

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В статье рассмотрена задача повышения эффективности функционирования разомкнутых распределительных сетей посредством оптимального распределения между узлами сети реактивной мощности, подлежащей компенсации. Проведен сравнительный анализ методов оптимизации, на основании которого и в соответствии с целью исследования выбран генетический алгоритм. Адаптированы основные понятия и теоретические положения генетического алгоритма к решению оптимизационной задачи размещения компенсирующих устройств в узлах распределительной сети. В соответствии с предложенной математической моделью оптимизации размещения компенсирующих устройств разработана блок-схема генетического алгоритма, программно реализованная в Mathcad для различных схем электроснабжения. Отличительными особенностями разработанного модифицированного генетического алгоритма являются: процедура кодирования, обеспечивающая решение оптимизационной задачи в неотрицательных дискретных переменных; процедура проверки ограничения по значению избыточной реактивной мощности. Результаты сравнительного анализа программ, реализованных посредством генетического алгоритма и метода полного перебора, а также апробация программы для разомкнутой распределительной сети предприятия показали целесообразность применения генетического алгоритма в решении оптимизационных задач выбора мощности и размещения компенсирующих устройств.

Ключевые слова: компенсирующие устройства, реактивная мощность, распределительная сеть, генетический алгоритм, реализация в Mathcad.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно статистическим данным филиала ПАО «МРСК Волги» – «Оренбургэнерго» за период 2014 – 2018 гг. потребление реактивной мощности (РМ) в Оренбургской области увеличилось на 8,1% [1]. В то же время передача РМ на значительные расстояния от мест генерации до мест потребления существенно ухудшает технико-экономические показатели распределительной сети: увеличиваются переотдачи реактивной мощности (в распределительных сетях 6–10 кВ они могут достигать до 40 % от суммарных потерь электроэнергии [2,3]); возрастают потери электроэнергии; изменяется значение напряжения в узлах; уменьшается эффективность функционирования сетевого оборудования и др.

В соответствии с программой национальной технологической инициативы задачи энергосбережения и энергоэффективности входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации. В связи с этим компенсация избыточной реактивной мощности, передаваемой по сети, является одной из актуальных задач электроэнергетики.

Основные положения теории компенсации реактивной мощности изложены во многих работах [3–16], в них рассмотрены вопросы, касающиеся назначения компенсации РМ, средств компенсации реактивной мощности, к которым отнесены компенсирующие устройства (КУ), расчета мощности КУ. При этом вопрос об оптимизации размещения КУ с учетом дискретности значений реактивной мощности (устройства позволяют регулировать генерируемую ими мощность только ступенчато) остается недостаточно прорабо-

ванным. Под оптимизацией размещения КУ в исследовании в соответствии с работами [2, 17] понимаем оптимальное распределение избыточной реактивной мощности, подлежащей компенсации Q_K .

В связи с этим целью работы является оптимальное распределение между узлами разомкнутой распределительной сети избыточной реактивной мощности, подлежащей компенсации, по критерию минимальных потерь активной мощности $\Delta P(Q_{KY})$ с учетом дискретного изменения значений мощности КУ.

Анализ научно-технической литературы по применению математических методов в решении оптимизационных задач в области электроэнергетики и электротехники [18–23] позволил условно выделить пять групп методов.

К первой группе авторами отнесены аналитические методы, такие как метод неопределенных множителей Лагранжа, Каруша-Куна-Таккера, вариационные методы и др. Для данных методов характерно представление целевой функции в виде аналитического выражения и определение экстремума посредством приравнивания к нулю производной от целевой функции. К основным недостаткам аналитических методов в решении задач оптимизации размещения КУ следует отнести следующее: повышение сложности решения при большом количестве переменных и ограничений; сложность использования в задачах с дискретно изменяющимися переменными.

Вторая группа – это численные методы, к которым относятся методы покоординатного спуска, наискорейшего спуска, сопряженных градиентов, дихотомии, золотого сечения, Фибоначчи и др. Численные методы решения оптимизационных задач относятся к группе приближенных методов. Недостатками численных методов являются: малая скорость сходимости; вероят-

ность закликивания алгоритма поиска решения; невысокая точность решения.

К третьей группе отнесены методы случайного поиска, в том числе метод Монте-Карло, методы статического градиента, методы статического наискорейшего спуска и др. Для этих методов характерно недетерминированное представление целевой функции и вероятностный поиск экстремума. К основным недостаткам методов этой группы следует отнести: необходимость проведения большого числа итераций для получения решения, близкого к оптимальному, т.е. низкая скорость сходимости алгоритма к точке экстремума, а также неопределенность в выборе условия останковки поиска.

К четвертой группе отнесены методы поиска решений исчерпыванием всевозможных вариантов: метод полного перебора, метод поиска в глубину, метод ветвей и границ и т.д. Основными достоинствами методов этой группы являются: высокая точность определения искомой переменной; возможность оперировать с дискретными переменными, а основным недостатком – уменьшение быстродействия поиска оптимального решения при увеличении количества возможных решений.

