

УДК 621.316.11

А. В. ГОРПИНИЧ – к.т.н., доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gorpinich@ieee.org, ORCID ID: 0000-0001-6954-2789

А. В. МЕДВЕДЕВ – магистр, инженер-проектировщик, ООО «СИКОМ» «Приазовье», г. Мариуполь, tema.medvedev@gmail.com

ВЫБОР МЕСТ УСТАНОВКИ И МОЩНОСТИ БАТАРЕЙ КОНДЕНСАТОРОВ МЕТОДОМ МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ С УЧЁТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Проблема оптимизации компенсации реактивной мощности (КРМ) с помощью батарей конденсаторов (БК) требует определения их типоразмеров и мест подключения в узлах сети. Целевая функция при этом обычно рассчитывается как сумма общей стоимости потерь электроэнергии и инвестиций на проведение КРМ. Оптимальным решением проблемы являются типоразмеры БК и места их установки, соответствующие глобальному минимуму целевой функции с учетом эксплуатационных ограничений, накладываемых, например, на уровни напряжения в узлах нагрузки.

Следует отметить, что установка БК, помимо снижения потерь активной и реактивной мощности, повышения уровней напряжения в узлах нагрузки и коэффициента мощности, приводит и к повышению надёжности работы распределительных сетей (РС) за счёт снижения перетоков реактивной мощности и соответствующей разгрузки линий электропередачи (ЛЭП), что можно рассматривать как альтернативу сооружения дополнительных ЛЭП [1]. Учёт фактора надёжности при оптимизации КРМ с помощью БК подразумевает введение в целевую функцию дополнительной составляющей, обусловленной изменением показателей надёжности РС [2].

Проблема оптимизации мест установки и мощности БК может рассматриваться как проблема сложной нелинейной целочисленной оптимизации, так как значения типоразмеров БК и узлов их подключения

дискретны (целевая функция является недифференцируемой), а затраты на БК имеют нелинейную зависимость от их мощности. При решении этой проблемы пространство вариантов и количество локальных минимумов растёт экспоненциально с увеличением количества узлов оптимизируемой сети, поэтому метод прямого грубого поиска (метод полного перебора) в этом случае неприменим, так как перебор всех возможных комбинаций занимает неоправданно высокое процессорное время и может использоваться только для точного нахождения глобального оптимального решения в тестовых целях.

Применяемые методы оптимизации мест установки и мощности БК можно классифицировать на четыре категории [3]: аналитические методы, методы численного программирования, эвристические методы и методы искусственного интеллекта. Основной недостаток аналитических методов – моделирование мест установки и мощности БК с непрерывным представлением переменных величин, т.е. без учёта дискретности шкалы мощностей БК и узлов их подключения. Получаемые при этом значения мощности БК могут не соответствовать реальным типоразмерам, а предполагаемые места установки – реальным узлам РС, поэтому полученные результаты, возможно, придётся округлять в большую или меньшую сторону до ближайшего реального значения, что может привести к перенапряжениям в узлах нагрузки и/или

снижению экономического эффекта от внедрения мероприятий по КРМ.

Преимуществом некоторых методов численного программирования над аналитическими методами является учёт дискретности шкалы мощностей БК и узлов их подключения, однако процесс подготовки данных и разработки интерфейса для методов численного программирования может потребовать намного больше времени по сравнению с аналитическими методами. Эвристические методы являются интуитивно понятными, отличаются наглядностью и простотой реализации по сравнению с аналитическими методами и методами численного программирования, однако результаты, полученные с их помощью, не всегда являются оптимальными и, кроме того, они требуют значительных вычислительных затрат.

Наличие указанных выше недостатков предопределяет применение и исследование новых нетрадиционных методов оптимизации – в последнее время всё чаще применяют математическое описание природных механизмов поиска оптимальных решений на основе методов искусственного интеллекта. Широкое распространение получили методы имитации отжига, генетические алгоритмы, алгоритмы поиска с запретами, муравьиные алгоритмы, методы эволюционного программирования, методы нечёткой логики, экспертные системы, нейросетевые вычисления, модификации метода роя частиц (МРЧ) и т.д.

Цель работы – представить модификацию муравьиного алгоритма с использованием элитных муравьёв, предназначенную для оптимизации мест установки и мощности БК с учётом показателей надёжности РС, и показать её эффективность путём сравнения с другими алгоритмами оптимизации. В отличие, например, от генетических алгоритмов и методов эволюционного программирования, алгоритм колонии муравьёв (АКМ) обладает гарантированной сходимостью и памятью о всех предыду-

щих итерациях [4]. Другим существенным преимуществом АКМ является возможность построения гибридной системы параллельных вычислений в динамике моделируемого процесса оптимизации.

