

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 621.316

ОБЗОР МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РЕШЕНИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Р.А. Алехин¹, Ю.П. Кубарьков¹, Д.В. Закамов¹, Д.В. Умяров²

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

***Аннотация.** Быстрый рост электроэнергетических систем по всему миру в XX веке и несовершенство вычислительной техники того времени привели к появлению целого ряда проблем, связанных с управлением и распределением электроэнергии. Наиболее важными задачами, решаемыми при проектировании новых и модернизации уже существующих систем, являются задачи управления потоками мощности, планирования нагрузок и реактивной мощности, выбора конфигурации сети и другие. Все они относятся к ряду оптимизационных задач, которые на протяжении многих лет решались с помощью традиционных численных методов: ньютоновских, метода внутренней точки, ветвей и границ, нелинейного и квадратичного программирования и других. Поскольку энергосистемы являются нелинейными системами с большим количеством разнообразных устройств и особенностей их работы, то для решения указанных проблем исследователи использовали различные способы упрощения математических моделей. К тому же использование численных методов вызвало трудности при вычислении производных первого и второго порядка, что приводило к нахождению неоптимальных решений. Появление на свет эвристических, а затем и метаэвристических оптимизационных методов позволило существенно упростить подготовку математических моделей и сократить время выполнения расчетов, а универсальность новых алгоритмов обеспечила их применимость для широкого спектра задач. В статье рассмотрена общая последовательность выполнения оптимизационных задач с помощью метаэвристических методов, представлено описание наиболее важных проблем, с которыми сталкивается современная электроэнергетика, перечислены популярные метаэвристические оптимизационные алгоритмы, описаны их сильные и слабые стороны, а также перечислены основные области их применения.*

Алехин Роман Александрович, аспирант.

Кубарьков Юрий Петрович (д.т.н.), профессор кафедры «Электрические станции».

Закамов Дмитрий Васильевич (к.т.н.), доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».

Умяров Дамир Вафиевич, ст. преподаватель кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика».

Ключевые слова: *оптимизация, энергосистема, генетический алгоритм, оптимизация роением частиц, метод кукушкиного поиска.*

Введение

Электроэнергетические системы являются одними из наиболее крупных и сложных комплексов, построенных человеком. Для поддержания надежной и безаварийной работы таких систем необходимо всестороннее изучение взаимосвязанных с ними процессов. Регулярный ввод в работу и вывод из эксплуатации старого оборудования, преобразование конфигурации системы, изменение потребления электроэнергии в зависимости от сезона и времени суток привели к разделению процесса управления энергосистемами на множество узконаправленных задач. К ним можно отнести задачи нахождения оптимальных перетоков активной и реактивной мощностей, а также уровней напряжения, задачи нахождения оптимальной конфигурации существующих и проектируемых электрических сетей, строительства устройств распределенной генерации и другие.

На сегодня многие задачи, стоящие перед электроэнергетическими компаниями и исследователями, относятся к задачам оптимизации. К таким задачам относится нахождение наилучшего варианта решения. Как правило, оптимизация проводится для получения наиболее приемлемого значения одного или нескольких параметров системы. Такие параметры включаются в целевую функцию, а критерием корректности найденного решения служит функция пригодности – фитнес-функция.

Решение оптимизационных задач выполняется, как правило, с помощью специализированных программ, использующих различные вычислительные алгоритмы. Традиционно в таких программах используются разработанные еще в XX веке математические методы, которые обладают высокой точностью решения поставленных задач. К ним можно отнести ньютоновские методы, метод внутренней точки, метод ветвей и границ, нелинейное и квадратичное программирование и другие [1]. Такие алгоритмы позволяют математически точно описывать поставленную задачу, находить верное решение, однако имеют и ряд недостатков:

- большие временные затраты на выполнение операций;
- недостаточный уровень знаний в исследуемой области у специалистов, выполняющих оптимизационную задачу;
- трудности в интерпретации полученных данных;
- сложность выполнения вычислений производных первого и второго порядка.

Указанные недостатки классических методов становятся весьма заметными при решении задач для систем большой размерности, коими являются модели современных энергосистем [2].

С целью решения проблем, возникающих при использовании указанных выше математических методов, в середине XX века были разработаны эвристические методы оптимизации.

Эвристические методы предполагают, что решение поставленной оптимизационной задачи будет найдено не вполне верно, но с приемлемой степенью точности. Такие методы позволяли решить главную проблему своего времени: снижение временных затрат и увеличение вычислительных мощностей техники. Поиск оптимального решения запускался лишь один раз, и при нахождении решения алгоритм прекращал свою работу. Существенным недостатком оказалось то, что большое количество эвристических методов создавалось под решение не-

большого ряда задач, как правило, из одной области знаний. В результате применение какого-либо метода в другой отрасли становилось очень затруднительным [2].