В пятую группу отнесены методы искусственного интеллекта, одним из которых является генетический алгоритм (ГА). Генетический алгоритм, называемый «интеллектуальной» формой метода проб и ошибок, представляет собой эвристический алгоритм поиска, основанный на трех компонентах:

- генетической памяти, сконцентрированной в «хромосомах»;
- воспроизведении, осуществляемом при помощи операторов скрещивания и мутации;
- селекции продуктивных решений методами оптимизации многоэкстремальных функций.

К достоинствам ГА в процессе решения задач оптимизации нами отнесены: возможность параллельной работы с несколькими альтернативными решениями; высокая скорость сходимости алгоритма к точке экстремума; работа как с непрерывными, так и с дискретными переменными.

На основании проведенного анализа методов, учитывая тот факт, что решение оптимизационной задачи должно проводиться в дискретно изменяющихся переменных, в работе выбран генетический алгоритм.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КУ

В процессе формализации оптимизационной задачи приняты допущения и сформулированы следующие условия функционирования разомкнутой распределительной сети:

- 1) передаваемая по i -й линии активная мощность неизменна в зимний, а также летний периоды;
- 2) удельные потери активной мощности КУ составляют не более 0,5% от компенсационной мощности [2, 3, 24];
- 3) значения реактивной мощности КУ (искомые переменные) изменяются дискретно;
- 4) передача электрической энергии в распределительной сети осуществляется в соответствии с регламентируемым коэффициентом реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ [4].

Потери активной мощности в распределительных сетях без установки КУ определяются как

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U^2} R_i, \quad (1)$$

при установке КУ с учетом 2-го допущения эти потери уменьшатся до величины

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + (Q_i - Q_{\text{КVi}})^2}{U^2} R_i, \quad (2)$$

где ΔP – потери активной мощности; U – напряжение сети; R_i – активное сопротивление i -й линии; P_i , Q_i – активная и реактивная мощности i -й линии; $Q_{\text{КVi}}$ – реактивная мощность КУ, размещенного в i -м узле; n – количество узлов сети.

Из выражения (2) очевидно, что потери мощности имеют две составляющие, обусловленные соответственно активной и реактивной мощностями. Поскольку компенсация РМ влияет на изменение второй составляющей (учитываем 1-е допущение), поэтому в дальнейшем будем рассматривать потери в зависимости только от реактивных мощностей.

В соответствии с 4-м условием функционирования разомкнутой распределительной сети, решение задачи о компенсации реактивной мощности предложено проводить в три этапа. На первом этапе определяется избыточная реактивная мощность сети, подлежащая компенсации $Q_{\text{к}}$, из уравнения баланса реактивной мощности, с учетом нормируемого значения $\text{tg}\varphi$, на втором – осуществляется оптимизация по выбору мощности и мест установки КУ с применением ГА, на третьем – проверка по потерям напряжения в узлах распределительной сети. Проведение вычислений первого этапа подробно изложено авторами в работе [25]. Третий этап является классическим этапом проектирования КУ, представлен во многих работах по выбору мощности компенсирующих устройств, в том числе в работах [5, 7, 8]. В данной статье представлено решение второго этапа с применением генетического алгоритма.

На основании работы [17] и принятых допущений в исследовании предложено математическую модель оптимизации размещения КУ представить в виде системы уравнений, состоящую из:

- целевой функции – минимум потерь активной мощности, уравнение (3);
- ограничений – значение избыточной реактивной мощности, подлежащей компенсации, определяемое из уравнения баланса реактивных мощностей [25], уравнение (4);
- граничных условий – положительные, дискретные значения искомых величин, уравнение (5):

$$\Delta P(Q_{\text{КУ}}) = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{\text{КVi}})^2}{U^2} R_i \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{КVi}} \leq Q_{\text{к}}, \quad (4)$$

$$Q_{\text{КVi}} \geq 0, \quad Q_{\text{КVi}} - \text{дискретные значения.} \quad (5)$$

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ
ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА, ИСПОЛЗУЕМЫЕ
В РЕШЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

