

Негадаев Владислав Александрович, канд. техн. наук, доцент

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: NegadaevVA@kuzstu.ru

ПОСТРОЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

***Аннотация:** Основой достижения высокого качества электроэнергии являются три составляющие: производство электроэнергии высокого качества, бесперебойная передача и распределение по надежным сетям. При значительной протяженности кабельной сети необходимы алгоритмы построения сети электроснабжения. В настоящей статье изложен подход, основанный на применении алгоритма Дейкстры, а также получены выражения, описывающие оптимизацию распределительной сети электроснабжения с помощью генетического алгоритма, применение которого позволит сократить затраты при построении распределительной сети.*

***Ключевые слова:** сеть электроснабжения, электродвигательная нагрузка, генетический алгоритм, оптимизация, распределение электроэнергии, smart grid, модель, магистральная структура, произвольная структура.*

***Информация о статье:** принята 01 октября 2019 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-4-56-62*

1. Введение

Мощности двигателей, которые используются в электроприводах горных машин добычных участков угольных шахт, соизмеримы друг с другом. Наличие длинных гибких кабелей приводит к тому, что работа одних двигателей существенно влияет на состояние остальных. Развитие горных и промышленных предприятий обычно связано с модернизацией технологического оборудования, и в этих условиях нужно оптимизировать схемы электроснабжения. В сетях, нагрузкой которых являются электродвигатели (как правило, асинхронные с короткозамкнутым ротором), устойчивость работы электропривода зависит не только от механических характеристик двигателя и нагрузки, но и от параметров элементов сети, в частности, от ее конфигурации. При определенной конфигурации сети может возникнуть такая ситуация, когда снижение напряжения на статоре двигателя приведет к значительному снижению его пускового момента. Также от конфигурации сети электроснабжения изменяются потери энергии в кабелях, поэтому уменьшение потери напряжения и минимизация потерь энергии могут быть достигнуты путем выбора рациональной конфигурации сети электроснабжения.

На сегодняшний день проблема потерь электроэнергии в распределительных сетях с электродвигательной нагрузкой остается открытой, несмотря на многочисленные исследования в этой области. Существует много алгоритмов, которые путем оптимизации повышают эффективность и надежность распределительных сетей электроснабжения горных и промышленных предприятий. Например, в [1-8] оптимизируются эксплуатационные режимы работы электрооборудования с помощью перестроения структуры системы электроснабжения с учетом

параметров и характеристик, регулируя напряжение и реактивную мощность. Вопросам построения активно-адаптивных сетей и Smart Grid с использованием нейронных сетей и генетического алгоритма отводится большое место в работах [9-12]. Такие сети должны быть гибкими и экономичными, иметь возможность изменять топологические параметры.

На пути реализации концепции Smart Grid автором были разработаны модели сети электроснабжения магистральной и произвольной структур, питающих асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором [13-14]. На основе этих моделей опишем конфигурирование магистральной и произвольной структур сети электроснабжения с электродвигательной нагрузкой. Полученное описание удобно в использовании при оптимизации конфигурации сети с помощью генетического алгоритма.

2. Построение распределительной сети

Для обеспечения необходимого уровня напряжения на двигателях и для сокращения потерь энергии при эксплуатации опишем подход при построении распределительной сети. Для этого на первом этапе при формировании начальной конфигурации сети электроснабжения применим алгоритм Дейкстры, который определяет наименьшее расстояние от одной вершины графа до остальных вершин. На втором этапе при оптимизации сети используем генетический алгоритм, представленный ниже.

В соответствии с алгоритмом Дейкстры осуществим поиск минимума веса пути от трансформатора (корневого узла) до соответствующих электродвигателей (узлы сети). На рис. 1 показана схема расположения электрооборудования с учетом топологии местности. На схеме видно, по каким путям можно проложить кабель от трансформатора до двигателей.