Как уже отмечалось выше, КРМ позволяет не только снизить потери активной и реактивной мощности, но и в ряде случаев существенно ограничить протекающие по линиям токи за счёт уменьшения реактивных составляющих, что можно рассматривать как своего рода повышение надёжности этих линий, так как при снижении протекающих токов снижается и параметр потока отказов [1]. Если реактивная составляющая тока линии скомпенсирована частично, то с помощью линейной зависимости от уровня КРМ в процентах параметр потока отказов этой линии можно определить на основе параметра потока отказов линии до КРМ и параметра потока отказов после полной компенсации реактивной составляющей тока. Таким образом, получается зависимость между показателями надёжности РС и уровнем КРМ с учётом, например, мест установки и мощности БК, причём при оптимизации эта зависимость позволяет включить в целевую функцию дополнительную составляющую, обусловленную изменением уровня надёжности.

Предположим, что до установки БК некоторая i -я ЛЭП характеризовалась параметром потока отказов, равным $\lambda_i^{\text{uncomp}}$. Если реактивная составляющая тока i -й ЛЭП будет полностью скомпенсирована, то её параметр потока отказов составит λ_i^{comp} . Очевидно, что параметр потока отказов ЛЭП с компенсацией, а, следовательно, и с меньшим током, будет меньше соответствующего параметра линии без компенсации – $\lambda_i^{\text{uncomp}} > \lambda_i^{\text{comp}}$. Если реактивная составляющая тока линии скомпенсирована частично, то коэффициент, характеризующий уровень компенсации i -й ветви схемы, можно определить как

$$\alpha_i = \frac{I_{r \text{ new}}^i}{I_{r \text{ old}}^i}, \quad (1)$$

где $I_{r \text{ old}}^i$ – реактивная составляющая тока i -й ветви до компенсации; $I_{r \text{ new}}^i$ – реактивная составляющая тока i -й ветви после компенсации.

С учётом линейной зависимости от уровня КРМ в процентах новое значение параметра потока отказов ЛЭП можно определить по выражению

$$\lambda_{i \text{ new}} = \alpha_i (\lambda_i^{\text{uncomp}} - \lambda_i^{\text{comp}}) + \lambda_i^{\text{comp}}. \quad (2)$$

Рассмотрим разработанную авторами модификацию АКМ, которая адаптирована применительно к задаче оптимизации мест установки и мощности БК с учётом показателей надёжности РС и реализована в среде MATLAB. Исходными данными для адаптированного алгоритма являются три группы параметров:

- 1) параметры оптимизируемой сети (топология, параметры линий, нагрузки в узлах, напряжения источников питания, уставки отпаек трансформаторов, показатели надёжности элементов и др.);
- 2) экономические показатели (стоимость электроэнергии, затраты на БК, ущерб от недоотпуска электроэнергии и т.д.);
- 3) параметры АКМ, критерий останова алгоритма и т.п.

Получаемое на выходе оптимальное решение – вектор типоразмеров БК вместе с местами их установки. Рассмотрим работу алгоритма оптимизации пошагово.

1. Инициализация.

Ввод топологии, параметров сети (параметры узлов и линий сети представлены в виде отдельных функций в матричной форме). Ввод типоразмеров БК, экономических показателей: стоимость установки и обслуживания БК, средние удельные ущербы от недоотпуска электроэнергии и от отключения мощности (перерыва электропитания (ЭС)). Ввод параметров АКМ:

количество муравьёв; параметр, контролирующий влияние феромона на выбор муравья; параметр, контролирующий влияние эвристической величины; интенсивность испарения; значения флуктуации; заданное количество итераций. При этом важно помнить, что интенсивность обновления феромона должна превышать интенсивность испарения, так как в противном случае карта феромона не сформируется. Кроме того, на данном этапе нормируется время простоя электрооборудования (ЭО) в случае ремонта и переключений, производится расчёт либо ввод значений параметров потока отказов отдельного ЭО.

2. Расчёт параметров сети до оптимизации.

На этом этапе (до начала процесса оптимизации) производится расчёт режима сети (определение потокораспределения, расчёт уровней напряжения в узлах нагрузки) методом Ньютона-Рафсона [5]. Алгоритм расчёта потокораспределения в дальнейшем используется как подпрограмма на каждой итерации для каждого муравья, поэтому его эффективность значительно влияет на скорость работы алгоритма в целом. Метод Ньютона-Рафсона позволяет выполнять расчёт потокораспределения сложных систем за сравнительно малое количество итераций [5]. После завершения процесса расчёта потокораспределения программа обладает всеми необходимыми параметрами режима сети, такими как напряжения в узлах, потоки мощности (комплексные токи) ЛЭП, потери активной и реактивной мощности в ветвях схемы. Результаты расчёта используются в целевой функции, с помощью которой определяется приемлемость решения. В общем виде целевая функция зависит от поставленных задач. В данной работе рассматриваются три целевые функции.

