой электрической сети с выбором рациональных межузловых связей и обеспечением радиальной структуры сети;
- выбор оптимальных сечений линий электропередачи на основе режимных расчётов и технико-экономических показателей;
- минимизация суммарных капитальных и эксплуатационных затрат, связанных со строительством и эксплуатацией элементов распределённой электрической сети;
- обеспечение допустимых показателей качества электрической энергии, включая уровни напряжения в узлах и величины потерь активной мощности;
- повышение надёжности функционирования распределённой электрической сети за счёт оптимального проектирования топологии и параметров её элементов.

Целевая функция и функции ограничения. При постановке задачи было решено, что критерием оптимизации является минимизация капитальных и эксплуатационных затрат, повышение надёжности и эксплуатационных затрат. Далее, по данным критериям составим целевую функцию.

$$f1 \cdot k_1 + f2 \cdot k_2 + f3 \cdot k_3 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $f1$ – параметр, отвечающий за капитальные и эксплуатационные затраты; $f2$ – параметр, отвечающий за потери в сети; $f3$ – параметр, отвечающий за показатели качества электрической энергии; k_1, k_2, k_3 – весовые коэффициенты, которые позволяют регулировать важность параметров $f1, f2, f3$. Параметры $f1, f2, f3$ ниже будут рассмотрены подробнее.

Параметр $f1$ отвечает за капитальные и эксплуатационные затраты:

$$f1 = p_n \cdot K + C, \quad (2)$$

где p_n – нормативный коэффициент эффективности, K – капитальные затраты, C – эксплуатационные затраты.

$$K = \sum_{i=1}^{i=n} K_{ВЛ,i} + K_{МТ,i} + K_{АКБ,i} + \sum_{j=1}^{j=n} K_{ВЛ,j-i} \quad (3)$$

где $K_{ВЛ,i}$ – стоимость строительства ВЛ от центра питания энергосистемы до i узла, $K_{ВЛ,i}$ – стоимость строительства ВЛ от узла j питания до i узла, $K_{МТ,i}$ – стоимость строительства МТ.

$$C = \sum_{i=1}^{i=n} (C_{МТ,i} \cdot P_{МТ,i} + C_{ВЛ,i} \cdot P_{ВЛ,i} + I_{ВЛ,j-i} + I_{ВЛ,i} + I_{МТ,i} + I_{Пот}) \quad (4)$$

где $P_{ВЛ,i}$ – переток мощности от внешней энергосистемы в узел i ; $P_{МТ,i}$ – мощность микротурбины, установленной в узле i ; $C_{МТ,i}$ – удельная стоимость первичного энергоносителя на единицу мощности; $C_{ВЛ,i}$ – удельная стоимость электрической энергии получаемой с энергосистемы на единицу мощности; $I_{ВЛ,i}$ – эксплуатационные расходы ВЛ, связывающих ЭС с узлом i ; $I_{МТ,i}$ – эксплуатационные расходы МТ в узле i ; $I_{ВЛ,j-i}$ – эксплуатационные расходы ВЛ, связывающих узлы i и j ; $I_{Пот}$ – потери в сети. Параметр $f2$, отвечающий за потери определяется следующим образом:

$$f2 = \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} |V_{i,t} - V_{j,t}|^2 |Y_{i,j}| \cdot \cos \alpha_{ij} \quad (5)$$

где V_i – напряжение в узле i , V_j – напряжение в узле j , Y_{ij} – проводимость между узлом i и j , α_{ij} – угол линии, $C_{Пот}$ – удельная стоимость электрической энергии. $f2$ вычисляется после расчета электрических режимов.

Параметр $f3$, отвечающий за показатели качества электрической энергии и надёжность, определяется индексом стабильности напряжения (ИСН). ИСН определяется для каждого узла и зависит от перетоков мощности и определяется следующим образом:

$$ISN_j = |V_i|^2 - 4 \cdot (P_j \cdot X_{i-j} - Q_j \cdot R_{i-j}) - 4 \cdot (P_j \cdot R_{i-j} - Q_j \cdot X_{i-j}) \cdot V_i^2 \quad (6)$$

Вводя такие функции ограничения, мы гарантируем, что каждый узел будет обеспечен питанием. А минимизации целевой функции приведет к тому, что потребители сети будут обеспечены питанием надёжно с минимальным количеством связей.



Генетический алгоритм. Для начала определим ввод конфигурации сети. Поэтому введем матрицу длин:

$$|L| = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1i} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_{j1} & l_{j2} & \dots & l_{ji} \end{bmatrix} \quad (7)$$

где количество строк и столбцов матрицы L определяется количеством узлом, и ее элементы показывают связь определенного узла с другим узлом, например l_{12} и l_{21} показывает длину связи между первым и вторым узлом. Элементы L которой определяются исходя из координатов узлов.

$$l_{i,l} = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2} \quad (8)$$

где x_i, x_j – координаты по оси x узлов i и j , y_i, y_j – координаты по оси y узлов i и j . Конфигурация сети, таким образом, будет определяться матрицей межузловых связей J и матрицей длин L .

