

Оптимизация размещения источников питания при формировании рациональной конфигурации системы электроснабжения

СВЕЖЕНЦЕВА О.В., ВОРОПАЙ Н.И.

Рассматривается проблема обоснования развития сложных распределительных систем электроснабжения как иерархия задач, на первом этапе которой решаются задачи выбора рациональной конфигурации системы электроснабжения. Предлагается метод оптимизации размещения источников питания и закрепления за ними потребителей – одной из основных задач первого этапа, с использованием алгоритмов генетического программирования. Приводится пример, в использовании которого выполняется тестирование разработанных алгоритмов. Обсуждаются полученные результаты и формируются задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: системы электроснабжения, конфигурация, размещение источников питания, оптимизация, генетические алгоритмы

Современные системы электроснабжения являются сложными территориально распределенными системами, имеющими неоднородную структуру электрических сетей. Из-за сложности этих систем, многовариантности возможных решений проблема обоснования развития таких систем в виде общей задачи исследования операций является громоздкой и с практической точки зрения трудно разрешимой. С учетом сложности проблемы ее решение целесообразно рассматривать как иерархию задач, поэтапно уточняющих и детализирующих решения по развитию систем электроснабжения [1].

С достаточным основанием рассматриваемая иерархия задач может быть представлена в виде следующих трех этапов.

На *первом этапе* решаются задачи выбора рациональной конфигурации системы электроснабжения, которые в соответствии с [2] включают:

оптимальное размещение источников питания (подстанций, установок распределенной генерации);

оптимальную прокладку линий с учетом ограничений на местности;

оптимальное закрепление потребителей за источниками питания;

оптимальный выбор мощностей источников питания;

оптимальный выбор числа единичных установок источников питания (трансформаторов на под-

Matters concerned with substantiating the development of complex distributed power supply systems is considered as a hierarchy of problems. At the first stage of settling these matters, problems of selecting a rational configuration of the power supply system are solved. A method based on the use of genetic algorithms is proposed for optimizing the placement of power supply sources and assigning certain consumers for them, which is one of the key tasks that have to be solved in the first stage. An example is given using which the developed algorithms are tested. A discussion of the obtained results is presented and the objectives of further investigations are formulated.

Key words: power supply systems, configuration, placement of power supply sources, optimization, genetic algorithms

станциях, агрегатов на электростанциях распределенной генерации).

Оптимизация конфигурации системы электроснабжения обычно выполняется по критерию приведенных затрат при учете тех или иных ограничений для наиболее характерных условий развития системы (например, для годового максимума нагрузки).

На *втором этапе* с учетом найденной рациональной конфигурации системы электроснабжения оптимизируется ее структура с учетом требований по качеству электрической энергии и надежности электроснабжения потребителей. При этом помимо приведенных затрат в качестве дополнительных могут рассматриваться критерии качества электроэнергии и надежности электроснабжения либо они учитываются в общей задаче оптимизации ограничениями, задаваемыми аналитически или с помощью имитационных процедур. Оптимизация структуры системы электроснабжения может выполняться для нескольких представительных сочетаний условий ее развития (например, годовых и суточных максимумов и минимумов нагрузки).

В результате решения задач второго этапа определяется рациональная структура системы электроснабжения в виде размещения, мощности и структуры источников питания, трассировки, марки проводов и параметров линий от источников питания и промежуточных подстанций до потребителей.

На *третьем этапе* осуществляется анализ условий функционирования выбранной структуры системы электроснабжения путем детальных расчетов нормальных, аварийных, послеаварийных и ремонтных режимов, надежности самой системы электроснабжения и надежности электроснабжения потребителей, показателей качества поставляемой потребителям электрической энергии и других.

В статье рассматривается комплексная задача первого этапа — оптимизация размещения источников питания и одновременного закрепления за ними потребителей в системе электроснабжения с учетом ограничений на местности.

В русскоязычной литературе исследования в данной области ограничиваются, как правило, задачей размещения единичного источника питания, при этом задача решается на принципах классической механики — определении «центра тяжести» группы питаемых потребителей [3—6 и др.].

