электронный научно-технический журнал
ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК
Издатель Общероссийская общественная организация "Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова"
ISSN 2307-0595

Прямой алгоритм проектирования оптимальной структуры городской электросети с учетом ее перспективного развития

 # 11, ноябрь 2017

Кузьмина И. А.

УДК: 004.02

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
kuzminainna@yandex.ru

Введение

Задача перспективного развития сети электроснабжения с учетом перспективного развития города – многокритериальная, многопараметрическая оптимизационная задача большой размерности. Математическая модель сети электроснабжения и постановка задачи в виде задачи структурно-параметрического синтеза приведены в работах [1] и [2] соответственно.

В общем случае задача проектирования структуры городской электросети не может быть решена точными методами за приемлемое время ввиду ее большой размерности и сложными взаимосвязями между элементами. Для ее решения автором разработаны приближенные методы, основанные на декомпозиции и редукции исходной задачи, дающие ее приближенное решение [3,4].

В статье приведен прямой метод решения задачи, который позволяет получить ее точное решение, и может быть использован для решения задачи на суперкомпьютерах и с применением концепции параллельных вычислений.

Прямой алгоритм решения задачи проектирования оптимальной структуры городской электросети с учетом ее перспективного развития

На рисунке 1 приведен фрагмент сети электроснабжения.

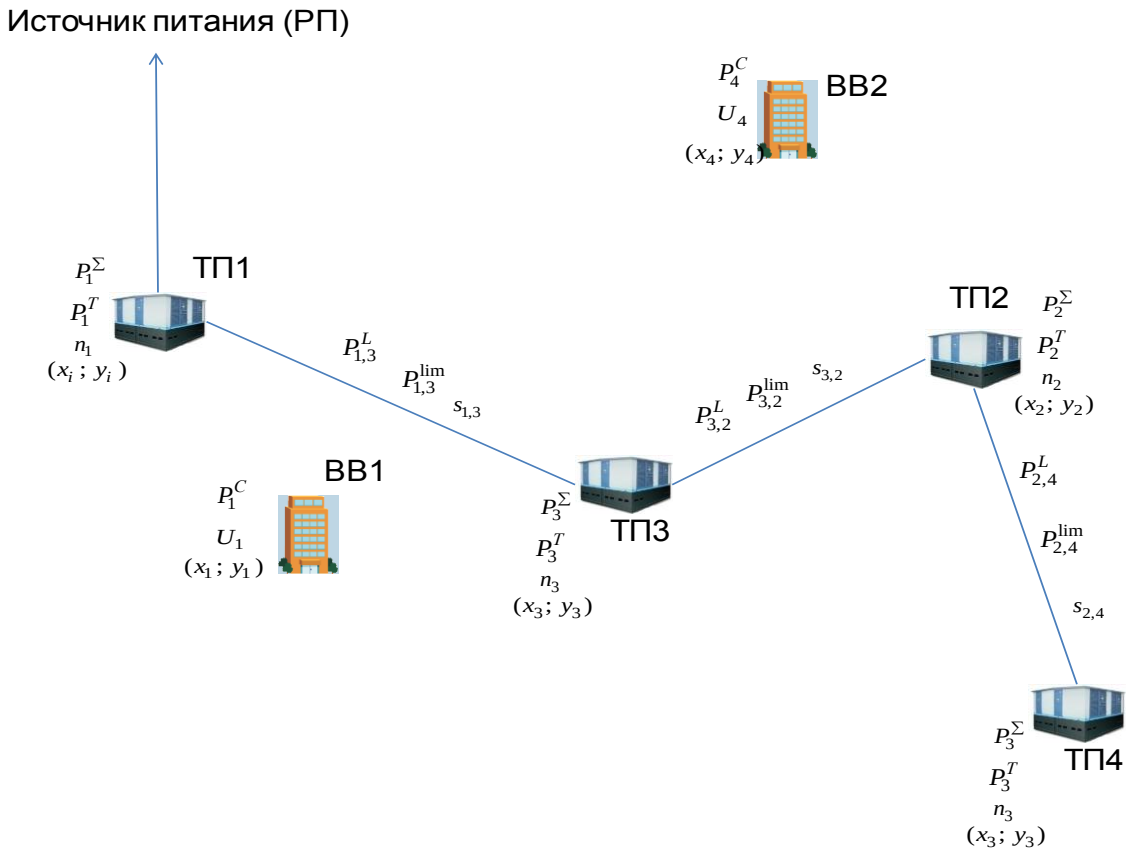

Рис. 1. Фрагмент сети электроснабжения

Основные характеристики рассматриваемого фрагмента электросети приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики электросети