Существенный вклад в развитие оптимизации как раздела математики внесли созданные во второй половине XX века метаэвристические методы оптимизации, которые, судя по названию, находятся над эвристическими методами. Такие методы имеют следующие общие черты:

- направляют процесс поиска оптимума в необходимом направлении;
- не требуют глубоких знаний в исследуемой области;
- применимы для широкого круга оптимизационных задач;
- осуществляют эффективный поиск решения во всем пространстве поиска;
- используют все разнообразие алгоритмов работы: от простых процедур локального поиска до сложных процессов самообучения;
- являются недетерминированными алгоритмами;
- включают в себя алгоритмы, которые позволяют им выбираться из локальных оптимумов;
- большинство из них используют опыт поиска (память) для эффективного выполнения дальнейшего поиска [3].

В статье представлены наиболее популярные метаэвристические методы оптимизации, а также описаны задачи в области электроэнергетики, в которых они применяются.

Задачи оптимизации

Бурный рост и развитие энергосистем по всему миру сформировали перед исследователями и электросетевыми компаниями множество задач, которые успешно решаются с помощью различных оптимизационных методов. К наиболее значительным относятся:

1. Реконфигурация сети. Подобная задача очень часто разбирается в распределительных сетях, там, где необходимо повышение эффективности работы энергосистемы. При этом топология сети изменяется с помощью изменения состояния коммутационных аппаратов или с помощью ввода в работу или вывода из эксплуатации подстанций или линий электропередачи [4]. Реконфигурация относится к разделу комбинаторных задач. В связи с крупными размерами распределительных сетей и, как следствие, большим набором возможных вариантов выбор оптимального решения становится непростой задачей.

2. Планирование нагрузки. Информация об объемах потребляемой в будущем мощности необходима для определения требуемой генерации мощности на электростанциях. Задачи планирования нагрузки могут рассматриваться как в краткосрочной перспективе, так и в долгосрочной. От качественной проработки объемов и локации потребления мощности зависит и оптимальность (экономичность) распределения генерации не только между станциями, но отдельными генераторами. Задача может решаться как для небольших, так и для крупных объединенных энергосистем. Для рассмотрения может быть выбрана активная, реактивная, а также полная мощность [2, 5].

3. Настройка параметров стабилизаторов энергосистемы. Стабилизаторы используются как вспомогательные элементы управления на электрических станциях для систем автоматического регулирования напряжения или систем управления турбинами энергоблоков. Использование стабилизаторов является одним из наиболее экономически эффективных способов повышения устойчивости

энергосистемы [6]. При устойчивой работе энергосистемы стабилизаторы остаются неактивными, в то время как при возникновении значительных колебаний они обеспечивают дополнительное демпфирование и помогают автоматическим регуляторам возбуждения снизить качания ротора и отклонения напряжения в системе. Настройка параметров стабилизаторов является достаточно сложной задачей в виду нелинейности параметров энергосистем. Постоянные изменения в режимах работы систем свидетельствуют о неоптимальности задания статических уставок для стабилизаторов, с чем помогают справиться оптимизационные методы [7, 8, 9, 10].

4. Планирование распределения реактивной мощности. Оптимизация распределения реактивной мощности в энергосистеме является одной из наиболее актуальных задач в современной энергетике. Баланс реактивной мощности неразрывно связан с профилем напряжения во всей энергосистеме. При избытке мощности уровни напряжений в узлах энергосистемы, наиболее близких к небалансу, начинают возрастать, при дефиците – снижаться. К тому же реактивная мощность негативно сказывается на пропускной способности линий электропередачи и трансформаторов. При планировании распределения реактивной мощности основной задачей является снижение перетоков реактивной мощности по распределительной сети и сокращение ее небалансов в необходимых местах с помощью различных компенсирующих устройств [11].

5. Задача оптимального перетока мощности. Это комплексная задача, целью которой является оптимальная настройка параметров всей энергосистемы для повышения надежности ее работы и соблюдения режимных ограничений. Основными критериями эффективности являются снижение потерь активной мощности в энергосистеме, экономичность производства электроэнергии, а также повышение пропускной способности линий электропередачи [12].

6. Распределенная генерация. Современные электроэнергетические системы претерпевают масштабные изменения. Развитие рыночных отношений подталкивает крупных энергопотребителей к созданию собственных генерирующих установок. Существенным фактором в развитии концепции распределенной генерации является значительное удешевление, а также увеличение эффективности технологий, использующих возобновляемые источники энергии (ветряные, солнечные электрические станции и другие). В результате в распределительных сетях образуются небольшие энергорайоны, полностью компенсирующие потребление электроэнергии своей же генерацией, а в некоторых случаях и выдающие избыток мощности в общую сеть. Таким образом, распределительные энергосистемы из пассивного элемента, в котором управление генерацией возможно только в крупных энергоузлах, превращаются в активного участника, способного влиять на общий баланс мощности. Использование активных энергокомплексов помогает разгрузить наиболее загруженные участки сети, более эффективно распределить высвободившиеся объемы мощности, а также увеличивает устойчивость энергосистемы. Задача проектировщиков и исследователей – добиться оптимального расположения в энергосистеме генерирующего оборудования, при котором будут соблюдены перечисленные условия. Как правило, проблема распределенной генерации представляет многоцелевую задачу, так как нередко рассматривается возможность удовлетворения потребителей не только электрической, но и тепловой энергией [13, 14].

