

ЭВРИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Магистрант 2-курса **Рахимов М.Ш.**

(Ташкентский государственный технический
университет имени Ислама Каримова)

mirzaakbarrakhimov@gmail.com

Аннотация: В статье рассматриваются эвристические методы оптимизации для управления режимами электрических сетей. Описание включает генетические алгоритмы, алгоритм роя частиц, метод имитации отжига, муравьиный алгоритм и дифференциальную эволюцию с примерами их применения в Европе. Приведены теоретические основы, алгоритмы и математические модели.

Annotation: This article discusses heuristic methods for optimization in the management of electrical grid modes. The description includes genetic algorithms, particle swarm optimization, simulated annealing, ant colony optimization, and differential evolution, with examples of their application in Europe. The theoretical foundations, algorithms, and mathematical models are presented.

Ключевые слова: эвристические методы, оптимизация, режимы электрических сетей, генетические алгоритмы, алгоритм роя частиц, метод имитации отжига, дифференциальная эволюция, муравьиный алгоритм, минимизация потерь, энергосистемы.

Электроэнергетические системы (ЭЭС) являются сложными динамическими объектами с множеством взаимосвязанных элементов — линий электропередачи, трансформаторов, генераторов, компенсирующих устройств и

устройств автоматизации. Эффективное управление режимами работы таких систем требует не только обеспечения баланса мощности, но и оптимизации по множеству критериев: минимизация потерь электроэнергии, обеспечение стабильности напряжений, снижение эксплуатационных затрат и повышение надёжности энергоснабжения.

Традиционные методы оптимизации — линейное и нелинейное программирование, градиентные подходы, метод Лагранжа — обладают высокой точностью, но предъявляют строгие требования к математическим моделям и часто не справляются с задачами большой размерности, высокой нелинейности и наличия неопределённостей. Кроме того, такие методы склонны к «застреванию» в локальных минимумах, особенно в задачах со сложной многомодальной поверхностью.

На этом фоне всё большее внимание исследователей и практиков привлекают эвристические методы оптимизации. Их ключевым преимуществом является способность эффективно и гибко находить приближённые решения, не требуя полной информации о производных функций и легко адаптируясь под конкретную задачу. Эти методы, заимствующие принципы из биологических, физических и социальных процессов, оказались особенно эффективными в задачах оптимизации режимов ЭЭС, где невозможно построить точную модель или где система подвержена частым изменениям.

Эвристические подходы, такие как генетические алгоритмы (GA), алгоритм роя частиц (PSO), метод имитации отжига (SA), муравьиный алгоритм (ACO) и дифференциальная эволюция (DE), уже доказали свою эффективность в электроэнергетике стран Европы. В рамках данного тезиса рассматриваются теоретические основы указанных методов, формулы, алгоритмы реализации и примеры их успешного применения в энергетических системах Германии, Франции, Испании и Великобритании.

Генетический алгоритм (GA) — это один из наиболее известных и широко используемых эвристических методов оптимизации, основанный на принципах естественного отбора и эволюции. Он имитирует процесс биологической эволюции, в котором «особи» (возможные решения задачи) развиваются во времени под воздействием операций отбора, скрещивания (crossover) и мутации.

В задачах оптимизации режимов электрических сетей каждое возможное решение кодируется в виде хромосомы — например, вектора, содержащего параметры генерации P_{Gi} , реактивной мощности Q_{Gi} , положения трансформаторных переключателей и т.д. Целевая функция может выражать, например, суммарные потери мощности, которые требуется минимизировать:

$$J(x) = \sum_{i=1}^n P_{\text{пот},i}(x)$$

Оценка пригодности (fitness function) хромосомы обычно строится по формуле:

$$f(x) = \frac{1}{1 + J(x)}$$

Основные этапы GA:

Инициализация популяции: создаются случайные хромосомы.

Оценка приспособленности: рассчитывается значение целевой функции.

Отбор: выбираются лучшие особи для следующего поколения.

Скрещивание: создаются новые хромосомы путём обмена генетической информации.