В работе рассмотрена стратегия поиска оптимального решения с применением ГА к задаче распределения избыточной реактивной мощности Q_K , подлежащей компенсации, между n узлами разомкнутой распределительной сети по критерию минимальных потерь активной мощности $\Delta P(q_{KY})$. Оптимальным решением задачи является такое подмножество значений мощности КУ $q_{KY}^* = \{q_{KY1}, q_{KY2}, \dots, q_{KYn}\}$ из множества допустимых решений Q_{KY} ($q_{KY}^* \in Q_{KY}$), удовлетворяющих условию

$$\sum_{i=1}^n q_{KYi} \leq Q_K,$$

для которого

$$\Delta P(q_{KY}^*) = \min_{q_{KY} \in Q_{KY}} \Delta P(q_{KY}).$$

В терминологии ГА рассматриваемая целевая функция $\Delta P(q_{KY}) = \Delta P(q_{KY1}, q_{KY2}, \dots, q_{KYn})$ эквивалентна понятию *приспособленности живого организма*. Подмножество $q_{KY} \in Q_{KY}$, представляющее собой вектор значений мощностей КУ $q_{KY} = \{q_{KY1}, q_{KY2}, \dots, q_{KYn}\}$, называется *фенотипом*, а отдельные его параметры q_{KYi} – признаками, $i = \overline{1, n}$. В ГА каждое значение q_{KYi} необходимо представить в некоторой форме s_i , называемой *геном*. Для этого вектор $q_{KY} = \{q_{KY1}, q_{KY2}, \dots, q_{KYn}\} \in Q_{KY}$ преобразуется в некоторую структуру $ch = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \in Ch$, называемую *хромосомой*: $Q_{KY} \xrightarrow{cod} Ch$, где cod – функция кодирования, Ch – пространство представлений. Восстановление решения осуществляется обратным преобразованием:

$Ch \xrightarrow{cod^{-1}} Q_{KY}$, где cod^{-1} – функция декодирования.

В пространстве Ch вводится *функция приспособленности* $f(ch)$, аналогичная целевой функции $\Delta P(q_{KY})$ на множестве Q_{KY} и удовлетворяющая условию: $\forall q_{KY1}, q_{KY2} \in Q_{KY}: ch^1 = cod(q_{KY1}), ch^2 = cod(q_{KY2}), ch^1 \neq ch^2$, если $\Delta P(q_{KY1}) > \Delta P(q_{KY2})$, то $f(ch^1) < f(ch^2)$. Таким образом, решение поставленной задачи сводится к поиску экстремума: $f(ch^*) = \max_{ch \in Ch} f(ch)$. При решении задачи используются наборы возможных решений $I = \{ch^k = (s_1^k, s_2^k, \dots, s_n^k), k = \overline{1, m}\} \subset Ch$, называемые *популяциями*, где ch^k – хромосома с номером k ; m – размер популяции; s_i^k – ген с номером i k -й хромосомы.

Применение ГА сводится к исследованию множества Ch (генотипов): чем выше значение функции приспособленности $f(ch^k)$, тем больше хромосома ch^k подходит в качестве решения. Затем осуществляется обратное преобразование: $q_{KY}^* = cod^{-1}(ch^*)$.

РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В РЕШЕНИИ
ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КУ

Разработанная обобщенная блок-схема генетического алгоритма поиска оптимального размещения КУ представлена на рис. 1.

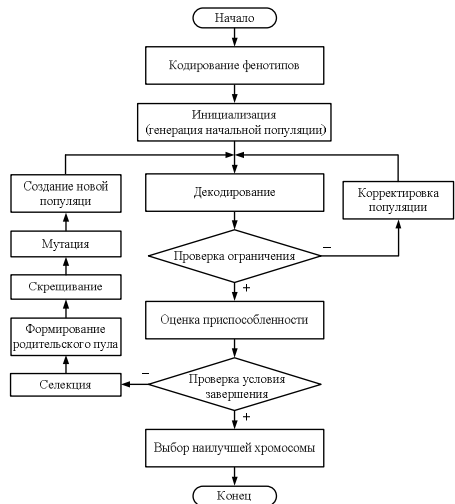


Рис. 1. Обобщенная блок-схема генетического алгоритма

Разработанный алгоритм программно реализован в среде Mathcad [26]. Фрагменты программ-функций, реализующих отдельные процедуры ГА, приведены на рис. 2-7. При разработке процедуры кодирования хромосом учтена дискретность изменения мощности КУ с шагом 50 квар.

```

Cod(N) :=
n ← rows(N) - 1
for i ∈ 0..n - 1
    t ← Nn-i
    D ← D + t · eln(2) · (i-h)
D
    
```

Рис. 2. Фрагмент процедуры кодирования

```

init_bin(n) :=
for i ∈ 0..2·n - 1
    for j ∈ 0..n - 1
        ch ← random(war)
        popi,j ← ch_str(ch)
init_bin(n) =
(
"0101" "1000" "1010"
"1010" "0011" "1010"
"1100" "1100" "0111"
"1010" "1010" "1000"
"0110" "0100" "0000"
"0101" "1101" "1100"
)
    
```

Рис. 3. Фрагмент процедуры инициализации
начальной популяции

```

init_dec(pop) :=
for i ∈ 0..rows(pop) - 1
    for j ∈ 0..cols(pop) - 1
        N ← popi,j
        deci,j ← Bin2Dec(ch_v(N))
        qk ← dec · 103
qk
init_dec(pop) =
(
250 400 500
500 150 500
600 600 350
500 500 400
300 200 0
250 650 600
)
    
```