Постоянное развитие технологий влияет и на сферу электроэнергетики, принося в эту область все новые и новые тенденции. Идеи сокращения использова-

ния в качестве энергоносителя углеводородного сырья и сокращения вредных выбросов послужили поводом для исследования данной проблемы как в отдельности, так и в сочетании с другими проблемами [15]. За последние 50 лет было создано несколько поколений FACTS-устройств, которые также внесли значительный вклад в развитие энергосистем и не могли быть не замечены при решении различных оптимизационных задач [16, 17].

Метаэвристические методы оптимизации

Метаэвристические оптимизационные методы, основываясь на эвристических методах, имеют также и свои отличительные черты. Одной из них является итерационность, благодаря которой обеспечивается многократное выполнение расчетов, формируется набор возможных вариантов с различными параметрами, а также выбирается наилучшее решение из большой выборки.

В наше время разработано большое количество разнообразных метаэвристических методов. Несмотря на математическую базу, при разработке того или иного метода ученые основываются на различных явлениях, происходящих в мире и приводящих систему к наилучшему состоянию. Так, помимо математических существуют методы, основанные на процессах, происходящих в живой природе, физических явлениях, социальном поведении и многих других.

Большинство методов, значительно отличаясь друг от друга выполняемыми операциями, имеют общие алгоритмические черты:

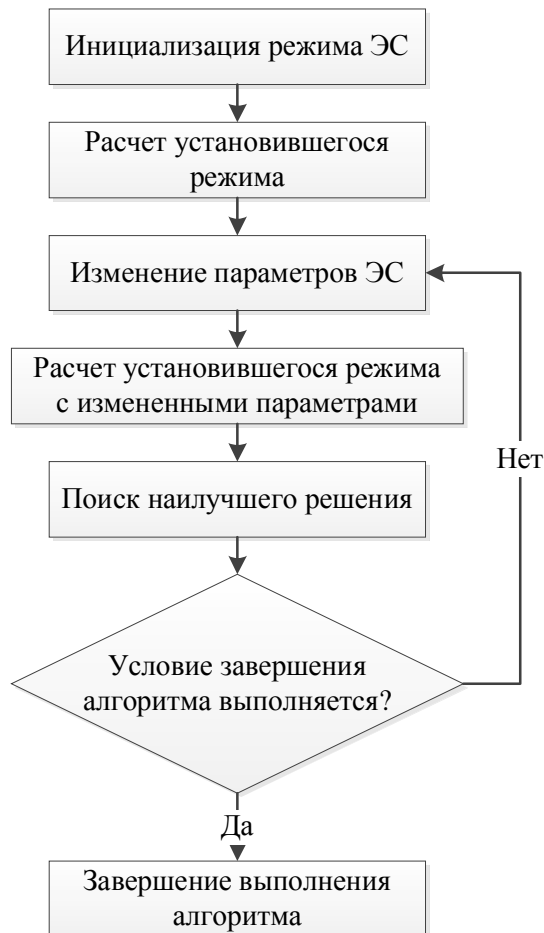
- 1) инициализация начальных данных энергосистемы и параметров метода;
- 2) расчет установившегося режима;
- 3) изменение параметров энергосистемы с помощью специфических для каждого оптимизационного метода операций;
- 4) расчет установившегося режима с измененными параметрами;
- 5) поиск наилучшего решения;
- 6) проверка выполнения условия завершения работы алгоритма;
- 7) переход на шаг 3 или завершение выполнения оптимизации.

Качество проработки задачи любого оптимизационного алгоритма очень сильно зависит от определения условия завершения работы алгоритма. Сценарий работы метода может предполагать как выполнение заданного количества итераций, так и достижение определенного значения целевых или фитнес-функций. Во втором случае количество итераций может существенно увеличиться, а время выполнения вычислений – возрасти в разы. При задании недостижимых значений произойдет закливание алгоритма и оптимальное решение не будет найдено (см. рисунок).

Перечислим методы оптимизации, представляющие интерес для современных задач планирования и эксплуатации режимов работы электрических систем (однако они не ограничиваются этим перечнем):

- экспертная система;
- искусственная нейронная сеть;
- нечеткая логика;
- генетический алгоритм;
- эволюционный алгоритм;
- имитация отжига;
- поиск табу;
- оптимизация колонии муравьев;
- оптимизация роя частиц;

- многокритериальная оптимизация;
- параллельные вычисления;
- линейное и нелинейное программирование;
- целочисленное и смешанно-целочисленное программирование;
- динамическое программирование;
- внутренние точечные методы;
- методы, основанные на разложении Лагранжа;
- общие стохастические методы.