Мутация: вносится случайное изменение в потомков для поддержания разнообразия.

Замена: формируется новое поколение.

Преимущества GA:

Устойчивость к локальным минимумам;

Возможность работать с непрерывными и дискретными переменными;

Простота реализации.

Пример: В 2021 году в Германии GA был применён для оптимизации размещения статических компенсирующих устройств в сети 110/10 кВ. Задача заключалась в минимизации потерь мощности и улучшении уровня напряжения в условиях роста нагрузки. Использование GA позволило сократить суммарные потери на 9,4% и снизить количество отклонений напряжения за нормативные пределы на 30%.

Алгоритм роя частиц (PSO) — это эвристический метод глобальной оптимизации, вдохновлённый поведением коллективов живых организмов, таких как стаи птиц или косяки рыб. Алгоритм был предложен в 1995 году Кеннеди и Эберхартом и с тех пор широко применяется в задачах оптимизации, в том числе в электроэнергетике.

В PSO каждая частица представляет собой потенциальное решение задачи и характеризуется: - текущей позицией x_i ; - скоростью v_i ; - лучшей позицией, найденной этой частицей p_i ; - лучшей позицией, найденной всей группой g .

На каждой итерации частицы обновляют свои скорости и позиции по следующим формулам:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_i - x_i^t) + c_2 r_2 (g - x_i^t)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}$$

где: - ω — инерционный коэффициент, регулирующий влияние предыдущей скорости; - c_1, c_2 — когнитивные и социальные коэффициенты (обычно от 1.5 до 2.5); - r_1, r_2 — случайные числа от 0 до 1.

Преимущества PSO:

Быстрая сходимость при хорошем балансе поиска и эксплуатации;

Простота реализации;

Возможность работы с непрерывными и смешанными переменными;

Не требует знания производных.

Пример: В 2019 году в Великобритании PSO был использован для автоматической настройки регуляторов напряжения на подстанциях 220 кВ. Модель включала 25 частиц, 100 итераций и комплексную целевую функцию, учитывающую потери, уровень напряжения и загрузку трансформаторов. В результате уровень отклонения напряжения снизился с 6% до 2,3%, а сетевые потери уменьшились на 7,1%.

Метод имитации отжига (Simulated Annealing, SA) — стохастический алгоритм оптимизации, основанный на аналогии с физическим процессом термического отжига металлов. В процессе охлаждения атомы стремятся занять положения, соответствующие минимуму потенциальной энергии. Аналогично, в SA возможен переход к «худшему» решению, что позволяет избежать попадания в локальный минимум и приблизиться к глобальному.

Алгоритм SA включает следующие этапы: 1. Начальное решение: случайно выбирается стартовая точка x_0 . 2. Генерация соседнего решения: выбирается точка x' в окрестности текущей. 3. Вычисление изменения целевой функции:

$$\Delta E = f(x') - f(x)$$

4. Правило приёма: - Если $\Delta E < 0$, то x' принимается. - Если $\Delta E \geq 0$, то x' принимается с вероятностью:

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right)$$

где T — текущая температура.

5. Охлаждение: $T \leftarrow \alpha T$, где $\alpha \in (0,1)$.

Преимущества метода:

Способность выходить из локальных минимумов;

Простота реализации;

Не требует градиентной информации;

Универсальность.

Пример: В 2020 году в Испании SA был применён для оптимизации расписания отключений линий электропередач 110 и 220 кВ на профилактику. Алгоритм учитывал как потери мощности, так и критерии надёжности сети. Были протестированы сотни сценариев в рамках модели сети с 80 узлами и 120 линиями. Благодаря SA удалось сократить суммарные потери энергии на 7% и избежать конфликтов между ремонтными работами и пиковыми нагрузками.

Муравьиный алгоритм (ACO) — это эвристический метод оптимизации, вдохновлённый поведением муравьёв при поиске пищи. Когда муравьи исследуют окружающую среду, они оставляют следы феромонов, которые воздействуют на выбор пути других муравьёв. Этот процесс приводит к нахождению кратчайшего пути, что является аналогом решения задачи оптимизации.