Гораздо более широко представлены методы решения задач по выбору оптимальной конфигурации систем электроснабжения в англоязычных публикациях. В ранних работах для этой цели использовались различные методы математического программирования: алгоритмы линейного программирования [7, 8], метод ветвей и границ [9], метод смешанного целочисленного программирования [10], метод псевдодинамического планирования [11] и др. В более поздних работах для выбора оптимальной конфигурации систем электроснабжения применялись различные эволюционные методы: генетические алгоритмы [12—14], алгоритмы поиска с запретами (tabu search) [15], метод имитации отжига [16], гибридный алгоритм имитации отжига и поиска с запретами [17] и др.

Анализ выполненных разработок в рассматриваемой области позволяет сделать следующие выводы:

во многих случаях общая задача оптимизации размещения многих источников питания и одновременного закрепления за ними потребителей решается как совокупность отдельных подзадач при экспертном их согласовании;

при решении общей сформулированной задачи не учитываются или учитываются приближенно реальные ограничения на местности;

в классической постановке общая задача и ее отдельные составляющие формулируются как комбинаторные задачи, их решение методами математического программирования при многих источниках питания представляет существенную проблему;

эволюционные методы оптимизации при решении рассматриваемой общей задачи показали свою высокую вычислительную эффективность.

С учетом этого в статье для решения сформулированной общей задачи оптимизации размещения многих источников питания и одновременного закрепления за ними потребителей в системе электроснабжения с учетом ограничений на местности развивается метод генетического программирования. Эффективность метода иллюстрируется численным примером.

Общая постановка задачи. Пусть в декартовой системе координат на плоскости задана система точек с координатами $\{x_i, y_i\}$, $i=1, n$, которые соответствуют местам подключения нагрузок. Множество $I=\{1, 2, \dots, n\}$ — множество пунктов подключения (узлов) нагрузок.

Каждый узел нагрузки характеризуется полной потребляемой мощностью S_i . Множество $\{S_i\}$, $i=1, n$ однозначно определяет объем электропотребления в системе электроснабжения. Следовательно, суммарная потребляемая мощность определяется как

$$S_H = \sum_{i=1}^n S_i. \quad (1)$$

Пусть также в декартовой системе координат задана система точек с координатами $\{x_j, y_j\}$, $j=1, m$ возможных мест размещения источников питания, составляющих множество $J=\{1, 2, \dots, m\}$; априори предполагается, что это число m заведомо больше практически необходимого числа мест размещения источников питания. В рассматриваемой постановке считаем, что мощности S_j , $j=1, m$, всех источников питания одинаковы. Очевидно, что для суммарной мощности источников питания должно выполняться следующее неравенство:

$$S_T = \sum_{j=1}^m S_j \geq S_H. \quad (2)$$

С учетом изложенного имеем следующую оптимизационную задачу: требуется выбрать наиболее экономичный вариант размещения источников питания с учетом затрат на доставку электроэнергии потребителям, причем необходимо оптимально выбрать следующие параметры:

места размещения источников питания из предложенных m возможных мест размещения;

для каждой нагрузки определить, за каким источником питания она будет закреплена.

Целевая функция, минимум которой будем находить, может быть представлена в виде:

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Z_{ij} S_i l_{ij}. \quad (3)$$

Здесь предполагается, что затраты на передачу электроэнергии зависят от значения передаваемой мощности S_i и от расстояния l_{ij} от источника питания j до потребителя i ; Z'_{ij} — удельные приведенные затраты для передачи единицы мощности на единицу расстояния.

При этом принимается допущение, что электрическая сеть не ограничивает передачу мощности от источников питания до потребителей.

В дальнейшем задача решается в предположении, что электрическая сеть имеет радиальную структуру, что характерно при эксплуатации многих систем электроснабжения, а также удельные приведенные затраты $Z'_{ij}=1$, т.е. целевая функция принимает вид:

$$\min Z' = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m S_i l_{ij}. \quad (4)$$

При этом расстояние от источника питания до потребителя вычисляется в соответствии с метрикой Евклида, т.е.

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5)$$

с учетом ограничений на местности, которые задаются на размещение источников питания соответствующими координатами запрещенных мест размещения.

Генетический метод оптимизации размещения источников питания. Для любого генетического алгоритма выделяются четыре основных этапа [18, 19 и др.]:

- формирование начальной популяции;
- синтез новых хромосом (операторы скрещивания и мутации);
- целенаправленное изменение вновь полученных хромосом (операторы инверсии);
- селекция текущей популяции.