Наименование	**Значение**
Число трансформаторных подстанций (ТП), N^T:	4
Число подключаемых потребителей (ПП), N^C:	2
Число кабельных линий (КЛ), соединяющих ТП:	3
Число мест возможного строительства новых ТП	3
Число критериев оптимальности:	2
Число учитываемых ограничений:	4

Вектор варьируемых параметров решаемой задачи

$$\mathbf{X} = \left\{ X_1, X_2, N_{нов}^R, N_{нов}^T, x_i, y_i, X1_j, X2_j \right\}$$

где X_1, X_2 - номера ТП, к которым будут подключены ПП1 и ПП2 соответственно; $X_1, X_2 \in \mathbf{H}$, $\mathbf{H}$ - множество номеров ТП.

$N^R_{нов}, N^T_{нов}$ - число РП и ТП, которые надлежит построить для обеспечения всех потребителей возможностью быть подключенными к сети энергоснабжения.

(x_i, y_i) - географические координаты новых ТП и РП $i = \{1, 2, ..., N^R_{нов} + N^T_{нов}\}$

$X1_j, X2_j$ - номера ТП/РП к которым будет подключены новые ТП при включении их в существующую сеть энергоснабжения.

На начальном этапе решения задачи (новые ТП и РП отсутствуют)

$$\mathbf{X} = \{X_1, X_2\}$$

$$\mathbf{H} = \{1, 2, 3, 4\}$$

Число возможных решений: 4^2=16.

В случае необходимости строительства одной новой ТП

$$\mathbf{X} = \{X_1, X_2, N^T_{нов} = 1, N^R_{нов} = 0, x_5, y_5, X1_5, X2_5\}$$

$$\mathbf{H} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

x_5, y_5, $X1_5$, $X2_5$ - географические координаты и номера ТП/РП, к которым будет подключена новая ТП соответственно.

Координаты новой ТП выбираются из заданного множества **M** – множества возможных мест строительства новых подстанций.

Для простоты расчетов, допустим, что подключение новой ТП в существующую сеть электроснабжения реализуется путем разрыва КЛ $L_{X1_i, X2_i}$ и замены ее на две КЛ $L_{X1_i, i}$, $L_{i, X2_i}$. Для каждой КЛ $L_{X1_i, i}$, $L_{i, X2_i}$, производится расчет параметров:

$$P^L_{X1_i, i} = P^L_{i, X2_i} = P^L_{X1_i, X2_i} + P^{\Sigma}_i \quad ,$$

где

$$P^{\Sigma}_i = P^{\Sigma нач}_i + \sum_j^{N^C} \gamma_j (X_j)$$

$$\gamma_j(X_j) = \begin{cases} P^C_j, & \text{если } X_j = H_i \text{ (} j \text{ потребитель подключен к } i \text{ подстанции);} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Таким образом, для рассматриваемой задачи

$$P^L_{X1_5, 5} = P^L_{5, X2_5} = P^L_{X1_5, X2_5} + P^{\Sigma}_5 \quad .$$

В таблицах 2-4 приведены основные характеристики элементов электросети [5, 6].

Таблица 2. Основные характеристики ТП

Номер ТП i	Мощность трансформатора P_i^T, кВт	Суммарная мощность подключенных потребителей $P_i^{\sum нач}$, кВт	Число потребителей, которые могут быть подключены n_i	Географические координаты $(x_i ; y_i)$
1	630	300	2	55,45; 37,43
2	1000	500	7	55,65; 37,48
3	400	100	0	55,49; 37,23
4	1000	100	5	55,23; 37,48

Таблица 3. Основные характеристики ПП

Номер ПП i	Требуемая мощность P_i^C, кВт	Географические координаты $(x_i ; y_i)$
1	100	55,54; 37,38
2	100	55,41; 37,65

Таблица 4. Основные характеристики КЛ

КЛ i,j	Передаваемая по КЛ мощность $P_{i,j}^L$, кВт	Максимально допустимая мощность $P_{i,j}^{\lim}$, кВт	Сечение КЛ $s_{i,j}$
1,3	400	1800	240
3,2	900	1800	240
2,4	1000	1800	240