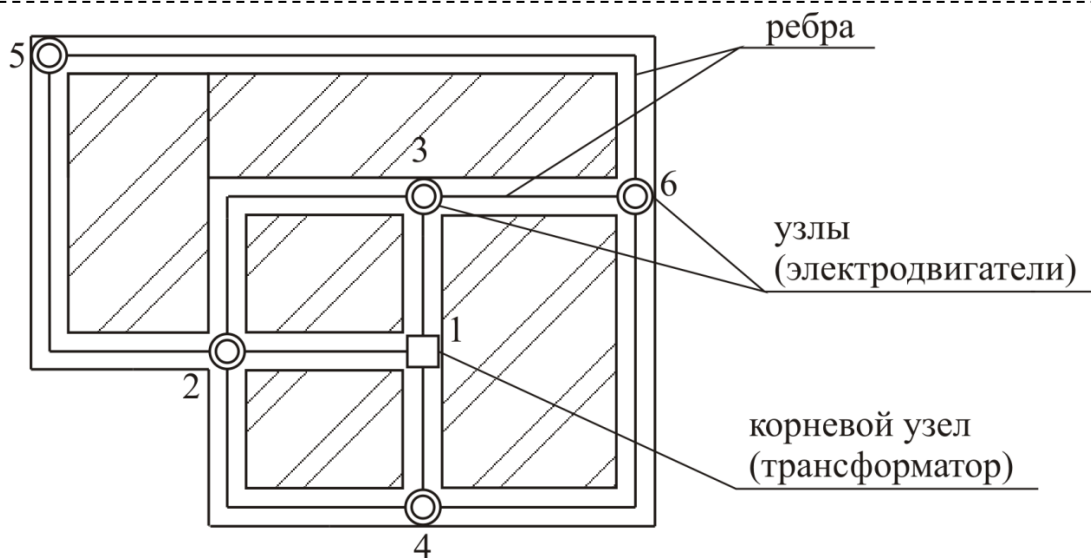


Рис. 1. Схема расположения электрооборудования
Fig. 1. The layout of electrical equipment

Каждый путь начинается в корневом узле и имеет свой вес, определяющий целевую функцию. Критерием оптимизации будем считать наименьший вес пути из корневого узла в соответствующий узел сети.

Для графа на рис. 2, который составлен по рис. 1, разберем пример определения наименьших путей от вершины 1 (трансформатор) до вершин 2-6 (электродвигатели).

На первой стадии записывается матрица весов ребер, представленная в виде таблицы 1. Вес ребра – это длина дуги графа.

На второй стадии работы алгоритма на каждом шаге от корневого узла до других узлов находятся пути с минимальным весом.

Задаемся начальными условиями: $d(1) = 0, d(x) = \infty$.

Включаем вершину 1 в текущее дерево: $y = 1$.

Определяем ближайшую к вершине 1 вершину по формуле:

$$d(x) = \min\{d(x); d(y) + a(y, x)\}.$$

$$d(2) = \min\{d(2); d(1) + a(1, 2)\} = \min\{\infty; 0 + 10\} = 10;$$

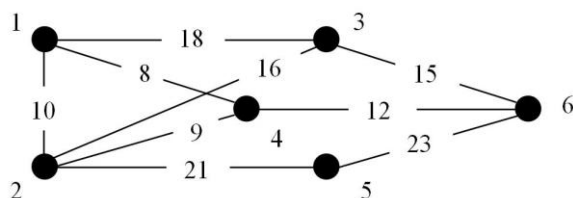


Рис. 2. Исходный граф
Fig. 2. Source graph

$$d(3) = \min\{d(3); d(1) + a(1, 3)\} = \min\{\infty; 0 + 18\} = 18;$$

$$d(4) = \min\{d(4); d(1) + a(1, 4)\} = \min\{\infty; 0 + 8\} = 8;$$

$$d(5) = \min\{d(5); d(1) + a(1, 5)\} = \min\{\infty; 0 + \infty\} = \infty;$$

$$d(6) = \min\{d(6); d(1) + a(1, 6)\} = \min\{\infty; 0 + \infty\} = \infty.$$

Путь до вершины 4 от вершины 1 имеет минимальную длину: $d(4) = 8$. Поэтому в текущее дерево включаем вершину 4 вместе с дугой, ведущей к этой вершине. Это дуга (1, 4).