Первый этап формирования генетического алгоритма для решения рассматриваемой задачи заключается в выборе возможной кодировки решения, т.е. в построении хромосомы определенной длины, каждый ген которой занимает некоторую позицию и также имеет определенную длину. Длина каждого из членов, а также длина всей хромосомы будут напрямую зависеть от множества I и J . Зададимся одним вариантом электроснабжения, т.е. числом L_1 одинаковых источников питания заданного типоразмера, которые покроют полностью потребности потребителей в электрической энергии.

Алгоритм формирования начальной популяции. С помощью хромосом в первую очередь формируется начальная популяция. Для успешной работы генетических алгоритмов важным является определение правил, по которым будет формироваться популяция в начальную эпоху своего существования, т.е. на начальном шаге $t=0$. Основная парадигма, которая будет положена в основу этих правил, заключается в том, что в начальной популяции должен обязательно присутствовать весь генетический материал задачи; в нашем случае в начальной популяции должны обязательно присутствовать в качестве возможных мест размещения источников питания (ИП) все точки из множества $J=\{1, 2, \dots, m\}$.

Приведем общий вид хромосомы, используемой для решения данной задачи:

| | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|-----|-------|-----|
| Значения | 1 | 0 | 0 | ... | 1 | 0 |
| Возможные места размещения ИП | 1 | 2 | 3 | ... | $m-1$ | m |

Число единиц в первой строке должно быть равно числу L_1 . Единица указывает на то, что в данном возможном месте размещен источник питания, нуль — источника питания в этом месте нет. Во второй строке указано, в какой из возможных точек размещен данный источник питания.

Целевая функция инвариантна к стоимости источника питания, так как эта составляющая будет во всех вариантах одинаковой. Хромосома фактически представляет собой допустимое решение рассматриваемой задачи. Значение целевой функции, вычисленное для данной хромосомы, — это стоимость (приведенные затраты) данного варианта электроснабжения.

Для решения конкретной задачи требуется однозначно отобразить конечное множество вариантов на множество строк подходящей длины. Генетический алгоритм за один шаг производит обработку некоторой популяции хромосом H_j^t . Популяция $G(t)$ на шаге t представляет собой конечный набор строк:

$$G(t) = \{H_1^t, H_2^t, \dots, H_j^t, \dots, H_{PR}^t\}, \quad j = \overline{1, PR}, \quad (6)$$

где PR — число особей (хромосом) в популяции, причем хромосомы в популяции не должны повторяться.

Алгоритм операции скрещивания (кроссинговера). Определяющим для работы генетических алгоритмов является наличие эффективной операции скрещивания. В качестве исходных данных имеем начальную популяцию, состоящую из PR хромосом. Выберем вариант размножения в популяции, т.е. случай, когда в создании новой дочерней хромосомы всегда участвуют две хромосомы. Выберем

в качестве варианта отбора родительских хромосом турнирный отбор.

Будем использовать модифицированный оператор скрещивания, позволяющий учитывать специфику данной задачи. Покажем работу указанного оператора на следующем примере: в задаче имеется 10 возможных мест размещения источников питания, для покрытия суммарной мощности потребителей требуется пять ИП. Пусть в результате турнирного отбора выбрано двое родителей:

Хромосома А – первый родитель:

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Значения | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Возможные места размещения ИП | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

Хромосома В – второй родитель:

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Значения | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Возможные места размещения ИП | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

Число единиц в значениях хромосом одинаковое (первые строки хромосом) и равно пяти по числу источников питания, которые необходимо разместить.

Находим точки совпадения в хромосомах родителей (одинаковые гены). В результате получаем точки 1 и 6. Эти точки передаются в хромосомы-потомки без изменения, поскольку генетическая информация, присутствующая в хромосомах обоих родителей, имеет высокую вероятность быть переданной потомкам. Будем предполагать, что эта информация передается с вероятностью 100%.