Первая – типичная, используется в большинстве работ на тему оптимизации КРМ, направлена на минимизацию потерь активной мощности и затрат на БК, выглядит следующим образом:

$$fitness_1 = C_{\Delta P} \times \sum_{i=1}^n \Delta P_L + invest + penalty, \quad (3)$$

где $C_{\Delta P}$ – эквивалентная ежегодная стоимость потерь активной мощности, \$/кВт; $\sum_{i=1}^n \Delta P_L$ – максимальные потери активной мощности в элементах сети, кВт; *invest* – инвестиции в БК, \$ в год (так как стоимость БК тем меньше, чем выше мощность, и способы расчёта этой стоимости варьируются у разных авторов, расчёт инвестиций в БК выполняет отдельная подпрограмма, с помощью которой можно учитывать дополнительные затраты на эксплуатацию БК, сроки окупаемости и т.д.); *penalty* – дополнительный параметр целевой функции, характеризующий штрафные санкции за нарушение эксплуатационных ограничений (например, превышение допустимых пределов изменения напряжения, перегрузка трансформаторов, линий и др.); штрафные санкции также рассчитываются отдельной подпрограммой на основании данных о режиме сети.

Вторая целевая функция определяется с учётом надёжности и представляется как сумма средних ущербов от отключения мощности отдельных узлов нагрузки и инвестиций в БК:

$$fitness_2 = \sum_{i=1}^m ECOST_i + invest, \quad (4)$$

где $ECOST_i$ – средний ущерб от отключения мощности (перерыва ЭС); m – количество узлов сети.

Третья, комплексная целевая функция, объединяет первые две и содержит сумму затрат от потерь активной мощности, сумму средних ущербов от отключения мощности отдельных узлов нагрузки, затраты на установку и эксплуатацию БК и опционально может включать штрафные санкции за нарушение установленных эксплуатационных ограничений, выраженные параметром *penalty*:

$$fitness_3 = C_{\Delta P} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta P_L + \sum_{i=1}^m ECOST_i + invest + penalty. \quad (5)$$

После расчёта режима сети до начала оптимизации он оценивается выбранной целевой функцией, при этом определяется начальная приемлемость решения для дальнейшего сравнения. Также в память программы вносятся некоторые параметры режима неоптимизированной сети (например, реактивные составляющие тока в ветвях сети для последующих вычислений коэффициентов, характеризующих уровень компенсации). Кроме того, программа производит вывод результатов расчёта начального режима сети до оптимизации и соответствующей приемлемости для наглядности. Ещё на данном этапе, перед началом оптимизации методом муравьиной колонии, формируется матрица пространства поиска, по которому муравьи будут прокладывать путь. Для каждого из муравьёв это пространство представляет двумерный массив, строки которого соответствуют типоразмерам БК, а столбцы – узлам сети. На первой итерации феромон распределён равномерно по всему пространству и равен некоторому значению.

3. Запуск цикла оптимизации АКМ.

Программа производит запуск цикла итераций собственно алгоритма оптимизации методом колонии муравьёв. При достижении заданного в начальных условиях количества итераций цикл прерывается.

4. Поиск решений отдельными муравьями.

Для каждого из муравьёв производится расчёт вероятности принятия того или иного решения при движении по пространству поиска с помощью выражения

$$P_{i,j} = \frac{(\tau_{i,j}^\alpha) \cdot (\eta_{i,j}^\beta)}{\sum_{l \in N_k^i} (\tau_{i,l}^\alpha) (\eta_{i,l}^\beta)}, \quad (6)$$

где $\tau_{i,j}$ – количество феромона на пути; α – параметр, контролирующий влияние

феромона на выбор муравья; $\eta_{i,j}$ – некая эвристическая величина; β – параметр, контролирующий влияние $\eta_{i,j}$; N_k^i – множество возможных решений муравья k , находящегося в узле i (множество формируется наложением выбранных ограничений на пространство поиска).

На первой итерации из-за равенства феромона по всему полю его влияние нулевое. Разнообразие в принятии решений муравьями вносит эвристический параметр $\eta_{i,j}$. В предложенном алгоритме этот параметр носит случайный характер и вносит некоторую долю девиации в поведение муравьёв. Если бы этот эвристический параметр отсутствовал, алгоритм вошёл бы в неопределенность или стагнацию на некотором локальном оптимуме. Девиация в поведении муравьёв стимулирует колонию исследовать новые и лучшие варианты решения.

После расчёта вероятности $p_{i,j}$ для каждого из возможных решений выбирается наиболее вероятное и муравей переходит на следующую ступень поиска. Цикл повторяется до тех пор, пока все муравьи не примут решения. В итоге получаем векторы решений для каждого муравья (векторы типоразмеров БК применительно к каждому узлу и муравью).

5. Оценка отдельных решений.