$$d(2) = \min\{d(2); d(4) + a(4, 2)\} = \min\{10; 8 + 9\} = 10;$$

$$d(3) = \min\{d(3); d(4) + a(4, 3)\} = \min\{18; 8 + \infty\} = 18;$$

$$d(5) = \min\{d(5); d(4) + a(4, 5)\} = \min\{\infty; 8 + \infty\} = \infty;$$

$$d(6) = \min\{d(6); d(4) + a(4, 6)\} = \min\{\infty; 8 + 12\} = 20.$$

Путь до вершины 2 от вершины 1 имеет минимальную длину: $d(2) = 10$. Поэтому в текущее дерево включаем вершину 2 вместе с дугой, ведущей к этой вершине. Это дуга (1, 2).

$$d(3) = \min\{d(3); d(2) + a(2, 3)\} = \min\{18; 10 + 16\} = 18;$$

$$d(5) = \min\{d(5); d(2) + a(2, 5)\} = \min\{\infty; 10 + 21\} = 31;$$

$$d(6) = \min\{d(6); d(2) + a(2, 6)\} = \min\{20; 10 + \infty\} = 20.$$

Путь до вершины 3 от вершины 1 имеет минимальную длину: $d(3) = 18$. Поэтому в текущее дерево включаем вершину 3 вместе с дугой, ведущей к этой вершине. Это дуга (1, 3).

$$d(5) = \min\{d(5); d(3) + a(3, 5)\} = \min\{31; 18 + \infty\} = 31;$$

$$d(6) = \min\{d(6); d(3) + a(3, 6)\} \\ = \min\{20; 18 + 15\} = 20.$$

Путь до вершины 6 от вершины 1 имеет мини-

Таблица 1. Матрица весов ребер
Table 1. The matrix of weights of the ribs

∞	10	18	8	∞	∞
10	∞	16	9	21	∞
18	16	∞	∞	∞	15
8	9	∞	∞	∞	12
∞	21	∞	∞	∞	23
∞	∞	15	12	23	∞

мальную длину: $d(6) = 20$. Поэтому в текущее дерево включаем вершину 6 вместе с дугой, ведущей к этой вершине. Это дуга (4, 6).

$$d(5) = \min\{d(5); d(6) + a(6, 5)\} \\ = \min\{31; 20 + 23\} = 31.$$

Путь до вершины 5 от вершины 1 имеет минимальную длину: $d(5) = 31$. Поэтому в текущее дерево включаем вершину 5 вместе с дугой, ведущей к этой вершине. Это дуга (2, 5).

Таким образом, мы сформировали для исходного графа дерево кратчайших путей из вершины 1:

- $d(2) = 10$: путь 1-2;
- $d(3) = 18$: путь 1-3;
- $d(4) = 8$: путь 1-4;
- $d(5) = 31$: путь 1-2-5;
- $d(6) = 20$: путь 1-4-6.

На рис. 3. изображен итоговый граф.

В итоге работы алгоритма формируется оптимальная структура сети электроснабжения с наименьшими длинами кабеля от трансформатора до двигателей с учетом топологии местности.

3. Магистральная структура сети электроснабжения

При магистральной структуре сети электроснабжения результатом поиска ее рациональной конфигурации с помощью генетического алгоритма является набор чисел (x_1, \dots, x_n) , где n – число двигателей в системе. Каждое число обозначает длину магистрального кабеля от трансформатора до точки присоединения гибкого кабеля соответствующего двигателя к магистральному кабелю. Топология

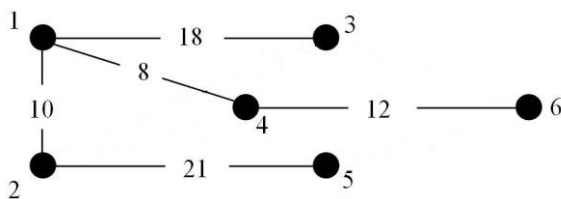


Рис. 3. Итоговый граф
Fig. 3. Summary graph

местности, места нахождения и параметры работы трансформатора и двигателей считаются заданными.

На первом этапе работы генетического алгоритма формируется популяция (m начальных решений): $(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$, $(x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$, $(x_1^m, x_2^m, \dots, x_n^m)$. Затем происходит переход от вектора параметров (x_1, \dots, x_n) , к вектору с целочисленными компонентами, и далее, используя код Грея, мы переходим к двоичному алфавиту: (s_1, s_2, \dots, s_n) . Путем конкатенации строк s_1, s_2, \dots, s_n образуются m битовых строк S (хромосом) с числом $l = n\theta$ генов в каждой хромосоме, где θ – одинаковая для всех строк s длина. Хромосома является одной из конфигураций сети.