Последовательность работы метаэвристических оптимизационных методов

Генетический алгоритм

Генетический алгоритм – оптимизационный метод, вдохновленный концепциями эволюции и естественного отбора. Включает в себя три наиболее важных операции: селекцию, скрещивание и мутацию. В ходе работы генетического алгоритма формируется набор режимов (генов) со своими наборами переменных, называемый поколением, над которым и будут производиться дальнейшие действия. Селекция подразумевает процесс выбора пар генов из текущего поколения. При скрещивании происходит формирование новых генов с новыми наборами переменных. Для постоянного обновления поколений и предотвращения разрастания количества генов на каждом итерационном шаге выполняется отбор

заданного количества наилучших решений. Задачей мутации является случайное изменение произвольного количества переменных в каждом гене. Внесение непредвиденных изменений позволяет алгоритму разнообразить наборы решений в каждом поколении и избегать возможного попадания в точки локального оптимума [18].

Генетический алгоритм является наиболее популярным оптимизационным методом. Разработанный во второй половине XX века, этот метод имеет достаточно большую изученность и, как следствие, широкий круг применения.

К недостаткам алгоритма относится наличие большого количества настраиваемых параметров, а также низкая скорость выполнения операций [19].

Оптимизация роя частиц

Метод оптимизации роя частиц развивается из концепции роевого взаимодействия насекомых при решении различного рода проблем. Каждая частица в рое представляет собой набор переменных энергосистемы, используемых при решении оптимизационных задач. Двигаясь по всему пространству решений, частицы при своем перемещении обмениваются друг с другом полученным опытом. Каждый индивид в рое изменяет местоположение, учитывая свое наилучшее положение и наилучшее положение всех частиц в рое [20].

Представленный метод обладает целым рядом преимуществ:

- простота для понимания метода;
- малое количество параметров и формул;
- простота применения;
- слабая зависимость от начальных параметров.

К недостаткам метода относятся:

- низкий уровень сходимости;
- частое попадание в точки локального оптимума;
- сильная зависимость сходимости от значений параметров алгоритма.

Доступность для понимания и применения метода оптимизации роем частиц способствовала его применению для исследования большинства оптимизационных задач, однако наибольшее применение он получил в расчетах оптимальных перетоков мощности, планирования реактивной мощности, настройке параметров регуляторов энергосистем, а также в задаче распределенной генерации.

Имитация отжига

Имитация отжига – метод, основанный на принципе кристаллизации металлов. При нагреве металлов до жидкого состояния все молекулы внутри него не имеют четкой структуры, а внутренняя энергия вещества максимальна. При медленном процессе остывания металла происходит постепенная структуризация частиц в кристаллическую решетку, при которой энергия вещества снижается. Однако в металле все еще остаются молекулы, способные перемещаться внутри пространства и находить новые позиции. При контролируемом процессе остывания возможен кратковременный нагрев вещества. Целью указанных действий является получение металла с наименьшей энергией. Каждая частица – режим энергосистемы с определенным набором переменных. Повышение температуры системы является способом вывода решения из локального оптимума.

Имитация отжига имеет достаточно простую реализацию, а также хорошие оптимизационные характеристики для большинства задач, но обладает низким

качеством поиска глобального оптимума, а время работы занимает длительное время.

Метод нашел широкое применение для решения проблем реконфигурации сети, планирования графиков обслуживания, планирования строительства генерирующего оборудования [5], а также планирования реактивной мощности в энергосистеме [21].

Поиск с запретами (табу-поиск)

Табу-поиск (ТП) – оптимизационный метод, основанный на механизме спуска, который движется к оптимальному решению. Алгоритм имеет список запретов, который содержит в себе некоторое количество решений, найденных на предыдущих итерациях. За счет этого алгоритм не зацикливается на нахождении повторяющихся решений. Для выхода из локального оптимума предусмотрен механизм ухудшения результатов расчетов.

Метод позволяет сократить время на обработку первоначальных данных и обладает приемлемым временем выполнения алгоритма, но имеет большое количество настраиваемых параметров и низкий коэффициент точности.

Преимущества метода оптимизации ТП можно суммировать следующим образом:

- ТП характеризуется способностью избегать попадания в ловушку в локальном оптимальном решении и сохранить решение, если оно будет найдено, с помощью гибкой памяти в истории поиска;

- ТП использует вероятностные правила перехода для принятия решений, а не детерминированные. Следовательно, ТП – это своего рода алгоритм стохастической оптимизации, который может искать сложную и неопределенную область для поиска глобального оптимума. Это делает ТП более гибким и надежным, чем обычные методы;

- ТП использует адаптивные процессы памяти для направления поиска в пространстве поиска проблем. Поэтому он может легко иметь дело с негладкими, непрерывными и недифференцируемыми целевыми функциями.