Сформированные каждым из муравьёв решения (векторы в виде ряда типоразмеров БК, соответствующих каждому из узлов) подвергаются оценке целевой функцией. Сначала программа модифицирует параметры сети, подключая к узлам выбранные отдельным муравьём БК. Затем производится расчёт режима такой модифицированной сети методом Ньютона-Рафсона. Далее целевая функция на основе результатов расчёта потокораспределения определяет приемлемость модифицированной сети. Описанный цикл повторяется для каждого из муравьёв. После завершения цикла мы получаем вектор приемлемостей,

соответствующих решениям, найденным каждым из муравьёв.

6. Обновление карты феромона.

На этом этапе сначала осуществляется глобальное испарение феромона по всей карте согласно выражению

$$\tau_{i,j} = (1-\rho)\tau_{i,j}, \quad (7)$$

где ρ – параметр, нормирующий интенсивность испарения.

Затем производится формирование новых следов феромона муравьями с наилучшими решениями, соответствующими высокой приемлемости решения (в данном случае наименьшим значениям выбранной целевой функции). Для дальнейшего усиления привлекательности наиболее оптимального решения на данном этапе используются ещё и так называемые «элитные муравьи» [4, 6]. В отличие от обычных муравьёв, они обладают памятью и на каждой итерации оставляют след феромона для текущего глобального оптимального решения. Использование элитных муравьёв является одной из возможных модификаций АКМ, ускоряющих поиск глобального оптимума [6]. Однако именно благодаря обычным муравьям элитные получают новые глобальные оптимальные решения. Рассмотренная выше процедура обновления феромона наглядно проиллюстрирована на рис. 1 с помощью растровой интерпретации формирования карты феромона.

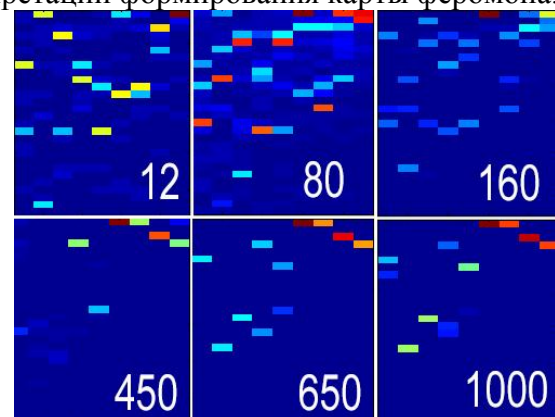


Рис. 1. Растровая интерпретация формирования карты феромона на пространстве поиска в зависимости от количества итераций (чем теплее цвет, тем выше значения феромона)

Также на данном этапе сохраняется глобально оптимальное за весь предыдущий процесс оптимизации решение с целью вывода окончательного результата, полученного после оптимизации, в память алгоритма. Если алгоритм не достиг заданного количества итераций, необходимо перейти к пятому шагу.

7. Расчёт режима сети, соответствующего глобально оптимальному решению.

Методом Ньютона-Рафсона производится окончательный расчёт режима сети для глобально оптимального решения, сохранённого в памяти программы; выводятся результаты потокораспределения оптимизированной сети, приемлемость решения и другие параметры (опционально) для наглядности.

8. Останов алгоритма.

Для подтверждения эффективности предложенной модификации АКМ используем реальную 9-узловую тестовую схему IEEE (рис. 2). Данная схема широко применяется в зарубежной литературе для сравнения результатов оптимизации, получаемых с помощью различных методов, которые разработаны другими авторами [2, 7–11]. Информация о нагрузках и данные по участкам линий приведены в табл. 1 и 2, типоразмеры и ежегодные затраты на БК – в табл. 3. При оптимизации эквивалентная ежегодная стоимость потерь активной мощности принята равной $C_{\Delta P} = 168$ \$/кВт, минимально и максимально допустимое среднеквадратическое значение напряжения в узлах – $U_{\min} = 0,9$ о.е. и $U_{\max} = 1,0$ о.е., соответственно (номинальное напряжение РС составляет 23 кВ).

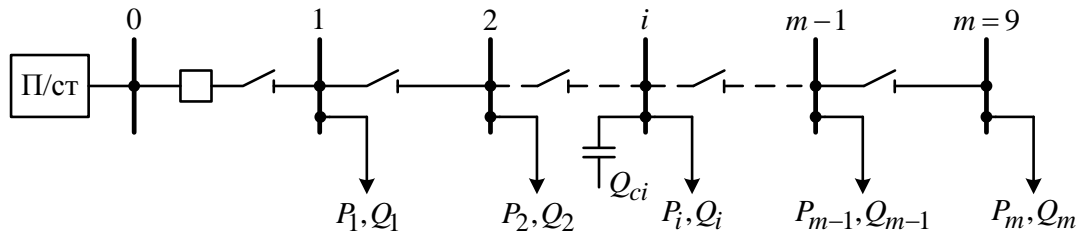


Рис. 2. 9-узловая тестовая схема IEEE

Таблица 1

Информация о нагрузках

Узел	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P , кВт	1840	980	1790	1598	1610	780	1150	980	1640
Q , квар	460	340	446	1840	600	110	60	130	200