Чтобы вычислить ценность каждой строки S , задаем неотрицательную функцию $F(S)$, которая будет определять показатель качества (ценность строки S) с учетом критерия оптимальности. Популяция $G(t)$ на шаге t является совокупностью строк $G(t) = (S_1^t, S_2^t, \dots, S_m^t)$.

При работе генетического алгоритма на этапе воспроизводства на шаге t происходит выбор km строк популяции $G(t)$, где k – коэффициент новизны. Вероятность выбора строки S_j^t пропорциональна ее ценности:

$$p_b(S_j^t) = \frac{F(S_j^t)}{\sum_{k=1}^m F(S_k^t)}.$$

Выбранные строки S_i^t и S_j^t ($i, j = \overline{1, m}$) случайно распределяются по парам (родители). Затем каждая пара подвергается скрещиванию с заданной вероятностью p_c , в процессе которого случайно выбирается позиция разделителя d ($d = 1, 2, \dots, l - 1$, где l – длина строки S). d первых элементов первой строки замещают соответствующие элементы второй строки и наоборот. Формирование новых строк (потомков) показано на рис. 4.

При работе генетического алгоритма на этапе мутации происходит случайное изменение значений элементов строки S . Каждый бит строки α_i ($i = \overline{1, l}$) с заданной вероятностью мутации p_m мутирует, то есть изменяет свое значение с нуля на единицу или с единицы на нуль. Процесс мутации показан на рис. 5.

В итоге образуется km новых строк, полностью формирующих новую популяцию $G(t + 1)$ при $k = 1$ или составляющих часть популяции $G(t + 1)$ при $k < 1$.

На этом завершается формирование нового поколения. Если в составе нового поколения нет решения, достаточно близкого к оптимальному решению (рациональной конфигурации), то вышеописанные этапы повторяются до выполнения условия останова работы алгоритма (определенное число поколений или неизменность лучшего решения в течение заданного числа поколений).

4. Произвольная структура сети электроснабжения

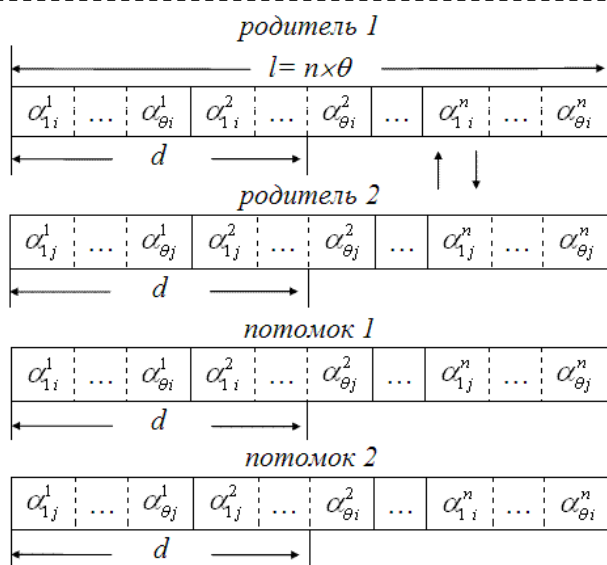


Рис. 4. Процесс скрещивания
Fig. 4. Crossing process

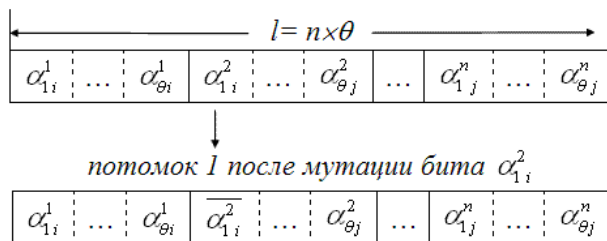


Рис. 5. Процесс мутации
Fig. 5. The mutation process

Произвольная структура сети электроснабжения показана на рис. 6. В данной структуре нумеруются двигатели сверху вниз и слева направо таким образом, чтобы от трансформатора до N -го двигателя было самое большое число отрезков кабеля. Далее определяем параметры полученной структуры: s – число уровней; f_1 – число отрезков кабеля 1-го уровня, $f_1 = s$; c – число узлов кабеля 1-го уровня, $c = f_1 - 1$; N – число двигателей, $N = 2^c$; j, k, l – номер двигателя, $j, k, l \in [1; N]$.