Реализация ГА удобно проводить в двоичном коде, поэтому конфигурация сети в виде межузловых связей задана 1 и 0. Так как матрица межузловых связей зеркальная, то для скрещивания и мутации используются элементы выше диагональной матрицы, пример заполнения матрицы межузловых связей показан на рис. 1.

$$|J| = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Рисунок 1 – Пример заполнения матрицы межузловых связей

Мощности МТ задается в виде матрицы МТ:

$$|MT| = \begin{bmatrix} MT_1 \\ \dots \\ MT_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Для использования матрицы МТ в ГА ее необходимо перевести в двоичный код. Особи подаются в ГА, как показано на рис. 2.

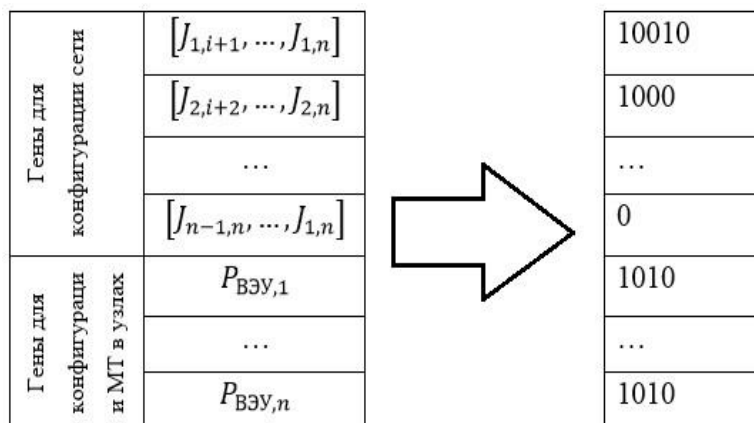


Рисунок 2 – Пример заполнения матрицы особи

Далее рассмотрим процессы скрещивания и мутации. После определения всех исходных данных и определения значения целевой функции необходимо задать изменения исходным вариантам таким образом, чтобы приблизиться к оптимальным капитальным затратам. Для этого ГА осуществляется функции естественного отбора, скрещивания и мутации.

Процесс естественного отбора заключается в том, что в конкурентной борьбе особей выживает наиболее приспособленный. В нашем случае приспособленность особи определяется целевой функцией: чем меньше капитальные затраты на строительство ЭКГ, тем больше вероятность выживаемости. Процессом естественного отбора отсеиваются плохие с точки зрения оптимальности варианты.

Заключение. данной работе предложена методика оптимального проектирования распределённых электрических сетей, основанная на применении генетического алгоритма в сочетании с расчётом установившихся режимов работы сети по критерию надёжности $n-1$. Разработанный подход позволяет учитывать топологические, режимные и экономические особенности распределённых электрических сетей при решении задачи оптимизации. В рамках целевой функции методики осуществляется минимизация суммарных капитальных затрат на элементы сети и потерь активной мощности, а также обеспечивается соблюдение нормативных показателей качества электрической энергии и повышение уровня надёжности электроснабжения. Использование генетического алгоритма обеспечивает эффективный поиск рациональных решений в условиях дискретности параметров и нелинейности ограничений.

Результатом применения предложенной методики является оптимальная конфигурация распределённой электрической сети с рациональным распределением параметров по узлам и линиям, удовлетворяющая требованиям надёжности, качества электроэнергии и технико-экономической эффективности. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования генетических алгоритмов при проектировании и реконструкции распределённых электрических сетей и могут быть использованы в инженерной практике

Список литературы:

1. Atia R., Yamada N. Distributed Renewable Generation and Storage System Sizing Based on Smart Dispatch of Microgrids. *Energies*. 2016, 9, 176 [R. Atia, and N. Yamada, "Distributed Renewable Generation and Storage System Sizing Based on Smart Dispatch of Microgrids". *Energies*. 2016, 9, 176].
2. Guerrero J. M., Vasquez J. C., Matas J., Vicuña L. G., Castilla M. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, 58, 158–172 [J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. Vicuña, M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization". *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, 58, 158–172].
3. Тарасовская Н. Е., Оразалина Г. А., Оразбаева А. А. Методическая классификация генетических задач по алгоритму решения. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Современное общество, образование и наука», 2015, стр.148- 150 [N. E. Tarasovskaya, G. A. Orazlina, A. A. Orazbaeva, "Methodical classification of genetic problems by the decision algorithm," (in Russian). Collection of proceedings on materials of the International Scientific and Practical Conference "Modern Society, Education and Science", 2015, p.148-150].
4. Минегалиева М. М., Набиев И. И. Исследование влияния размерности популяции в генетическом алгоритме на эффективность решения задач оптимизации. Сборник научных статей 4-й Международной молодежной научной конференции в 4 т. «Поколение будущего: взгляд молодых ученых – 2015», 2015, с. 56 – 68 [М. М. Minigaleeva, I. I. Nabiev, "Investigation of the influence of population size in a genetic algorithm on the efficiency of solving optimization problems", (in Russian). Collection of scientific articles of the 4th International Youth Scientific Conference in 4 volumes. "Generation of the Future: A View of Young Scientists – 2015", 2015, pp.56-68].