Таблица 2

Данные по участкам линий

От узла	0	1	2	3	4	5	6	7	8
К узлу	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R , Ом	0,1233	0,014	0,7463	0,6984	1,9831	0,9053	2,0552	4,7953	5,3434
X , Ом	0,4127	0,6051	1,205	0,6084	1,7276	0,7886	1,164	2,716	3,0264
λ , отк./год	0,106	0,1	0,153	0,15	0,247	0,165	0,252	0,459	0,5

Таблица 3

Типоразмеры и ежегодные затраты на БК

Наименование	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Типоразмер БК Q_c , квар	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350
Затраты на БК, \$/квар	0,5	0,35	0,253	0,22	0,276	0,183	0,228	0,17	0,207
Наименование	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Типоразмер БК Q_c , квар	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700
Затраты на БК, \$/квар	0,201	0,193	0,187	0,211	0,176	0,197	0,17	0,189	0,187
Наименование	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Типоразмер БК Q_c , квар	2850	3000	3150	3300	3450	3600	3750	3900	4050
Затраты на БК, \$/квар	0,183	0,18	0,195	0,174	0,188	0,17	0,183	0,182	0,179

Для корректного сравнения эффективности предложенной модификации АКМ с эффективностью других алгоритмов оптимизации выполним согласование целевых функций, допущений, учитываемых эксплуатационных ограничений и параметров пространства поиска.

1. Целевая функция в большинстве рассматриваемых алгоритмов направлена на минимизацию потерь активной мощности и соответствует выражению (3). Следует отметить, что для наглядности сравнения различных алгоритмов были рассчитаны показатели приемлемости решений по всем предложенным целевым функциям, причём для каждого из авторов.
2. Отдельно проведена оптимизация с эксплуатационными ограничениями по допустимому напряжению в узлах в пределах от 0,9 о.е. до 1,0 о.е. по отношению к номинальному, так как указанные ограничения были установлены в работе [11].
3. В соответствии с [2] принято допущение о том, что ЛЭП с наибольшим сопротивлением соответствует наибольший параметр потока отказов, равный 0,5 отк./год,

в то время как ЛЭП с наименьшим сопротивлением соответствует наименьший параметр потока отказов, равный 0,1 отк./год. Параметры потока отказов всех остальных линий рассчитываются по линейному закону относительно данных величин в зависимости от сопротивления. Это связано с тем, что поток отказов ЛЭП тем выше, чем длиннее линия, а сопротивление находится в прямой зависимости от длины линии. Значения параметров потока отказов каждой из линий до оптимизации приведены в табл. 2.

4. Если реактивная составляющая тока линии I_r полностью скомпенсирована, параметр потока отказов этой линии снижается до 85 % от его изначального значения, принятого до компенсации [2]. В случае если выполнена частичная компенсация, значение параметра потока отказов определяется по выражению (2).
5. Выключатель установлен только на головном участке, а в начале каждой секции установлены разъединители: при устойчивом повреждении на любом из участков срабатывает выключатель, а после отыска-

ния места повреждения отключается нужный разъединитель и питание остальной части схемы восстанавливается. Время восстановления ЭС после отказа составляет 8 ч, а время, необходимое для отыскания повреждения и проведения переключений, – 0,5 ч. Все остальное ЭО, кроме ЛЭП, считается абсолютно надёжным, так как установка БК не оказывает значительного влияния на его надёжность [2].

6. Средний ущерб от отключения мощности (перерыва ЭС) рассчитывается по выражению

$$\sum_{i=1}^m ECOST_i = \sum_{i=1}^m L_{a(i)} \cdot C_i \cdot \lambda_i, \quad (8)$$

где $L_{a(i)}$ – средняя нагрузка, подключенная к узлу i , кВт; C_i – средний удельный ущерб, отнесенный к 1 кВт отключаемой мощности (стоимость перерыва ЭС) для узла i , \$/кВт, который определяется с помощью обобщённой функции удельного ущерба потребителя – composite customer damage function (CCDF) в зависимости от длительности перерыва ЭС по графику, представленному на рис. 3 [12].

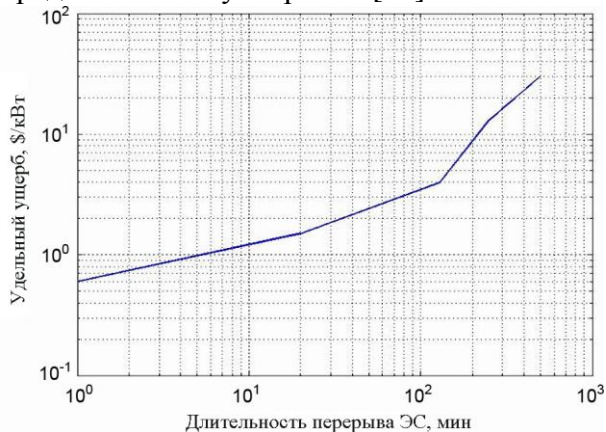


Рис. 3. График обобщённой функции удельного ущерба потребителя

7. Приведенные в табл. 3 ежегодные затраты на БК получены при допущении о 10-летнем ожидаемом сро-

ке их службы [9]. Параметр *invest* (инвестиции в БК, \$) целевых функций (3)-(5) приводится к одному году и определяется как 1/10 общей суммы затрат на БК [11].