Двигатель 1-го уровня подключен к трансформатору. Двигатель 2-го уровня подключен к кабелю 1-го уровня. Двигатель 3-го уровня подключен к кабелю 2-го уровня и так далее. Число узлов кабеля 2-го уровня – не более $f_1 - 2$, число узлов кабеля 3-го уровня – не более $f_1 - 3$ и так далее.

При описании данной структуры в терминах теории генетического алгоритма значением гена является длина отрезка кабеля между узлами. Кабель, отходящий от трансформатора, считаем геном, а кабель, отходящий от двигателя, геном не считаем. При поиске рациональных длин кабелей значение генов изменяется в заданном топологией диапазоне. Число генов равно $N - 1$.

Гены одного уровня образуют хромосому. Число генов в единственной хромосоме 1-го уровня равно c . Число генов в хромосоме 2-го уровня – и не более

$c - 1$. Число генов в хромосоме i -го уровня не превышает $c - i + 1$. Общее число хромосом равно $\frac{N}{2}$.

Особь объединяет в себе все хромосомы и представляет собой конфигурацию сети электроснабжения.

Общая формула для определения числа генов в особи:

$$G = c + \sum_{i_1=c-1}^1 i_1 + \sum_{i_1=c-2}^1 \sum_{i_2=i_1}^1 i_2 + \sum_{i_1=c-3}^1 \sum_{i_2=i_1}^1 \sum_{i_3=i_2}^1 i_3 + \dots + \sum_{i_1=c-n}^1 \sum_{i_2=i_1}^1 \sum_{i_3=i_2}^1 \dots \sum_{i_n=i_{n-1}}^1 i_n + \dots + \sum_{i_1=2}^1 \sum_{i_2=i_1}^1 \sum_{i_3=i_2}^1 \dots \sum_{i_{c-2}=i_{c-3}}^1 i_{c-2}.$$

В данной формуле каждое слагаемое является числом генов на соответствующем уровне: в 1-ом слагаемом отражено число генов на 1-ом уровне, во 2-ом слагаемом – на 2-ом уровне и так далее.

Детализируем слагаемые в вышепредставленной формуле:

$$G = (c) + (c - 1) + (c - 2) + \dots + (1) + (c - 2) + (c - 3) + \dots + (1) \dots$$

В данной формуле каждое значение в скобках является числом генов в соответствующей хромосоме: в 1-ой скобке отражено число генов в хромосоме 1-го уровня, во 2-ой скобке – число генов в 1-ой сверху хромосоме 2-го уровня, в 3-ей скобке – число генов во 2-ой сверху хромосоме 2-го уровня и так далее.