Поиск с запретами применяется при решении задач реконфигурации распределительной сети [22], оптимального размещения компенсирующих устройств и планирования реактивной мощности [23].

Поиск колонии муравьев

Алгоритм поиска колонии муравьев основан на поведении муравьев при поиске кратчайших путей до пищи. Если муравей в процессе поиска находит еду, то, возвращаясь в муравейник, оставляет на обратном пути следы своего феромона. В результате удачного поиска еды несколькими муравьями будут сформированы тропы, концентрация феромонов на которых больше, чем в остальном пространстве поиска. С большой долей вероятности остальные муравьи пойдут именно по такой тропе. В результате будет сформирован кратчайший, оптимальный путь до источника пищи. В контексте данного решения места с наибольшей концентрацией феромонов являются наборами переменных с наилучшими решениями задачи.

Алгоритм поиска колонии муравьев хорошо зарекомендовал себя в решении проблемы выбора оптимальной конфигурации распределительных сетей.

Метод хорошо подходит для решения задач на основе графов, характеризуется масштабируемостью и гибкостью при использовании в динамических си-

стемах. Однако имеет сложный код и большое количество настраиваемых параметров [24].

Алгоритм гравитационного поиска

Алгоритм гравитационного поиска создан на основе концепции всемирного тяготения. Согласно этой концепции тела с наибольшей массой имеют наибольшую силу притяжения других тел в пространстве. Со временем все частицы в пространстве притягиваются к самым крупным центрам масс. Относительно оптимизационного алгоритма частицы – это режимы с наборами переменных. В процессе выполнения задачи наиболее удачные решения притягивают к себе ближайшие, тем самым увеличивая свой вес среди всех возможных вариантов.

Данный метод применяется для нахождения решений в задачах оптимального перетока мощности, планирования реактивной мощности и настройки стабилизаторов энергосистем.

Алгоритм гравитационного поиска прост и легко применим к различным задачам, имеет высокую степень случайности генерации переменных, чем обеспечивает охват всего пространства поиска. Слабые качества алгоритма: плохая способность локального поиска решения и необходимость в тонкой настройке начальных параметров алгоритма [1].

Кукушкин поиск

Метод основан на паразитической особенности кукушек в откладывании своих яиц в гнезда других птиц. Хозяин гнезда может увидеть чужие яйца и вытолкнуть их или покинуть насест. Но если птица не заметит подмены, то птенцы кукушки выбираются из яиц раньше других, выталкивают из гнезда остальные яйца и выигрывают в борьбе за выживание и пропитание. Каждый режим с набором переменных является яйцом описываемого вида птиц. Выбор значений переменных происходит с помощью специализированного метода блуждания в пространстве поиска, называемого полетами Леви. Данный вид передвижения характерен для некоторых видов животных, например акул, дрозophil и других. Благодаря такому передвижению обеспечивается наиболее эффективное исследование пространства поиска. Обнаружение чужих яиц хозяином гнезда происходит с определенной долей вероятности, колеблющейся от 0 до 1.

Метод показал свою эффективность при решении широкого спектра оптимизационных задач: планирования реактивной мощности, нахождения оптимального перетока мощности, применения распределенной генерации.

Метод кукушкиного поиска достаточно прост в понимании, имеет несложную математическую выкладку, применим для решения многоцелевых задач. К недостаткам алгоритма относятся медленная сходимость, слабая изученность и, как следствие, небольшое количество примеров в литературе [19].

Метод поиска летучей мыши

В качестве основной идеи при создании метода поиска летучей мыши было принято использование этим видом млекопитающих эхолокации для перемещения в пространстве и поиска пищи. Во время движения в зависимости от ситуации мыши способны изменять частоту и громкость ультразвука. При обнаружении оптимального решения параметры частоты и громкости увеличиваются, в противном случае – снижаются, тем самым обеспечивается эффективность изучения пространства решений.

Метод показал хорошие результаты при решении задач, связанных с оптимизацией перетоков активной и реактивной мощности, уровней напряжений, применением FACTS-устройств и распределенной генерации.

К преимуществам данного метода относятся слабая зависимость от начальных данных, автоматическая настройка параметров алгоритма в ходе выполнения задачи оптимизации, низкое время выполнения операций. Слабая изученность метода является его наибольшим недостатком [25].