8. Схема работает в симметричном режиме.

Результаты сравнения эффективности предложенной модификации АКМ с эффективностью других алгоритмов оптимизации [2, 7-11] представлены в табл. 4. Экономический эффект по всем трём целевым функциям приведен в табл. 5 (он определяется разностью значений целевых функций до и после оптимизации).

Анализ полученных результатов показывает, что по сравнению с другими алгоритмами предложенная модификация АКМ позволяет найти решение с лучшей приемлемостью. При использовании типичной целевой функции (3) экономический эффект от оптимизации сети с помощью АКМ составляет 17006 \$/год, что превышает его значение у авторов [8] на 14,7 %. Если учитывать ограничения по диапазону допустимых напряжений, то при использовании типичной целевой функции (3) экономический эффект от оптимизации сети с помощью АКМ на 7,7 % выше полученного в работе [11] и составляет 16720 \$/год.

Экономический эффект от оптимизации сети с учётом надёжности (использование целевой функции (4)) значительно превышает его значение, полученное для типичной целевой функции (3). Например, оптимизация сети с учётом надёжности при помощи АКМ приводит к экономическому эффекту в 64664 \$/год – это почти в 4 раза больше экономического эффекта, получаемого при использовании типичной целевой функции (3). Оптимизация сети с учётом надёжности при помощи МРЧ [2] приводит к экономическому эффекту в 54378 \$/год, что на 15,9 % ниже экономического эффекта, получаемого с помощью АКМ.

Таблиця 4

Сравнение алгоритмов оптимизации

Метод оптимизации	Ряд типоразмеров БК, квар	$\sum_{i=1}^n \Delta P_L$, кВт	Суммарные затраты на БК, \$	$\sum_{i=1}^m ECOST_i$, \$/год	Целевая функция (ЦФ)	Показатели ЦФ			Мин. напряжение, о.е.
						типичная, \$	надёжн., \$	компл., \$	
До оптимизации	–	783,78	–	466120	–	119446	429096	547486	0,838
Эвристический метод [7]	0, 0, 0, 4050, 0, 0, 900, 0, 900	704,71	10560	428040	типичн. (3)	117162	425572	541342	0,900
Нечёткая логика [8]	0, 0, 3300, 2100, 1650, 0, 0, 0, 600	689,11	13920	424180	типичн. (3)	122062	433982	554852	0,900
Эвристический метод [9]	0, 0, 0, 2700, 2850, 0, 0, 0, 900	719,45	11920	432790	типичн. (3)	118541	424331	541621	0,907
Эволюционный метод [10]	0, 0, 0, 4050, 1650, 0, 0, 0, 750	698,14	12510	423080	типичн. (3)	114663	425584	538513	0,900
АКМ	0, 3900, 1200, 2100, 900, 450, 0, 150, 300	696,40	17340	420070	типичн. (3)	116238	427808	542108	0,867
Селективный МРЧ [11], ограничения	150, 3000, 3450, 1800, 0, 750, 150, 0, 600	680,36	19380	425870	типичн. (3), отр.	114950	412560	525890	0,900
АКМ, ограничения	0, 3150, 1800, 2100, 450, 450, 300, 300, 300	674,60	16200	410940	типичн. (3), отр.	117782	411742	528642	0,900
МРЧ [2]	0, 0, 3000, 0, 0, 450, 0, 450, 450	698,87	8820	410860	надёжн. (4)	116056	401456	516456	0,879
АКМ	600, 0, 450, 2100, 600, 300, 0, 300, 450	684,50	10560	400400	надёжн. (4)	116076	408736	523526	0,882
МРЧ [2]	1050, 0, 0, 2700, 0, 600, 450, 0, 450	683,31	12760	407460	компл. (5)	115909	401729	516809	0,883
АКМ	0, 0, 750, 1800, 900, 0, 300, 150, 450	684,00	9945	400900	компл. (5)	119446	429096	547486	0,882