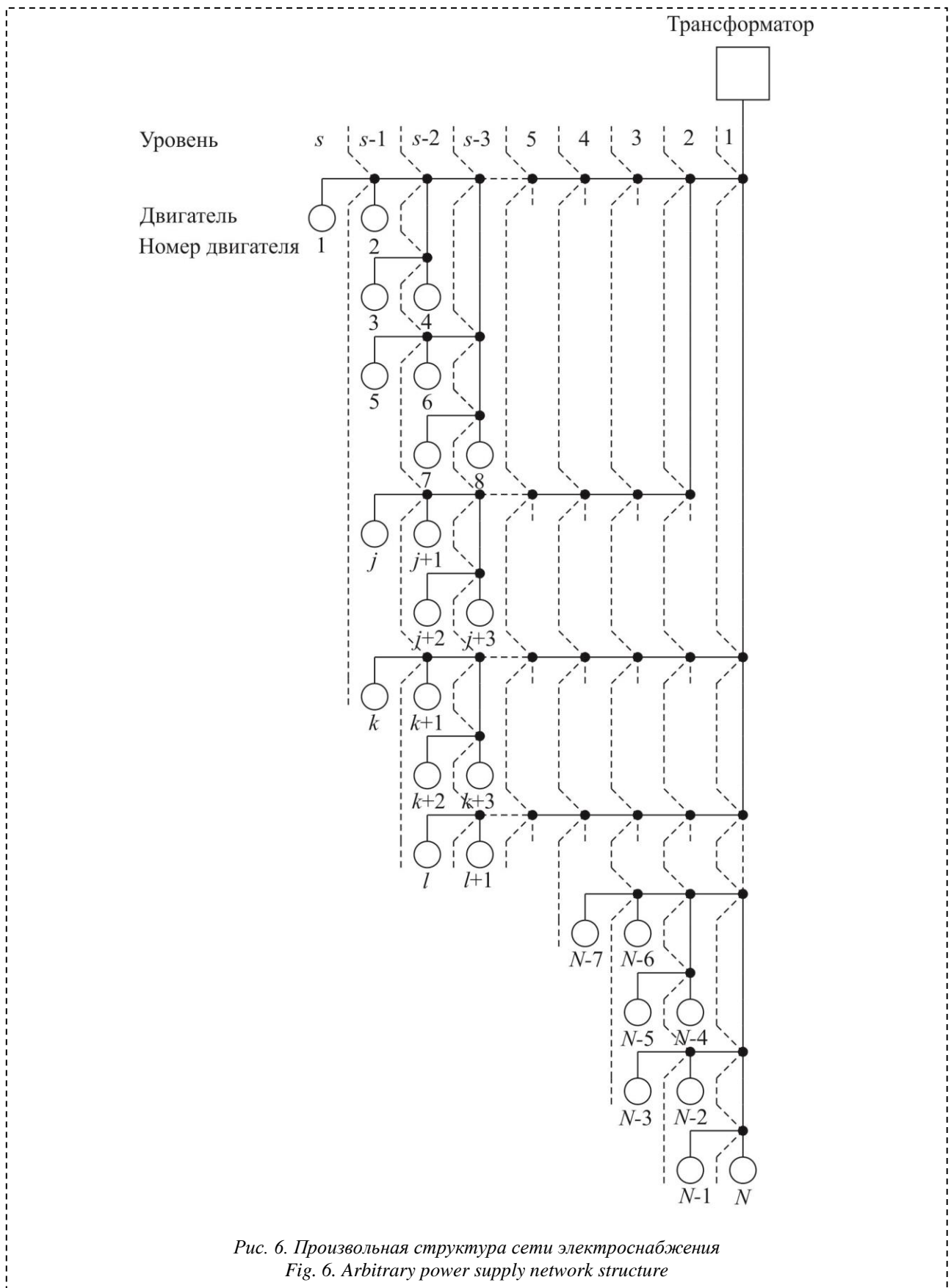
Структура особи представлена в таблицах 2 и 3, где совокупность элементов последней строки образует конфигурацию сети электроснабжения (особь).

5. Выводы

1. На первой стадии поиска рациональной конфигурации распределительной сети электроснабжения целесообразно применять алгоритм Дейкстры.
2. В дальнейшем для определения количественных параметров сети электроснабжения магистральной или произвольной структуры можно использовать генетический алгоритм.
3. Полученные выше формулы описания сети электроснабжения с использованием генетического алгоритма могут быть положены в основу программного средства, позволяющего находить рациональные конфигурации распределительной сети электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баламетов А.Б. Исследование решения задачи оптимизации режимов электрических сетей по



напряжению и реактивной мощности методом последовательной линеаризации и линейного программирования / А.Б. Баламетов, Г.С. Мусаханова, Э.Д. Халилов // Электричество. – 2003. – №3.

2. Тимчук С.А. Оптимизация системы электроснабжения промышленного предприятия при ее

реконструкции / С.А. Тимчук, Н.С. Деренько // Восточно-европейский журнал передовых технологий, том 4. – 2013. – №8.

3. Артюхов И.И. Перестраиваемая по структуре автономная система электроснабжения технологического комплекса с многодвигательным

электроприводом / И.И. Артюхов, И.И. Аршакян, А.В. Коротков, Н.В. Погодин, С.Ф. Степанов // Вестник СГТУ. – 2006. – №1. с. 20-28.