Комбинированные алгоритмы (генетический и имитационный отжиг)

Генетические алгоритмы (ГА) являются адаптивными методами, которые могут быть использованы для решения задач поиска и оптимизации [18]. Они основаны на генетическом процессе биологических организмов. На протяжении многих поколений естественные популяции эволюционировали в соответствии с принципами естественного отбора, то есть выживания наиболее приспособленных. Подражая этому процессу, генетические алгоритмы способны разрабатывать решения реальных проблем, если они были соответствующим образом закодированы. Процедуры ГА могут быть обобщены как представление хромосом (схема кодирования) решения, при этом функция оценки решений определяется с точки зрения их пригодности для генетических операторов (размножение, пересечение и мутация), которые изменяют генетический состав потомства для следующего поколения и правила прекращения изменений [21]. Генетический алгоритм – очень мощный инструмент для поиска больших областей пространства решений в глобальном масштабе.

Имитационный отжиг – это стохастический подход к решению задач комбинаторной оптимизации, в котором основная идея исходит из процесса отжига твердых тел. Имитация отжига очень эффективна для исчерпывающего поиска локальных областей пространства решений посредством стохастического настроя на максимум.

При комбинировании глобального оператора кроссовера генетического алгоритма и локального стремления к максимуму моделируемого отжига создается гибридный алгоритм оптимизации, названный алгоритмом генетического моделирования отжига.

Алгоритм начинается с инициализации параметров. Начальная популяция состоит из случайно сгенерированных хромосом. Каждая хромосома состоит из случайно выбранного объекта из набора альтернативных объектов для каждого местоположения, и ген обозначает объект, который должен быть расположен в одном месте без репликации.

Если во время кроссовера образуются неосуществимые хромосомы, они становятся выполнимыми, пропуская повторяющиеся блоки и вставляя отсутствующие. Затем наилучшее решение подается в модуль ИО для уточнения решения. Это улучшенное решение подается в ГА для следующей итерации, пока не будет выполнено условие завершения.

Заключение

Создание метаэвристических методов позволило совершить большой шаг вперед в решении оптимизационных задач не только в электроэнергетике, но и в других сферах деятельности человека.

Метаэвристики предоставили исследователям и работникам электросетевых компаний универсальные методы для решения неограниченного числа задач.

Представленные в статье методы просты, не требуют преобразований модели энергосистемы под определенный метод, выполняют поиск наилучшего варианта среди большого множества возможных решений и при этом имеют достаточную степень точности.

Несмотря на то, что многие классические метаэвристические методы были созданы в последние 20–25 лет, происходит постоянное их развитие. Совершенствуются отдельные компоненты методов, выполняется комбинирование алгоритмов между собой, чем достигается улучшение оптимизационных качеств, а также создаются новые непохожие на другие алгоритмы [26].

Дальнейшее развитие техники, в том числе и электроэнергетического комплекса, будет ставить перед учеными новые вызовы, которые также будут решаться с помощью различных метаэвристических методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shaheen A.M., Spea S.R., Farrag S.M., Abido M.A.* A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. Vol. 9, no. 2. Pp. 215–231.
2. *Gavrilas M.* Heuristic and Metaheuristic Optimization Techniques with Application to Power Systems // 12th WSEAS International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering (MMACTEE '10), Timisoara, Romania, 2010. P. 95–103.
3. *Blum C., Roli I.* Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison // *ACM Computing Surveys*, 2003. Vol. 35, no. 3. Pp. 268–308.
4. *Metia A., Ghosh S.* A Literature Survey on Different Loss Minimization Techniques used in Distribution Network // *International Journal Of Scientific Research And Education*, 2015. Vol. 3, no. 6. Pp. 3861–3877.
5. *Meng K., Dong Z.Y., Qiao Y.* Swarm Intelligence in Power System Planning // *International Journal of Clean Coal and Energy*, 2013. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–7.
6. *Abdollahi M., Ghasrdashti S., Saeidinezhad H., Hosseinzadeh F.* Multi Machine PSS Design by using Meta Heuristic Optimization Techniques // *Journal of Novel Applied Sciences*, 2013. Vol. 2, no. 9. Pp. 410–416.
7. *Abido M.A.* An efficient heuristic optimization technique for robust power system stabilizer design // *Electric Power Systems Research*, 2001. Vol. 58, no. 1. Pp. 53–62.
8. *Rekha, Kumar A., Singh A.K.* Optimization Of Controller Parameters for non-Linear Power Systems Using Different Optimization Techniques // *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013. Vol. 2, no. 6. Pp. 228–233.
9. *Shrivastava A., Dubey M., Kumar Y.* Optimization Techniques Based Power System Stabilizer's: An Overview // *International Journal on Emerging Technologies*, 2013. Vol. 4, no. 1. Pp. 50–54.
10. *Monika G., Singh B., Khanna R.* Power System Stability and Optimization Techniques: An Overview // *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014. Vol. 1, no. 1. Pp. 50–54.
11. *Mahdad B.* Optimal reconfiguration and reactive power planning based fractal search algorithm: A case study of the Algerian distribution electrical system // *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019. Vol. 22, no. 1. Pp. 78–101.
12. *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.
13. *Shi R., Cui C., Su K., Zain Z.* Comparison Study of Two Meta-heuristic Algorithms with Their Applications to Distributed Generation Planning // *Energy Procedia*, 2011. Vol. 12, no. 1. Pp. 245–252.
14. *Hosseini M., Baghipour R.* Optimal Placement of DGs in Distribution System including Different Load Models for Loss Reduction using Genetic Algorithm // *Journal of Advances in Computer Research*, 2013. Vol. 4, no. 3. Pp. 55–68.