Сжимаем затем хромосомы родителей до ненулевых элементов в строке «значения» без учета совпадающих генов:

Хромосома А – первый родитель:

| | | | |
|-------------------------------|---|---|----|
| Значения | 1 | 1 | 1 |
| Возможные места размещения ИП | 3 | 9 | 10 |

Хромосома В – второй родитель:

| | | | |
|-------------------------------|---|---|---|
| Значения | 1 | 1 | 1 |
| Возможные места размещения ИП | 4 | 7 | 9 |

Выбираем случайным образом точку разрыва, пусть, например, она будет между первым и вторым генами. Далее, используя классический алгоритм операции скрещивания [16, 17], получаем следующие хромосомы-потомки:

Хромосома С – первый потомок:

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Значения | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Возможные места размещения ИП | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

Хромосома D – второй потомок:

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Значения | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Возможные места размещения ИП | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

Передачей потомкам одинаковых генов достигается эффект передачи им более сильных генов; сжатие хромосом перед операцией скрещивания значительно ее упрощает алгоритмически.

Процедура мутации. Оператор мутации также служит для естественного отбора. Однако вместо комбинирования родительских качеств мутация вносит случайные изменения в одну из хромосом. После каждого скрещивания для каждой из вновь получившихся хромосом формируется «признак мутации»: генерируем случайное число в диапазоне от 0 до 1*, если это число меньше заданного коэффициента мутации, то запускается процедура мутации этой хромосомы. Эта процедура заключается в следующем:

случайным образом определяется ненулевой ген, который должен мутировать;

этот ген заменяется на любой другой ненулевой, выбранный случайным образом из множества $J = \{1, 2, \dots, m\}$.

Оператор инверсии изменяет характер связей между компонентами хромосомы. Этот оператор берет хромосому, случайным образом выбирает в ней две точки разрыва и располагает в обратном порядке элементы, попавшие между точками разрыва.

Оператор селекции формирует новое поколение из хромосом с лучшими значениями целевой функции. Он уничтожает большую часть популяции и освежает генетический материал, пополняя популяцию большим числом новых членов. В результате выполнения оператора селекции размер популяции нового поколения вновь становится равным PR .

При реализации генетического алгоритма в данной постановке приходится многократно выполнять оптимальное закрепление потребителей за источниками питания [20, 21], после которого вычисляется значение целевой функции для данного варианта решения. Эвристический алгоритм оптимального закрепления потребителей за источниками питания описан ниже.

Важным моментом генетического алгоритма является определение критериев его останова. Обычно в качестве таковых применяются либо ограничение на максимальное число шагов функционирования алгоритма, либо определение его сходимости

* Здесь и далее генерация случайного числа в диапазоне от 0 до 1 осуществляется в соответствии с равномерным законом распределения.

путем сравнения приспособленности популяции на нескольких шагах и остановка процесса поиска оптимального решения при стабилизации этого параметра. В рассматриваемой реализации алгоритма использован первый критерий.

Структурная схема изложенной реализации генетического алгоритма представлена на рис. 1.