Таблица 5

Экономический эффект при разных алгоритмах оптимизации

Метод оптимизации	Ряд типоразмеров БК, квар	Целевая функция	Экономический эффект		
			типичная, \$/год	надёжн., \$/год	компл., \$/год
До оптимизации	–	–	0	0	0
Эвристический метод [7]	0, 0, 0, 4050, 0, 0, 900, 0, 900	типичн. (3)	12224	37024	50314
Нечёткая логика [8]	0, 0, 3300, 2100, 1650, 0, 0, 0, 600	типичн. (3)	14508	40548	56458
Эвристический метод [9]	0, 0, 0, 2700, 2850, 0, 0, 0, 900	типичн. (3)	9608	32138	42948
Эволюционный метод [10]	0, 0, 0, 4050, 1650, 0, 0, 0, 750	типичн. (3)	13129	41789	56179
АКМ	0, 3900, 1200, 2100, 900, 450, 0, 150, 300	типичн. (3)	17006	40536	59286
Селективный МРЧ [11], ограничения	150, 3000, 3450, 1800, 0, 750, 150, 0, 600	типичн. (3), огр.	15432	38312	55692
АКМ, ограничения	0, 3150, 1800, 2100, 450, 450, 300, 300, 300	типичн. (3), огр.	16720	53560	71910
МРЧ [2]	0, 0, 3000, 0, 0, 450, 0, 450, 450	надёжн. (4)	13888	54378	69158
АКМ	600, 0, 450, 2100, 600, 300, 0, 300, 450	надёжн. (4)	15614	64664	81344
МРЧ [2]	1050, 0, 0, 2700, 0, 600, 450, 0, 450	компл. (5)	15594	57384	74274
АКМ	0, 0, 750, 1800, 900, 0, 300, 150, 450	компл. (5)	15760	64390	80990

Дополнительного экономического эффекта можно достичь не только за счёт учёта надёжности ЭС, но и за счёт учёта качества электроэнергии (КЭ) в узлах нагрузки (например, при использовании штрафных санкций за ухудшение уровней напряжения). Кроме того, показатели, характеризующие функциональную надёжность ЭО, могут быть легко интегрированы в рассматриваемый алгоритм оценки экономического эффекта от повышения надёжности при оптимизации мест установки и мощности БК, что представляет не только научный, но и практический интерес, и является предметом дальнейших исследований.

Пример поиска с помощью АКМ оптимального решения в динамике представлен на рис. 4. На начальных итерациях наблюдаются значительные флуктуации в поиске оптимума, связанные с отсутствием чётко сформированной карты феромона. Далее разброс решений снижается, алгоритм сходится, однако процесс поиска не останавливается за счёт наличия вероятностной составляющей в критерии выбора муравьём того или иного решения. В связи с этим время от времени можно наблюдать всплески флуктуаций, связанные с неопределённостью выбора близких по приемлемости решений или определением новых локальных оптимумов.

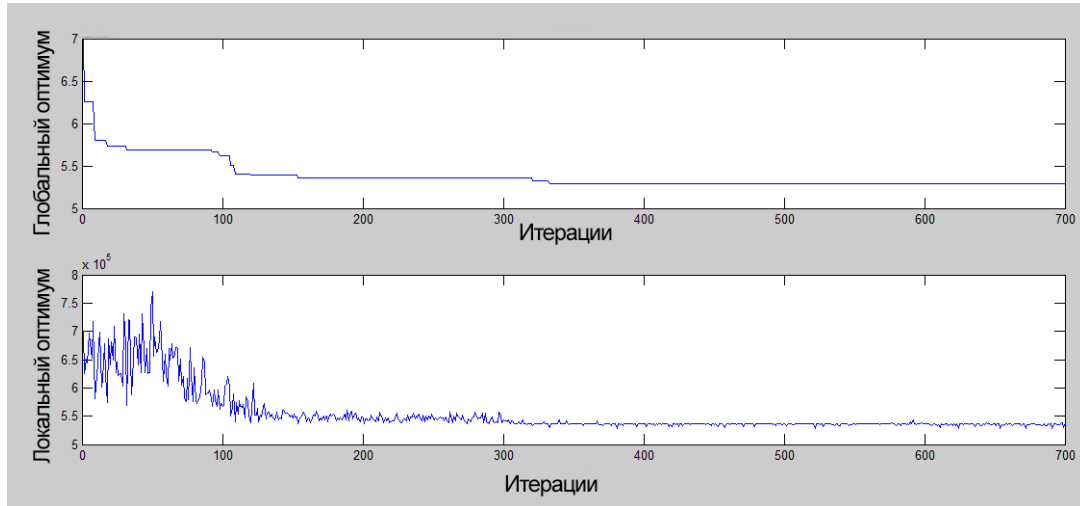


Рис. 4. Пример работы АКМ (зависимость глобального оптимума (вверху) и текущего оптимума (внизу) от количества итераций)