Рис. 4. Фрагмент процедуры декодирования

```

pr(dec) :=
for i ∈ 0..rows(dec) - 1
    Ri ← ∑ (decT)(i)
R
pr(pop_dec) =
(
1.15 × 103
1.15 × 103
1.55 × 103
1.4 × 103
500
1.5 × 103
)
    
```

Рис. 5. Фрагмент процедуры проверки условия

```
sector_roulette(v) :=
  d ← 0
  for i ∈ 0..rows(v) - 1
    d ← d + vi
    si ← d
  sort(s)

sector_roulette(v) =
  (44.341
   61.612
   69.106
   75.658
   98.338
   100)
```

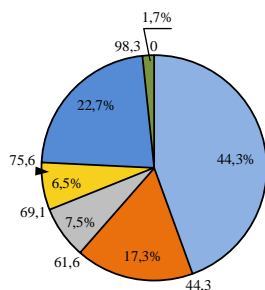


Рис. 6. Фрагмент процедуры селекции

```
New_pop(pop) :=
  for i ∈ 0, 2..rows(pop) - 2
    locus ← round( rnd( cols( Dec2Bin( (QK / 10^2) ) - 2 ) ) )
    for j ∈ 0..cols(pop) - 1
      chl ← ch_v(popi,j), ch2 ← ch_v(popi+1,j)
      r ← crossing(chl, ch2, locus)
      new_popi,j ← ch_str( mutation(r, (ϕ)) )
      new_popi+1,j ← ch_str( mutation(r, (ϕ)) )
    new_pop

New_pop(pop) =
  ( "1000" "0010" "1011" )
  ( "0100" "0111" "0010" )
  ( "1000" "0100" "1011" )
  ( "1110" "1010" "1011" )
  ( "1000" "0110" "1011" )
  ( "0111" "0100" "0001" )
```

Рис. 7. Фрагмент процедуры формирования новой популяции

В исследовании выполнен сравнительный анализ работы алгоритмов выбора оптимального размещения КУ, реализованных посредством ГА и методом полного перебора (МПП) [27]. Метод полного перебора выбран для сравнения в виду того, что он является наиболее точным методом решения оптимизационных задач [28].

Сравнение проводилось для 3-узловых схем соединений: радиальной, магистральной, смешанной и 5-узловой схемы смешанного типа (рис. 8) по следующим параметрам: значения реактивной мощности КУ в узлах; потери активной мощности и быстродействие программы (время, необходимое программе для вывода результата).

На рис. 9 представлен фрагмент разработанной в Mathcad программы-функции, реализующей метод полного перебора для радиальной 3-узловой схемы электроснабжения. Для остальных рассмотренных схем программы-функции аналогичны, отличия составляют лишь выражения целевой функции ΔP .

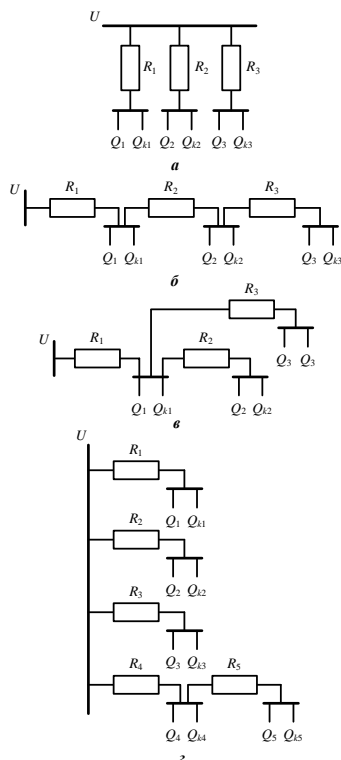


Рис. 8. Рассмотренные варианты схем электроснабжения:

а – 3-узловая радиальная; *б* – 3-узловая магистральная; *в* – 3-узловая смешанная; *з* – 5-узловая смешанная

```
ΔP(W) :=
  for m ∈ 1..cols(W)
    Qky ← W(m)
    Δ ← ΔP
    ΔP ← ∑i=13 [ Ri / U2 (Qi - Qkyi)2 ]
    P ← ΔP, Qk ← Qky if ΔP < Δ
  ( Qk
    P )
```

Рис. 9. Фрагмент программы-функции метода полного перебора для 3-узловой радиальной схемы электроснабжения

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА И МЕТОДА ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА

Результаты работы алгоритмов представлены в виде тензора 2-го ранга в таблице. Первый элемент тензора – вектор-столбец – содержит значения реактивной мощности КУ в узлах, единица измерения квар, второй элемент – значение целевой функции (потери активной мощности, единица измерения кВт). Отдельной строкой для каждого варианта схемы представлено время работы программы в секундах.