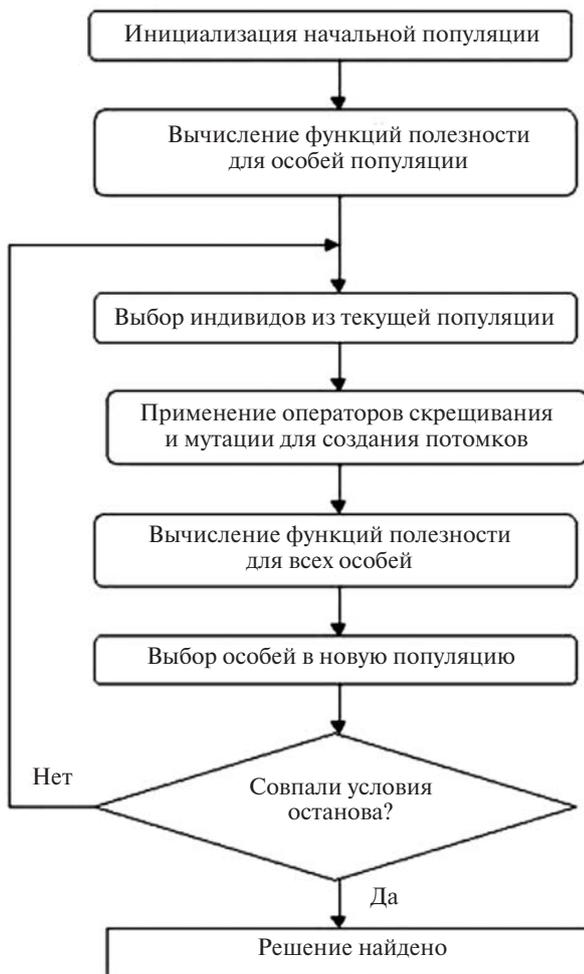


Рис. 1. Структурная схема работы генетического алгоритма

Оптимальное закрепление потребителей за источниками питания. В постановке задачи оптимального закрепления потребителей за источниками питания возникает необходимость учитывать не только мощности отдельных потребителей и источников питания, но и расстояния от источников питания до потребителей с учетом ограничений на местности, так как целевая функция (4) зависит от мощности потребителей (передаваемой к ним мощности) и расстояний до них от источника питания.

Прямой комбинированный перебор для решения данной задачи трудоемок, поэтому реализован

эвристический алгоритм, относящийся к классу «первый подходящий в порядке убывания» [22]. Суть алгоритма заключается в реализации следующих шагов.

1. Упорядочим мощности потребителей в порядке убывания — $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_i \geq S_n$. Также упорядочим мощности источников питания, используемых на данном этапе решения общей комплексной задачи $S^1 \geq S^2 \geq \dots \geq S^i \geq S^m$.

2. Полагаем $i=1$.

3. Закрепляем i -й потребитель за источником питания при одновременном выполнении двух условий: кратчайшего расстояния от потребителя до источника питания с учетом ограничений на местности и суммарная мощность потребителей, закрепленных за источником питания, не превосходит его мощности. Если источников питания, для которых будут выполняться оба эти условия, несколько, то выбираем источник с наименьшей оставшейся неиспользованной потребителями мощностью.

4. Полагаем $i=i+1$. Если $i>n$, то останов в выполнении алгоритма, иначе переход на шаг 3.

Эвристики, использованные при построении алгоритма, следующие:

упорядочением мощностей потребителей достигается эффект «преимущественного закрепления наиболее мощных потребителей», пока не так сильны ограничения по мощности источников питания;

закреплением при прочих равных условиях потребителя за источником питания с наименьшей оставшейся мощностью достигается эффект «наискорейшего закрепления потребителей за источниками с меньшей оставшейся мощностью», так как для этих источников сложнее подобрать комбинации мощностей потребителей для покрытия мощности источника.

Следует подчеркнуть, что точность работы данного эвристического алгоритма достаточно сильно зависит от структуры исходных данных. Так, при мощностях потребителей, на порядок меньших, чем мощности источников питания, алгоритм дает достаточно хорошие результаты. В случае же, когда мощности потребителей соизмеримы с мощностями источников питания, сама возможность решения задачи становится проблематичной, что обусловлено в первую очередь ее дискретностью. Реальные соотношения мощностей потребителей и источников питания близки к первому случаю, и это дает гарантии приемлемого решения задачи, близкого к оптимальному.

Рассмотренные алгоритмы реализованы в среде MATLAB.

Тестирование реализованных алгоритмов. В качестве примера рассматривается задача размещения трех двухтрансформаторных подстанций одинакового типоразмера в системе электроснабжения некоторого района. Исходными данными для решения задачи являются:

- нагрузки заданных 25 потребителей;
- места размещения потребителей;
- мощности трех подстанций;
- возможные места размещения подстанций (10).

Для уверенного тестирования разработанных алгоритмов сформулируем задачу таким образом, чтобы в возможные места размещения подстанций попали точки, определяемые центрами электрических нагрузок [4]. Для этого разобьем все нагрузки на три группы суммарной мощности и для каждой из групп найдем условные центры электрических нагрузок по формулам:

$$x^k = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} x_i S_i}{\sum_{i=1}^{n_k} S_i}; y^k = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} y_i S_i}{\sum_{i=1}^{n_k} S_i}, \quad (7)$$

где n – число нагрузок в группе k ; x^k, y^k – координаты условного центра электрических нагрузок группы k ; в нашем случае $k = \{1, 2, 3\}$.

В табл. 1 представлены данные для расчета координат соответствующих центров электрических нагрузок.