15. *Jin J., Zhou P., Li C., Guo X., Zhang M.* Low-carbon power dispatch with wind power based on carbon trading mechanism // *Energy*, 2019. Vol. 170, no. 1. Pp. 250–260.
16. *Dixit S., Srivastava L., Singh A., Agnihotri G.* Optimal Placement of TCSC For Enhancement of Power System Stability Using Heuristic Methods: An Overview // *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015. Vol. 8, no. 7. Pp. 367–374.
17. *Singh B., Payasi R.P., Shukla V.* A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems // *Energy Reports*, 2017. Vol. 3, no. 1. Pp. 94–108.
18. *Sedighzadeh M., Rezazadeh A.* Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile // *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008. Vol. 37, no. 1. Pp. 251–256.
19. *Stanelyte D., Gudzius S., Andriusiene L.* Energy Distribution Planning Models Taxonomy and Methods of Distributed Generation Systems // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 107, no. 1. Pp. 275–283.
20. *Reddy S.C., Prasad P.V.N., Laxmi A.J.* Optimal Number and Location of DGs to Improve Power Quality of Distribution System Using Particle Swarm Optimization // *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012. Vol. 2, no. 3. Pp. 3077–3082.
21. *Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H.* A Comprehensive Review of Optimization Techniques Applied for Placement and Sizing of Custom Power Devices in Distribution Networks // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2012. Vol. 88, no. 11. Pp. 261–265.
22. *Charlangsut A., Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S.* Heuristic Optimization Techniques for Network Reconfiguration in Distribution System // *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012. Vol. 6, no. 4. Pp. 365–368.
23. *Bansal R.C.* Optimization Methods for Electric Power Systems: An Overview // *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2005. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–23.
24. *Beheshti Z., Mariyam S., Shamsuddin H.* A Review of Population-based Meta-Heuristic Algorithm // *International Journal of Advances in Soft Computing and its Application*, 2013. Vol. 5, no. 1. Pp. 1–35.
25. *Ibrahim A.M., Swief R.A.* Comparison of modern heuristic algorithms for loss reduction in power distribution network equipped with renewable energy resources // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. Vol. 9, no. 4. Pp. 3347–3358.
26. *Šipoš M., Klaić Z., Fekete K., Stojkov M.* Review of Non-Traditional Optimization Methods for Allocation of Distributed Generation and Energy Storage in Distribution System // *Technical Gazette*, 2018. Vol. 25, no. 1. Pp. 294–301.

Статья поступила в редакцию 20 июня 2019 года

OVERVIEW OF METAHEURISTIC OPTIMIZATION TECHNIQUES APPLIED TO SOLVING POWER ENGINEERING PROBLEMS

R.A. Alehin¹, Y.P. Kubarkov¹, D.V. Zakamov¹, D.V. Umyarov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
24, Minina st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

Abstract. *The rapid growth of electric power systems around the world in the XX century, and the imperfection of computer technology at that time led the emergence of a number of problems associated with the management and distribution of electricity. The most important tasks solved in the design of new and modernization of existing systems are the problems of managing power flows, planning loads and reactive power, choosing the network configuration and others. All of them belong to a number of optimization problems, which for many years have been solved using traditional numerical methods: Newtonian methods, interior point, branch and bound method, nonlinear and quadratic programming, and others. In addition, the use of numerical methods led to difficulties in calculation of first and second order, which led to finding suboptimal solutions. The birth of heuristic and then metaheuristic optimization methods made it possible to simplify the preparation of mathematical models, and reduce the time of performing calculations, and the universality of new algorithms ensured their applicability for a wide range of tasks. The article describes the general sequence of performing optimization tasks using metaheuristic methods, describes the most important problems faced by modern electric power industry, lists popular metaheuristic optimization algorithms, describes their strengths and weaknesses, and lists the main areas of their application.*

Keywords: *optimization, power system, genetic algorithm, particle swarm optimization, cuckoo search algorithm.*