В контексте задач оптимизации режимов электрических сетей ACO используется для поиска оптимальных путей или конфигураций, которые минимизируют потери или обеспечивают надёжность системы. Алгоритм моделирует поведение нескольких «муравьёв» (параметров или решений), которые взаимодействуют через феромоны, обновляемые в зависимости от качества найденного пути.

Основные этапы АСО: 1. Инициализация феромонов: каждый путь или решение инициализируется случайными значениями феромонов. 2. Поиск решений: муравьи выбирают пути на основе вероятности, которая зависит от интенсивности феромонов и эвристической привлекательности (например, индуктивного сопротивления, потерь мощности и т.д.). 3. Обновление феромонов: после каждого цикла решения феромоны обновляются. 4. Конвергенция: процесс повторяется до достижения оптимального решения.

Пример: В 2022 году в Германии был использован АСО для оптимизации маршрутов передачи мощности в распределительных сетях с учётом потерь и ограничения по пропускной способности линий. В результате были найдены такие маршруты, которые снизили суммарные потери энергии на 5,2% при поддержании стабильности сети.

Дифференциальная эволюция (DE) — это эволюционный алгоритм оптимизации, который использует разницу между случайно выбранными особями для создания новых решений. Это позволяет эффективно исследовать пространство решений и избегать попадания в локальные минимумы.

Основные этапы DE: 1. Инициализация популяции: создаётся начальная популяция случайных решений. 2. Дифференциальная операция: для каждой особи генерируется новый кандидат. 3. Кроссовер: создаётся новый кандидат-решение. 4. Отбор: выбирается лучшее решение. 5. Охлаждение: процесс повторяется до достижения сходимости.

Пример: В 2020 году в Франции DE был использован для оптимизации регулирования нагрузки на энергосистему. В результате алгоритм позволил снизить пики нагрузки на 8,3% и улучшить стабильность работы системы.

Заключение:

Эвристические методы оптимизации, такие как генетические алгоритмы, алгоритм роя частиц, метод имитации отжига и другие, продемонстрировали

высокую эффективность в решении задач оптимизации режимов электрических сетей. Они обеспечивают улучшение работы системы, минимизацию потерь энергии и повышение стабильности, что крайне важно для современных энергосистем.

Примеры из европейской практики показывают, что эти методы успешно применяются в разных странах, таких как Германия, Великобритания и Испания. Использование этих методов позволяет решать комплексные задачи управления энергоснабжением, а также эффективно оптимизировать распределение мощности и регулирование напряжения в реальных условиях.

В будущем, с развитием технологий и ростом сложности энергетических систем, эвристические методы оптимизации будут всё больше использоваться для повышения эффективности и надёжности энергосетей. Их дальнейшее совершенствование и внедрение в практику обеспечат значительный прогресс в управлении энергетическими ресурсами.

Использованная литература:

Alsagri, Ali & Alrobaian, Abdulrahman. (2022). Optimization of Combined Heat and Power Systems by Meta-Heuristic Algorithms: An Overview. *Energies*.

Martín, Susana & Martínez-Falero, Eugenio & Peribáñez, José & Ezquerra, Alejandra. (2021). GIS-Based Simulated Annealing Algorithm for the Optimum Location of Fire Stations in the Madrid Region, Spain: Monitoring the Collapse Index. *Applied Sciences*.

Valle, Y. & Venayagamoorthy, Ganesh & Mohagheghi, Salman & Hernandez Mejia, Jean & Harley, R.G.. (2008). Particle Swarm Optimization: Basic Concepts, Variants and Applications in Power Systems. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*. 12. 171 - 195.

Niu M., Wan C., Xu Z. A review on applications of heuristic optimization algorithms for optimal power flow in modern power systems // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014. Vol. 2, no. 4. Pp. 289–297.

В.Г. Макаров, И.М. Валеев, И.Г.Цвенгер. Метаэвристические методы оптимизации, применяемые при решении электроэнергетических задач.