4. Хохлов Д.Ю. Автономная система электропитания с перестраиваемой структурой, основанная на совместном применении альтернативных и традиционных источников энергии / Д.Ю. Хохлов, К.А. Набатов // Вестник ТГТУ. – 2012. – №2. – с. 458-466.

5. Куро Ж. Современные технологии повышения качества электроэнергетики при ее передаче и распределении // Новости электротехники. – 2005. – №1.

6. Садков Е.В. Оптимизация структуры системы электроснабжения промышленного предприятия за счет комплексного учета параметров и характеристик ее элементов // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2006. – №3. – с. 6-10.

7. Каратеев П.Ю. Оценка эффективности использования и распределения электрической энергии в системе электроснабжения промышленного предприятия // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – №12-2. – с. 103-106.

8. Ерхан Ф.М. Принципы разработки алгоритмов оптимизации функциональной надежности распределительных систем с учетом влияния вероятностных факторов / Ф.М. Ерхан, Д.А. Войнеско, И.Н.

Лупушор, Р.Г. Банташ // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – №2. – с. 40-50.

9. Ледин С.С. Интеллектуальные сети Smart Grid – будущее российской энергетики // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – №11.

10. Дорофеев В.В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России / В.В. Дорофеев, А.А. Макаров // Энергоэксперт. – 2009. – №4.

11. Воронов И.В. Повышение эффективности эксплуатации систем электроснабжения предприятий путем комплексного использования Smart Grid и нейронных сетей / И.В. Воронов, Е.А. Политов // Вестник КузГТУ. – 2012. – №2. – с. 63-66.

12. Дабаров В.В. Применение генетического алгоритма для оптимизации параметров устройств компенсации реактивной мощности // Вестник КузГТУ. – 2012. – №3. – с. 145-147.

13. Негадаев В.А. Модель магистральной структуры электроснабжения для исследования режимов работы совокупности асинхронных двигателей // Вестн. КузГТУ. – 2009. – №1. – с. 36-43.

14. Негадаев В.А. Модель сети электроснабжения произвольной структуры, питающей асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором // Известия ТПУ. – 2012. – №4. – с. 47-51.

Vladislav A. Negadaev, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russia

CONSTRUCTION AND OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION POWER SUPPLY NETWORKS

Abstract: Three components are the basis for achieving high-quality electric power: high-quality electric power production, uninterrupted transmission and distribution over reliable networks. With a significant length of the cable network, algorithms for constructing a power supply network are necessary. This article outlines an approach based on the application of the Dijkstra algorithm, and also obtains expressions describing the optimization of the distribution network using the genetic algorithm, the use of which will reduce costs in the construction of the distribution network.

Keywords: power supply network, electric motor load, genetic algorithm, optimization, power distribution, smart grid, model, trunk structure, arbitrary structure.

Article info: received October 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-3-56-62

REFERENCES

1. Balametov A.B. Issledovaniye resheniya zadachi optimizatsii rezhimov elektricheskikh setey po napryazheniyu i reaktivnoy moshchnosti metodom posledovatel'noy line-arizatsii i lineynogo programmirovaniya [Investigation of the solution of the problem of optimizing the behavior of electric networks by voltage and reactive power using the method of sequential linearization and linear programming] / A.B. Balametov, G.S. Musakhanova, E.D. Khalilov // Elektrichestvo. – 2003. – №3. (rus)

2. Timchuk S.A. Optimizatsiya sistemy elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya pri yeye

rekonstruksii [Optimization of the power supply system of an industrial enterprise when it is being reconstructed] / S.A. Timchuk, N.S. Deren'ko // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, tom 4. – 2013. – №8. (rus)

3. Artyukhov I.I. Perestraivayemaya po strukture avtonomnaya sistema elektrosnabzheniya tekhnologicheskogo kompleksa s mnogodvigatel'nym elektroprivodom [The autonomous system of power supply of a technological complex with a multi-motor electric motor, which is being reconstructed in structure] / I.I. Artyukhov, I.I. Arshakyan, A.V. Kоротков, N.V.