Результаты работы генетического алгоритма и алгоритма, реализованного методом полного перебора

| Вариант схемы | ГА | МПП | Относительная погрешность целевой функции, % |
|------------------------------|--|--|---|
| 3-х узловая радиальная | $\text{result} = \begin{bmatrix} 900 \\ 1 \times 10^3 \\ 750 \end{bmatrix} 149.48$ | $\text{result} = \begin{bmatrix} 800 \\ 1.05 \times 10^3 \\ 800 \end{bmatrix} 146.47$ | 2,01 |
| | $T := t1 - t0 = 21.848$ | $T := t1 - t0 = 25.4$ | |
| 3-х узловая магистральная | $\text{result} = \begin{bmatrix} 1 \times 10^3 \\ 1 \times 10^3 \\ 550 \end{bmatrix} 168.28$ | $\text{result} = \begin{bmatrix} 1 \times 10^3 \\ 1 \times 10^3 \\ 550 \end{bmatrix} 168.28$ | 0 |
| | $T := t1 - t0 = 24.3$ | $T := t1 - t0 = 31.541$ | |
| 3-х узловая смешанная | $\text{result} = \begin{bmatrix} 1.05 \times 10^3 \\ 700 \\ 900 \end{bmatrix} 198.64$ | $\text{result} = \begin{bmatrix} 1.1 \times 10^3 \\ 750 \\ 800 \end{bmatrix} 194.14$ | 2,26 |
| | $T := t1 - t0 = 25.999$ | $T := t1 - t0 = 34.412$ | |
| 5-и узловая смешанная | $\text{result} = \begin{bmatrix} 950 \\ 600 \\ 850 \\ 750 \\ 850 \end{bmatrix} 493.33$ | $\text{result} = \begin{bmatrix} 850 \\ 550 \\ 900 \\ 800 \\ 900 \end{bmatrix} 486.64$ | 1,36 |
| | $T := t1 - t0 = 34.28$ | $T := t1 - t0 = 7.93582 \times 10^3$ | |

Анализ полученных результатов, представленных в таблице, позволил заключить следующее:

- алгоритм разработанной программы на основе ГА достоверен и адекватен в виду того, что: погрешность значения целевой функции, определенной ГА, не превышает значения 2,26% по отношению к значению целевой функции, определенной МПП; значения реактивных мощностей в узлах, определенных посредством ГА, отличаются не более чем на 11,1 %, по сравнению со значениями, определенными МПП;

- быстродействие программы, разработанной на основе ГА, по сравнению с программой, реализующей МПП для 3-узловых схем соединения в среднем в 1,5 раза выше, а для 5-узловой смешанной схемы соединения – в 231,5 раза.

Разработанная программа была применена для решения задачи выбора оптимальной мощности и мест установки компенсирующих устройств в разомкнутой распределительной сети предприятия 10/0,4 кВ со смешанной схемой электроснабжения (рис. 10). Схема содержит 7 узлов, реактивные нагрузки Q_i которых находятся в диапазоне от 550 до 1750 квар. Избыточная реактивная мощность, подлежащая компенсации Q_k , составляет 3850 квар. По итогам решения поставленной задачи с учетом дискретности изменения мощности КУ с шагом 350 квар получены следующие значения: $Q_{k2} = Q_{k6} = 1400$ квар; $Q_{k3} = 700$ квар; $Q_{k5} = 350$ квар. В первом, четвертом и седьмом узлах

компенсации не требуется ($Q_{k1} = Q_{k4} = Q_{k7} = 0$). Потери мощности составили 2066 кВт.

До установки компенсирующих устройств коэффициент реактивной мощности в сети tgφ составлял 0,567. После определения оптимального размещения КУ коэффициент реактивной мощности tgφ уменьшился до 0,392. Полученное значение коэффициента реактивной мощности не превышает нормируемого значения $\text{tg}\varphi_{\text{норм}} = 0,4$, установленного Порядком [4] для сетей напряжением 6–20 кВ.

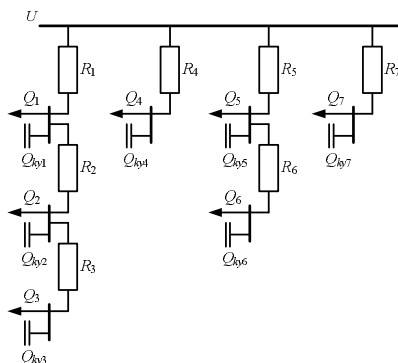


Рис. 10. Схема распределительной сети предприятия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено решение задачи о компенсации реактивной мощности проводить в три этапа. На первом этапе определять избыточную реактивную мощность сети, подлежащую компенсации, из уравнения баланса РМ, с учетом нормируемого значения коэффициента реактивной мощности. На втором этапе осуществлять оптимизацию по выбору мощности и мест установки КУ, на третьем – проверку по потерям напряжения в узлах распределительной сети. Предложена математическая модель оптимизации размещения КУ, состоящая из: целевой функции – минимума потерь активной мощности; ограничения – значения реактивной мощности, подлежащей компенсации; граничных условий – положительных, дискретных значений искоемых переменных.