Расчеты по формулам (7) дают следующие координаты центров электрических нагрузок: $x^{(1)} = 133,4$ м; $y^{(1)} = 137,8$ м; $x^{(2)} = 478,4$ м; $y^{(2)} = 416,3$ м; $x^{(3)} = 681$ м; $y^{(3)} = 190,1$ м.

Зная места расположения нагрузок, а также места размещения центров электрических нагрузок, легко подсчитать значения минимума целевой функции по формуле (4): $Z^{(1)} = 99680$; $Z^{(2)} = 96158$; $Z^{(3)} = 87408$; $Z = Z^{(1)} + Z^{(2)} + Z^{(3)} = 283246$.

Зададим возможные места расположения трансформаторных подстанций каждая мощностью 1150 кВА (см. табл. 2).

Для расчетов задаются следующие параметры генетического алгоритма: число особей в начальной популяции – 500, число шагов – 100.

В качестве результата получаем минимальное значение целевой функции, равное 283250. График изменения целевой функции показан на рис. 2. Оптимальные места расположения соответствуют центрам электрических нагрузок. Конфигурация радиальной распределительной электрической сети, связывающей трансформаторные подстанции с закрепленными за ними потребителями, показана на рис. 3.

Таблица 1

| Номер нагрузки | Данные для расчета координат центра | | |
|--------------------------|-------------------------------------|------|--------|
| | х, м | у, м | S, кВА |
| Электрических нагрузок 1 | | | |
| 1 | 30 | 120 | 100 |
| 2 | 90 | 30 | 120 |
| 3 | 150 | 150 | 100 |
| 4 | 90 | 180 | 123 |
| 5 | 30 | 210 | 145 |
| 6 | 210 | 60 | 170 |
| 7 | 240 | 120 | 100 |
| 8 | 240 | 180 | 50 |
| 9 | 180 | 240 | 67 |
| 19 | 150 | 270 | 20 |
| Электрических нагрузок 2 | | | |
| 11 | 420 | 450 | 150 |
| 12 | 450 | 510 | 220 |
| 13 | 540 | 450 | 212 |
| 14 | 600 | 330 | 130 |
| 15 | 420 | 330 | 190 |
| 16 | 420 | 390 | 100 |
| 17 | 510 | 390 | 98 |
| Электрических нагрузок 3 | | | |
| 18 | 660 | 270 | 104 |
| 19 | 600 | 210 | 217 |
| 20 | 780 | 270 | 123 |
| 21 | 690 | 180 | 314 |
| 22 | 660 | 120 | 89 |
| 23 | 780 | 120 | 67 |
| 24 | 810 | 210 | 86 |
| 25 | 570 | 90 | 100 |

Таблица 2

| Номер подстанции | Координаты возможных мест размещения трансформаторных подстанций | |
|------------------|--|-------|
| | х, м | у, м |
| 1 | 133,4 | 137,8 |
| 2 | 478,4 | 416,3 |
| 3 | 681 | 190,1 |
| 4 | 150 | 210 |
| 5 | 240 | 240 |
| 6 | 450 | 360 |
| 7 | 480 | 330 |
| 8 | 690 | 150 |
| 9 | 750 | 180 |
| 10 | 745 | 175 |

Обсуждение результатов. Для рассмотренного примера получены в общем-то очевидные результаты, поскольку пример был подобран с единственной целью демонстрации работоспособности раз-