Pogodin, S.F. Stepanov // Vestnik SGTU. – 2006. – №1. s. 20-28. (rus)

4. Khokhlov D.Yu. Avtonomnaya sistema elektrosnabzheniya s perestraivayemoy strukturoy, osnovannaya na sovmestnom primenenii al'ternativnykh i traditsionnykh istochnikov energii [Autonomous system of electricity supply with a rebuilt structure, based on the joint use of alternative and traditional energy sources] / D.Yu. Khokhlov, K.A. Nabatov // Vestnik TGTU. – 2012. – №2. – s. 458-466. (rus)

5. Kuro Zh. Sovremennyye tekhnologii povysheniya kachestva elektroenergii pri yeye peredache i raspredelenii [Modern technologies for improving the quality of electricity in its transmission and distribution] // Novosti elektrotehniki. – 2005. – №1. (rus)

6. Sadkov Ye.V. Optimizatsiya struktury sistemy elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya za schet kompleksnogo ucheta parametrov i kharakteristik yeye elementov [Optimization of the structure of the power supply system of an industrial enterprise due to the complex accounting of parameters and characteristics of its elements] // Energobezopasnost' i energosberezheniye. – 2006. – №3. – s. 6-10. (rus)

7. Karateyev P. Yu. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya i raspredeleniya elektricheskoy energii v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya [Estimation of efficiency of use and distribution of electric energy in the power supply system of an industrial enterprise] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. – 2013. – №12-2. – s. 103-106. (rus)

8. Yerkhan F.M. Printsipy razrabotki algoritmov optimizatsii funktsional'noy nadezhnosti raspredelitel'nykh sistem s uchetom vliyaniya veroyatnostnykh faktorov [Principles of developing algorithms for optimizing the functional reliability of distribution systems, taking into account the influence of probabilistic factors] / F.M. Yerkhan, D.A. Voynenko, I.N. Lupushor, R.G.

Bantash // Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"yedineniy SNG. – 2014. – №2. – s. 40-50. (rus)

9. Ledin S.S. Intellektual'nyye seti Smart Grid – budushcheye rossiyskoy energetiki [Intellectual networks Smart Grid – the future of the Russian power industry] // Avtomatizatsiya i IT v energetike. – 2010. – №11. (rus)

10. Dorofeyev V.V. Aktivno-adaptivnaya set' – novoye kachestvo YEES Rossii [Active-adaptive network – a new quality of the UES of Russia] / V.V. Dorofeyev, A.A. Makarov // Energoekspert. – 2009. – №4. (rus)

11. Voronov I.V. Povysheniye effektivnosti ekspluatatsii sistem elektro-snabzheniya predpriyatiy putem kompleksnogo ispol'zovaniya Smart Grid i neyronnykh setey [Increase of efficiency of operation of power supply systems of enterprises by complex use of Smart Grid and neural networks] / I.V. Voronov, Ye.A. Polotov // Vestnik KuzGTU. – 2012. – №2. – s. 63-66. (rus)

12. Dabarov V.V. Primeneniye geneticheskogo algoritma dlya optimizatsii para-metrov ustroystv kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Application of a genetic algorithm for optimizing the parameters of reactive power compensation devices] // Vestnik KuzGTU. – 2012. – №3. – s. 145-147. (rus)

13. Negadayev V.A. Model' magistral'noy struktury elektrosnabzheniya dlya issledovaniya rezhimov raboty sovokupnosti asinkhronnykh dvigateley [Model of the main power supply structure for the study of the operation modes of a set of asynchronous motors] // Vestn. KuzGTU. – 2009. – №1. – s. 36-43. (rus)

14. Negadayev V.A. Model' seti elektrosnabzheniya proizvol'noy struktury, pitayushchey asinkhronnyye dvigateli s korotkozamknutym rotorom [Model of a power supply network of an arbitrary structure feeding asynchronous motors with a short-circuited rotor] // Izvestiya TPU. – 2012. – №4. – s. 47-51. (rus)

Библиографическое описание статьи

Негадаев В.А. Построение и оптимизация распределительных сетей электроснабжения // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 4 (144). – С. 56-62.

Reference to article

Negadaev V.A. Construction and optimization of distribution power supply networks. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 4 (144), pp. 56-62.