2. Адаптированы основные понятия и положения теории ГА к решению оптимизационной задачи по размещению КУ: в качестве хромосомы предложено рассматривать мощность КУ в i -м узле распределительной сети; фенотипа – вектор значений мощностей КУ; гена – каждое значение реактивной мощности; популяция – различные варианты допустимых значений мощностей КУ, устанавливаемых во всех n узлах распределительной сети; функции приспособленности – целевую функцию. Разработан модифицированный генетический алгоритм для решения задачи выбора мощности КУ, новизной которого являются процедура кодирования, обеспечивающая решение поставленной задачи в неотрицательных дискретных переменных, и процедура проверки ограничения по значению избыточной реактивной мощности.

3. Сравнение алгоритмов по выбору оптимального размещения КУ показало следующее: быстроедействие программы, реализованной посредством ГА для 3-узловых схем выше в 1,5 раза, а для 5-узловой в 231,5 раз выше, чем программы, разработанной на основе метода полного перебора; расхождение значений целевой функции, определенной с помощью генетического алгоритма и метода полного перебора, для различных схем соединений составляет не более 2,26 %. Результаты сравнительного анализа показывают целесообразность применения генетического алгоритма в качестве оптимизационного метода решения задачи по размещению компенсирующих устройств в разомкнутой распределительной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Оренбургской области на период 2019–2023 гг. Оренбург, 2018. 207 с.
2. Беляевский Р.В., Ефременко В.М. Расчет оптимального размещения компенсирующих устройств методом множителей Лагранжа // Вестник КузГТУ. 2012. №6. С. 138–141.
3. Энергосбережение в системах промышленного электроснабжения: Справочно-методическое издание / под ред. Э.А. Киреевой. М.: Интехэнерго-Издат: Теплоэнергетика, 2014. 304 с.
4. О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии : Приказ Минэнерго России от 23.06.2015 № 380.
5. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии : Руководство для прак-

6. тических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
7. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption : Staff Report of Federal Energy Regulatory Commission. Washington, D. C., USA, 2005. 177 p.
8. Нелюбов В.М., Пилипенко О.И. Электрические сети и системы: учеб. пособие. / Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2018. 188 с.
9. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учеб. пособие / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 234 с.
10. Baran B., Vallejos J., Ramos R., Fernandez U. Reactive Power Compensation using a Multi -objective Evolutionary Algorithm. IEEE Porto Power Tech Conference, 2001, Sept.
11. Ефременко В.М., Беляевский Р.В., Пономарев Н.В. Выбор оптимальных способов компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий // Вестник Кузбасского технического университета. Энергетика. 2011. №5. С. 81–84.
12. Маркман Г.З. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 184 с.
13. Лоскутов А.Б., Еремин О.И. Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Промышленная энергетика. 2006. №6. С. 39–41.
14. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Published by Epcos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. 79 p.
15. Hofmann W., Schlabbach J., Just W. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. 2 edition. New York: Wiley, 2012, April. 304 p.
16. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption: Tech. rep. Washington: Federal Energy Regulatory Commission, 2005. February. 275 p.
17. Bohème P.A. Simulation of Power System Response To Reactive Power Compensation. – Master's thesis, The University of Tennessee, 2006. November. 263 p.
18. Костин В.Н. Оптимизационные задачи в электроэнергетике : учеб. пособие. СПб. : СЗТУ, 2003. 120 с.
19. Карагодин В.В., Рыбаков Д.В. Оптимизация размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях специальных объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. №10. С. 823–828.
20. Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 105 с.
21. Кычкин А.В., Чудинов А.В. Применение генетического алгоритма для оптимизации размещения альтернативных источников энергии в локальном сегменте активно-адаптивной сети // Системы. Методы. Технологии. 2016. №1(29). С. 76–82.
22. Семенова Л.А., Инжеватова А.О., Салимов Р.М. Анализ методов оптимизации в решении задач выбора мест установки и мощности компенсирующих устройств [Электронный ресурс] // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбург. гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2017. С. 513–516.
23. Delfanti M., Granelli G., Marannino P., Montagna M. Optimal Capacitor Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms // IEEE Trans. Power Systems. 2000, Aug., vol. 15, no 3.
24. Кремер О.Б., Подвалный С.Л. Программная реализация решения оптимизационных задач методом генетического алгоритма // Вестник ВГТУ. 2017. С. 23–24.
25. Семенова Л.А., Инжеватова А.О. Оптимизация размещения компенсирующих устройств в узлах электриче-