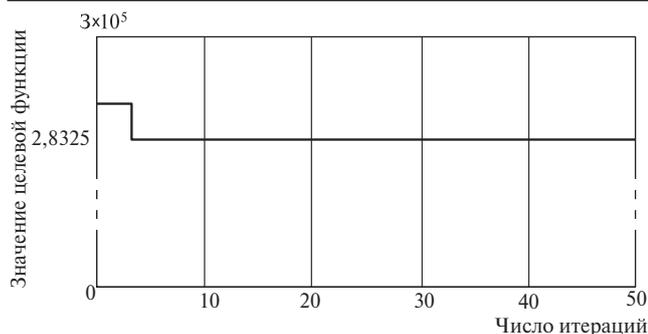


Рис. 2. График изменения целевой функции

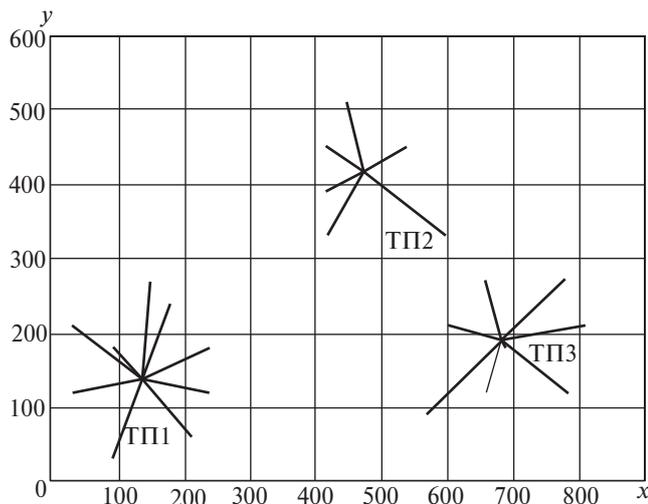


Рис. 3. Оптимальное закрепление потребителей

работанных алгоритмов. В этом плане и центры электрических нагрузок, и закрепленные за подстанциями потребители получались достаточно однозначными.

В реальных существенно более сложных условиях ситуация может оказаться не столь очевидной. Вариант центров электрических нагрузок, определяемых в соответствии с методикой [4], может оказаться не единственным, и выбирать из нескольких вариантов наиболее рациональный экспертно не представляется возможным. Разработанные алгоритмы позволяют сделать такой выбор.

В рассматриваемом примере для наглядности иллюстрации результатов не учитывались ограничения на местности для прокладки линий. При учете таких ограничений простота определения центров электрических нагрузок становится не столь очевидной и рассмотренная в статье формализация задачи приобретает более серьезные преимущества по сравнению с традиционной методикой.

Вообще говоря, в сложных случаях с учетом ограничений на местности на расположение трансформаторных подстанций, а также с учетом ограничений по трассировке питающих эти подстанции линий более высокого уровня напряжения про-

странство для размещения трансформаторных подстанций системы электроснабжения реально может оказаться существенно ограниченным, некоторые точки размещения подстанций могут оказаться заведомо однозначно фиксированными по тем или иным причинам. Учитывая отсутствие ограничений в алгоритме на число возможных мест размещения подстанций, можно заполнить возможными точками расположения подстанций указанное ограничение пространства достаточно плотно, и тогда алгоритм дает очевидное оптимальное решение.

В реализованном варианте алгоритм размещения источников питания в системе электроснабжения основывается на однозначно заданных значениях нагрузок в узлах потребления. Реально значения нагрузок различны в разные моменты времени в течение суток, недели, сезона, года. С учетом этих различий оптимальные решения для каждого из рассмотренных моментов времени будут разными. В этих условиях можно рекомендовать известный из проектной практики подход, при котором рассматриваются характерные точки графиков нагрузки, например, годовой максимум рабочего дня, ночной минимум нагрузки в период годового максимума, летний минимум нагрузки и т.д. Выбор из получаемых различных оптимальных координат размещения источников питания может осуществляться экспертом с учетом дополнительных соображений, не отраженных в алгоритмах.

Гораздо более серьезной проблемой является неопределенность значений нагрузок потребителей на перспективу. Известный распространенный подход, рассматривающий несколько сценариев электропотребления в зоне неопределенности, переводит решение задачи на те же принципы, которые рассматривались в предыдущем случае характерных точек графиков нагрузки с окончательным выбором решений на экспертном уровне. Тем не менее, формализованный учет неопределенности значений нагрузок в узлах потребления остается актуальной задачей дальнейших исследований.