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Для оптимизации мест установки и мощности БК с учётом показателей надёжности РС предложена модификация муравьиного алгоритма с использованием стратегии элитизма, которая реализована в среде MATLAB. Путём сравнения с другими алгоритмами оптимизации установлено, что предложенная модификация АКМ позволяет найти лучшие решения. Архитектура предложенного алгоритма обладает гибкими возможностями в плане введения дополнительных условий и ограничений при поиске оптимальных решений без существенного увеличения вычислительных затрат. Представляется целесообразным исследовать возможности применения методов искусственного интеллекта для построения гибридной системы параллельных вычислений в динамике процесса оптимизации.
2. На примере реальной 9-узловой тестовой схемы IEEE показано, что при оптимизации мест установки и мощности БК экономический эффект от повышения надёжности линий РС, обусловленный снижением их токовой нагрузки, может даже существенно превысить экономический эффект от снижения потерь активной мощности. В результате оптимизации этой реальной 9-узловой тестовой схемы IEEE с учётом надёжности при помощи предложенной модификации АКМ получен экономический эффект в 64664 \$/год, что почти в 4 раза больше экономического эффекта, получаемого при использовании типичной целевой функции, которая учитывает только минимизацию потерь активной мощности и затрат на БК.
3. Дополнительного экономического эффекта можно достичь не только за счёт учёта надёжности линий РС, но и за счёт учёта КЭ в узлах нагрузки (например, при использовании штрафных санкций за ухудшение уровней напряжения). Кроме того, показатели, характеризующие функциональную надёжность ЭО, могут быть легко интегрированы в рассматриваемый алгоритм оценки экономического эффекта от повышения надёжности при оптимизации мест установки и мощности БК, что представляет не только научный, но и практический интерес, и является предметом дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Sallam, A. A. Shunt capacitor effect on electrical distribution system reliability [Text] / A. A. Sallam, M. Desouky, H. Desouky // IEEE Transactions on Reliability. – 1994. – Vol. 43. – No. 1. – P. 170–176.
2. Etemadi, A. H. Distribution system reliability enhancement using optimal capacitor placement [Text] / A. H. Etemadi, M. Fotuhi-Firuzabad // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2008. – Vol. 2. – No. 5. – P. 621–631.
3. Ng, H. N. Classification of capacitor allocation techniques [Text] / H. N. Ng, M. M. A. Salama, A. Y. Chikhani // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15. – No. 1. – P. 387–392.
4. Dorigo, M. Ant colony optimization [Text] / M. Dorigo, T. Stützle. – Cambridge, Massachusetts; London: The MIT Press; A Bradford Book, 2004. – 305 p. – ISBN 0-262-04219-3.
5. Momoh J. A. Electric power system applications of optimization [Text] / J. A. Momoh. – New York, New York: Marcel Dekker, Inc., 2001. – 486 p. – ISBN 0-8247-9105-3.
6. Штовба, С. Д. Муравьиные алгоритмы / С. Д. Штовба // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – № 4 (4). – С. 70–75.
7. Abdel-Salam, T. S. A new technique for loss reduction using compensating capacitors applied to distribution systems with varying load condition [Text] / T. S. Abdel-Salam, A. Y. Chikhani, R. Hackam // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9. – No. 2. – P. 819–827.
8. Su C.-T. A new fuzzy-reasoning approach to optimum capacitor allocation for primary distribution systems [Text] / C.-T. Su, C.-C. Tsai // Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT '96). – 02-06 December 1996. – Shanghai (China). – P. 237–241.
9. Baghzouz, Y. Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distorted substation voltages [Text] / Y. Baghzouz, S. Ertem // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1990. – Vol. 5. – No. 2. – P. 650–657.
10. Su C.-T. Modified differential evolution method for capacitor placement of distribution systems [Text] / C.-T. Su, C.-S. Lee // Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. – 06-10 October 2002. – Yokohama (Japan). – Vol. 1. – P. 208–213.
11. Khalil, T. M. Selective particle swarm optimization [Text] / T. M. Khalil, A. V. Gorpnich // International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering (IJMSE). – 2012. – Vol. 3. – No. 4. – P. 1–4.
12. Kavousi-Fard A. Optimal distribution feeder reconfiguration for reliability improvement considering uncertainty [Text] / A. Kavousi-Fard, T. Niknam // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2014. – Vol. 29. – No. 3. – P. 1344–1353.

Ключові слова: оптимізація місць встановлення та потужності батарей конденсаторів, надійність розподільної мережі, якість електроенергії, алгоритм колонії мурах, стратегія елітизму, узагальнена функція питомого збитку споживача.

Ключевые слова: оптимизация мест установки и мощности батарей конденсаторов, надёжность распределительной сети, качество электроэнергии, алгоритм колонии муравьёв, стратегия элитизма, обобщённая функция удельного ущерба потребителя.

Keywords: optimal capacitor placement and sizing, distribution system reliability, power quality, ant colony search algorithm, elitist strategy, composite customer damage function.

Рецензенти:

д.т.н., проф. І. В. Жежеленко
д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк.

Надійшла до редколегії 19.03.2015.
Прийнята до друку 30.03.2015.