- ской сети с применением генетического алгоритма // *Достижения вузовской науки: от теории к практике* : сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 15-летию Курганского филиала ОГУ. Оренбург: Издательско-полиграфический комплекс ОГУ, 2018. С. 141-145.
25. Семенова Л.А., Инжеватова А.О., Салимов Р.М. К вопросу выбора оптимальной мощности и мест размещения устройств компенсации реактивной мощности // *Энергетика: состояние, проблемы, перспективы* : труды VIII Всероссийской научно-технической конференции. Оренбург: ООО Агентство «Пресса», 2016. С. 15-19.
 26. Свидетельство о регистрации прикладной программы «Генетический алгоритм с фиксированным шагом поиска мощности компенсирующих устройств» / Влацкая Л.А.: УФЭР. №1998; опублик. 25.10.19.
 27. Влацкая Л.А., Семенова Н.Г. Разработка алгоритма оптимального размещения компенсирующих устройств в узлах электрической сети с применением генетического алгоритма // *Материалы Международной (XX) Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологий»* (Бенардосовские чтения). Иваново: ИГЭУ, 2019. Т. 1. С. 303-307.
 28. Коновалов И.С., Остапенко С.С., Кобак В.Г. Сравнение эффективности работы точных и приближенных алгоритмов для решения задачи о покрытии множества // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. № 3(90) Т. 17. С.137-144.

Поступила в редакцию 7 сентября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS IN PROBLEMS OF PLACEMENT OPTIMIZATION OF COMPENSATING DEVICES

Ludmila A. Vltaskaya

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electric and Heat-power engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: L_sem@mail.ru

Natalya G. Semenova

D.Sc. (Pedagogics), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Automated Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: ng_sem@mail.ru.

The article deals with the problem of improving the efficiency of open distribution networks through the optimal distribution of reactive power between the nodes of the network subject to compensation. A comparative analysis of optimization methods is carried out on the basis of which and in accordance with the purpose of the study, a genetic algorithm is chosen. The basic concepts and theoretical provisions of the genetic algorithm are adapted to solve the optimization problem of placing compensating devices in the nodes of the distribution network. In accordance with the proposed mathematical model for optimizing the placement of compensating devices, a block diagram of the genetic algorithm was programmatically implemented in Mathcad for various schemes of connection of power supply systems. The distinctive features of the developed modified genetic algorithm include the coding procedure that provides the solution of the optimization problem in non-negative discrete variables; the procedure for checking the limit on the value of excess reactive power. The results of the comparative analysis of the programs implemented by genetic algorithm and exhaustive search and testing program for the open distribution network businesses have shown expediency of application of the genetic algorithm in solving optimization problems in the field of site selection and placement of compensating devices.

Keywords: compensating devices, reactive power, compensating devices, reactive power, genetic algorithms, genetic algorithms, Mathcad.

REFERENCES

1. *Skhema i programma perspektivnogo razvitiya elektroenergetiki Orenburgskoi oblasti na period 2019-2023 gody* [Scheme and program of perspective development of electric power industry of the Orenburg region for the period 2019-2023]. Orenburg, 2018. 207 p. (In Russian)
2. Efremenco V.M., Beliaevsci R.V. Calculation of optimal placement of compensating devices by Lagrange multipliers. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzGTU], 2012, no 6, pp. 138-141. (in Russian)
3. *Energosberezhenie v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya* [Energy saving in industrial power supply systems]: Reference book / Under the editorship E.A.Kireeva. Moscow: Intexenergo-Izdat, Heat power engineering, 2014. 304 p. (In Russian)
4. *O poriadke rascheta znacheniy sootnosheniya potrebleniya aktivnoi i reaktivnoi moshchnosti dlya otdelnykh energoprimayushchikh ustroystv potrebiteli elektricheskoi energii* [Calculation of values of the ratio of consumption of active and reactive power for separate power accepting devices (groups of energy receiving devices) consumers of electric energy]: Order of the RF Ministry of Energy from 23.06.2015 no. 380. (In Russian)
5. Gelezko J.C. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii*. [Power loss. Reactive power. Power quality]. Moscow : ENAS, 2009. 456 p. (In Russian)
6. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption : Staff Report of Federal Energy Regulatory Commission. Washington, D. C., USA, 2005. 177 p.
7. Nelyubov V.M., Pilipenko O.I. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electric networks and systems]: training manual; Orenburg state University. Orenburg: OSU, 2018, 188 p. (In Russian)
8. Kabishev A.V. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriyatiy* [Reactive power compensation in electrical installations of industrial enterprises]. Tomsk : Publishing center of Tomsk Polytechnic University, 2012. 234 p. (In Russian)
9. Baran B., Vallejos J., Ramos R., Fernandez U. Reactive Power Compensation using a Multi-objective Evolutionary Algorithm. IEEE Porto Power Tech Conference, 2001, Sept.
10. Efremenco V.M., Beliaevsci R.V., Ponomarev N.V. Selection of optimal ways of reactive power compensation in electric networks of industrial enterprises. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzGTU], 2011, no 5, pp.18-84 (in Russian).
11. Markman G.Z. *Energoeffektivnost preobrazovaniya i transportirovki elektricheskoi energii* [Energy efficiency of conversion and transportation of electric energy]. Tomsk : Publishing center of Tomsk Polytechnic University, 2008, 184 p. (In Russian)