Закключение. Трудоемкость проблемы обоснования развития сложных территориально протяженных систем электроснабжения предопределяет целесообразность иерархического ее рассмотрения в виде последовательности этапов, каждый следующий из которых уточняет и детализирует решения, полученные на предыдущем этапе. Решаемые на первом этапе задачи выбора рациональной конфигурации системы электроснабжения дают вполне определенное представление о структуре системы. Основной задачей этого этапа является оптимизация размещения источников питания с закреплением за ними потребителей, что однозначно определяет конфигурацию радиальной распределитель-

ной сети. Представленные в статье алгоритмы на базе генетического программирования дают эффективный инструмент для решения указанной задачи, что подтверждают результаты тестирования этих алгоритмов, приведенные в статье. Задачей дальнейших исследований в рассматриваемом направлении является формализованный учет неопределенности значений нагрузок в узлах потребления электроэнергии на перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воропай Н.И.** Иерархическое моделирование при обосновании развития электроэнергетических систем. — Exponenta Pro. Математика в приложениях, 2003, № 4.
2. **Khator S.K.** Power distribution planning: A review of models and issues. — IEEE Trans. Power Systems, 1997, vol. 12, № 4.
3. **Козлов В.А., Билик Н.И., Файбисович Д.Л.** Справочник по проектированию электроснабжения городов. — Л.: Энергия, 1986.
4. **Кудрин Б.И.** Электроснабжение промышленных предприятий. — М.: Интермент Инжиниринг, 2006.
5. **Ополева Г.Н.** Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник (учебное пос.). — М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2006.
6. **Фадеева Г.А., Федин В.Т.** Проектирование распределительных электрических сетей. — Минск: Вышэйшая школа, 2009.
7. **Masud E.** An iterative procedure for sizing and timing distribution substations using optimization techniques. — IEEE PES Winter Meeting, New York (USA), 23—27 January 1974.
8. **Crawford D.M., Holt S.B.** A mathematical optimization technique for locating and siting distribution substations, and deriving their optimal service. — IEEE Trans. Power Appar. and Systems, 1975, vol. 94, № 3.
9. **Thomson G.L., Wall D.L.** A branch and bound model for choosing optimal substation locations. — IEEE Trans. Power Appar. and Systems, 1981, vol. 100, № 5.
10. **Adams R.N., Laughton M.A.** Optimal planning of power network using mixed integer programming. — Proc. of Inst. Elec. Eng., 1974, vol. 121, № 2.
11. **Ramires-Rosado I.J., Gonen T.** Pseudo-dynamic planning for expansion of power distribution systems. — IEEE Trans. Power Systems, 1991, vol. 6, № 1.
12. **Miranda V., Ranito J.V., Proenca L.M.** Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning. — IEEE Trans. Power Systems, 1994, vol. 9, № 4.
13. **Ramirez-Rosado I.J., Bernal-Agustin J.** Genetic algorithms applied the design of large power distribution systems. — IEEE Trans. Power Systems, 1994, vol. 13, № 2.
14. **Diaz-Dorado E., Cidras J., Migue E.** Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of medium voltage. — IEEE Trans. Power Systems, 2002, vol. 17, № 3.
15. **Ramirez-Rosado I.J., Dominguez-Navarro J.A.** New multi objective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of distribution systems. — IEEE Trans. Power Systems, 2006, vol. 21, № 1.
16. **Sepasian M.N., Seifi H., Foroud A.A. et al.** A new approach for substation expansion planning. — IEEE Trans. Power Systems, 2006, vol. 21, № 2.
17. **Sedghi M., Aliakbar-Golkar M.** Distribution network expansion using hybrid SA/TS algorithm. — Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, 2009, vol. 5, № 2.
18. **Букатова И.Л.** Эволюционное моделирование и его приложения. — М.: Наука, 1991.
19. **Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М.** Теория и практика эволюционного моделирования. — М.: Физматлит, 2003.
20. **Свеженцева О.В.** Формализация задачи закрепления множества потребителей за источниками питания. — Всероссийская науч.-практ. конф. «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». — Иркутск: ИрГТУ, 2007.
21. **Свеженцева О.В.** Эвристические алгоритмы оптимального закрепления множества потребителей за источниками питания. — Всероссийская науч.-практ. конф. «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». — Иркутск: ИрГТУ, 2007.
22. **Новиков Ф.А.** Дискретная математика для программистов. — СПб: Питер, 2004.

[01.03.12]

Авторы: Свеженцева Ольга Владимировна окончила в 1977 г. математический факультет Иркутского государственного университета. Старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (НИ ИрГТУ).

Воропай Николай Иванович окончил в 1966 г. электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. Член-корреспондент РАН. Директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН и заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники НИ ИрГТУ.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ и ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.
Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы
можно приобрести в редакции журнала:
111250 Москва, Красноказарменная ул., 14
(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).