REFERENCES

1. *Shaheen A.M., Spea S.R., Farrag S.M., Abido M.A.* A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. Vol. 9, no. 2. Pp. 215–231.
2. *Gavrilas M.* Heuristic and Metaheuristic Optimization Techniques with Application to Power Systems // *12th WSEAS International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering (MMACTEE '10)*, Timisoara, Romania, 2010. P. 95–103.
3. *Blum C., Roli I.* Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison // *ACM Computing Surveys*, 2003. Vol. 35, no. 3. Pp. 268–308.
4. *Metia A., Ghosh S.* A Literature Survey on Different Loss Minimization Techniques used in Distribution Network // *International Journal Of Scientific Research And Education*, 2015. Vol. 3, no. 6. Pp. 3861–3877.
5. *Meng K., Dong Z.Y., Qiao Y.* Swarm Intelligence in Power System Planning // *International Journal of Clean Coal and Energy*, 2013. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–7.
6. *Abdollahi M., Ghasradshti S., Saeidinezhad H., Hosseinzadeh F.* Multi Machine PSS Design by using Meta Heuristic Optimization Techniques // *Journal of Novel Applied Sciences*, 2013. Vol. 2, no. 9. Pp. 410–416.
7. *Abido M.A.* An efficient heuristic optimization technique for robust power system stabilizer design // *Electric Power Systems Research*, 2001. Vol. 58, no. 1. Pp. 53–62.

*Roman A. Alekhin, Postgraduate student.
Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Dmitry V. Zakamov (Ph.D.), Associate Professor.
Damir V. Umyarov, Senior lecturer.*

8. *Rekha, Kumar A., Singh A.K.* Optimization Of Controller Parameters for non-Linear Power Systems Using Different Optimization Techniques // *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013. Vol. 2, no. 6. Pp. 228–233.
9. *Shrivastava A., Dubey M., Kumar Y.* Optimization Techniques Based Power System Stabilizer's: An Overview // *International Journal on Emerging Technologies*, 2013. Vol. 4, no. 1. Pp. 50–54.
10. *Monika G., Singh B., Khanna R.* Power System Stability and Optimization Techniques: An Overview // *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014. Vol. 1, no. 1. Pp. 50–54.
11. *Mahdad B.* Optimal reconfiguration and reactive power planning based fractal search algorithm: A case study of the Algerian distribution electrical system // *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019. Vol. 22, no. 1. Pp. 78–101.
12. *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.
13. *Shi R., Cui C., Su K., Zain Z.* Comparison Study of Two Meta-heuristic Algorithms with Their Applications to Distributed Generation Planning // *Energy Procedia*, 2011. Vol. 12, no. 1. Pp. 245–252.
14. *Hosseini M., Baghipour R.* Optimal Placement of DGs in Distribution System including Different Load Models for Loss Reduction using Genetic Algorithm // *Journal of Advances in Computer Research*, 2013. Vol. 4, no. 3. Pp. 55–68.
15. *Jin J., Zhou P., Li C., Guo X., Zhang M.* Low-carbon power dispatch with wind power based on carbon trading mechanism // *Energy*, 2019. Vol. 170, no. 1. Pp. 250–260.
16. *Dixit S., Srivastava L., Singh A., Agnihotri G.* Optimal Placement of TCSC For Enhancement of Power System Stability Using Heuristic Methods: An Overview // *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015. Vol. 8, no. 7. Pp. 367–374.
17. *Singh B., Payasi R.P., Shukla V.* A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems // *Energy Reports*, 2017. Vol. 3, no. 1. Pp. 94–108.
18. *Sedighzadeh M., Rezazadeh A.* Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile // *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008. Vol. 37, no. 1. Pp. 251–256.
19. *Stanelyte D., Gudzius S., Andriusiene L.* Energy Distribution Planning Models Taxonomy and Methods of Distributed Generation Systems // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 107, no. 1. Pp. 275–283.
20. *Reddy S.C., Prasad P.V.N., Laxmi A.J.* Optimal Number and Location of DGs to Improve Power Quality of Distribution System Using Particle Swarm Optimization // *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012. Vol. 2, no. 3. Pp. 3077–3082.
21. *Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H.* A Comprehensive Review of Optimization Techniques Applied for Placement and Sizing of Custom Power Devices in Distribution Networks // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2012. Vol. 88, no. 11. Pp. 261–265.
22. *Charlangsut A., Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S.* Heuristic Optimization Techniques for Network Reconfiguration in Distribution System // *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012. Vol. 6, no. 4. Pp. 365–368.
23. *Bansal R.C.* Optimization Methods for Electric Power Systems: An Overview // *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2005. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–23.
24. *Beheshti Z., Mariyam S., Shamsuddin H.* A Review of Population-based Meta-Heuristic Algorithm // *International Journal of Advances in Soft Computing and its Application*, 2013. Vol. 5, no. 1. Pp. 1–35.
25. *Ibrahim A.M., Swief R.A.* Comparison of modern heuristic algorithms for loss reduction in power distribution network equipped with renewable energy resources // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. Vol. 9, no. 4. Pp. 3347–3358.
26. *Šipoš M., Klaić Z., Fekete K., Stojkov M.* Review of Non-Traditional Optimization Methods for Allocation of Distributed Generation and Energy Storage in Distribution System // *Technical Gazette*, 2018. Vol. 25, no. 1. Pp. 294–301.