12. Loskutov A.B., Eremin O.I. Multipurpose optimization of reactive power compensation in electrical networks. *Promishlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 2006, no 6, pp. 39-41 (in Russian).
13. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Published by Epcos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. 79 p.
14. Hofmann W., J. Schlabbach, W. Just. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. 2 edition. New York: Wiley, 2012, April, 304 p.
15. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption: Tech. rep. Washington: Federal Energy Regulatory Commission, 2005, February, 275 p.
16. Bohème, P.A. Simulation of Power System Response To Reactive Power Compensation. – Master's thesis, The University of Tennessee, 2006. November. 263 p.
17. Kostin B.N. *Optimizatsionnye zadachi v elektroenergetike* [Optimization problems in the power industry]. SPb. : SZTU, 2003, 120 p. (In Russian)
18. Karagodin V.V., Ribakov D.V. Optimization of placement of reactive power compensation devices in distribution electrical networks of special facilities. *Izvestiya visschikh uchebnykh zavedeni. Priboroostroenie* [Proceedings of Universities. Instrument engineering]. 2015, no. 10, pp. 823-828 (in Russian).
19. Reizlin V.I. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Textbook. Tomsk : Publishing center of Tomsk Polytechnic University, 2011, 105 p. (In Russian)
20. Kiczkin A.V. Application of a genetic algorithm to optimize the placement of alternative energy sources in the local segment of the active-adaptive network. *Sistemi. Metodi. Tekhnologii.* [Systems. Methods. Technology.]. 2016, no. 1(29), pp. 76-82. (in Russian)
21. Semenova L.A., Ingevatova A.O., Salimov P.M. Analysis of optimization methods in solving problems of selecting installation locations and power of compensating devices. *Universitetski kompleks kak regionalniy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiskoi nauchno-metodicheskoy konferentsii* [University complex as a regional center of education, science and culture: materials of All-Russian scientific conference]. Orenburg : OGU, 2017, pp. 513-516. (in Russian)
22. Delfanti M., Granelli G., Marannino P., Montagna M. Optimal Capacitor. Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms // *IEEE Trans. Power Systems*, 2000, Aug. vol. 15, no. 3.
23. Kremer O.B., Podvalnii S.L. Software implementation of optimization problems solution by genetic algorithm method. *Vestnik VGTU* [Bulletin of VGTU], 2017, pp. 23-24. (in Russian)
24. Semenova L.A., Ingevatova A.O. Optimization of compensating devices placement in electrical network nodes using genetic algorithm. *Dostizheniya vuzovskoy nauki ot teorii k praktike : sbornik materialov Vserossiskoy konferentsii s mezhdunarodnim uchastiem, posvyaschennoy 15-letiyu Kumertauskogo filiala OGU* [Scientific achievements of Universities: from theory to practice: collection of scientific papers of All-Russian conference with foreign participants devoted to 15th anniversary of Kumertau branch of OGU]. Orenburg : Publishing center of OGU, 2018, pp. 141-145. (In Russian)
25. Semenova L.A., Ingevatova A.O., Salimov P.M. On the choice of optimal power and locations of reactive power compensation devices. *Energetika: sostoyaniye, problemy, perspektivy : trudy VIII Vserossiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering: state, problems, prospects: scientific papers of VIII All-Russian scientific and technical conference]. Orenburg : OOO Agency «Press», 2016, pp. 15-19. (In Russian)
26. Certificate of registration of the application program «Genetic algorithm with a fixed search step for the power of compensating devices» / L. Vlatskaya; UFER. No. 1998; publ. 10.25.19.
27. Vlatskaya L.A., Semenova N.G. Development of an algorithm for optimal placement of compensating devices in electrical network nodes using a genetic algorithm. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii»* [Materials of the International scientific conference "State and Prospects of Development of Electrical and Heat power technology"]. Ivanovo : IGEU, 2019, vol. 1, pp. 303-307. (In Russian)
28. Konovalov I.S., Ostapenko S.S., Kobak V.G. Comparison of the efficiency of exact and approximate algorithms for solving the problem of set cover. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Don State Technical University]. 2017, no. 3 (90), vol. 17, pp.137-144. (In Russian)

Влацкая Л.А., Семенова Н.Г. Применение генетических алгоритмов в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 21-28. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-21-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-21-28)

Vlatskaya L.A., Semenova N.G. Application of Genetic Algorithms in ProblemS of Placement Optimization of Compensating Devices. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 21-28. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-21-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-21-28)