Ограничения:

1. $W_1(\mathbf{X}) \geq 0$. Длины $l_{i,j}$ всех КЛ не должны превышать максимально допустимой величины, то есть

$$\forall L_{i,j}: \quad W_1(\mathbf{X}) = l^{\lim} - l_{i,j}(\mathbf{X}) \geq 0.$$

$l^{\lim} = const$. В случае определения расстояния между объектами с использованием метрики Эвклида, значение

$$l_{i,j}(\mathbf{X}) = l_{i,j}(x_i, y_i, x_j, y_j) = \sqrt{\left(x_i^2 - x_j^2\right) + \left(y_i^2 - y_j^2\right)} \qquad (1)$$

2. $W_2(\mathbf{X}) \geq 0$. Для любой ТП должны соблюдаться условия отсутствия перегрузки подстанции (загрузка трансформатора не должна превышать 70% от номинальной мощности) [7]

$$\forall T_i: \quad W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_i^T - \sum_{j=1}^{N^C} \gamma_j(X_j) \geq 0.$$

$$\gamma_j\left(X_j\right)=\begin{cases}P_j^C, & \text{если } X_j=H_i \text{ (}j\text{ потребитель подключен к }i\text{ подстанции);}\\ 0, & \text{иначе.}\end{cases}$$

3. $W_3(\mathbf{X})\geq 0$. Для подключения к ТП нового потребителя на сборных шинах ТП должны присутствовать свободные места:

$$\forall T_i: \quad W_3(\mathbf{X})=n_i-\sum_{j=1}^{N^C}\gamma_j(X_j)\geq 0;$$

$$\gamma_j\left(X_j\right)=\begin{cases}1, & \text{если } X_j=H_i \text{ (}j\text{ потребитель подключен к }i\text{ подстанции);}\\ 0, & \text{иначе.}\end{cases}$$

4. $W_4(\mathbf{X})\geq 0$. При подключении к электросети новых потребителей необходимо, чтобы для всех КЛ выполнялось условия отсутствия их перегрузки [7]:

$$\forall L_{i,j}: \quad W_4(\mathbf{X})=P_{i,j}^{\lim}-P_{i,j}^L(\mathbf{X})\geq 0.$$

$$P_{i,j}^L(\mathbf{X})=P_{i,j}^L(X_j)=P_j^C$$

Критерии оптимальности:

Рассмотрим два возможных критерия оптимальности [8].

1). Затраты на строительство новых подстанций

$$Z_1=\sum_{i=1}^{N_{нов}^T}c_i^T\rightarrow\min$$

$$c_i^T(\mathbf{X})=c_i^T(X_j)=c_i^T\left(P_i^\Sigma\right)$$

$$P_i^\Sigma=\sum_{j=1}^{N^C}\gamma_j\left(X_j\right)$$

$$\gamma_j\left(X_j\right)=\begin{cases}P_j^C, & \text{если } X_j=H_i \text{ (}j\text{ потребитель подключен к }i\text{ подстанции);}\\ 0, & \text{иначе.}\end{cases}$$

Стоимости строительства подстанций приведены в таблице 5.

Таблица 5. Стоимость строительства подстанций

Мощность трансформатора $s_{i,j}$	**Стоимость** $c_{i,j}\left(s_{i,j}\right)$
60	10
95	15
120	20
150	25
240	30

2). Стоимости прокладки КЛ, необходимых для подключения новых потребителей

$$Z_2 = \sum_{i,j} l_{i,j} \cdot c_{i,j}(\mathbf{X}) \to \min,\ i \in \left[1, N^T\right], j \in \left[1, N^C\right]$$

$c_{i,j}(\mathbf{X}) = c_{i,j}\left(X_j\right)$, тыс.руб – стоимость прокладки 1 м КЛ;

$l_{i,j}$, м – длина i,j-й КЛ.

$$c_{i,j} = \begin{cases} c_{i,j}\left(s_{i,j}\right), \text{ если } X_j = H_i \\ 0, \text{ в противном случае} \end{cases}$$

Значения переменной $c_{i,j} = c_{i,j}\left(s_{i,j}\right)$ приведены в таблице 6 [9].

Таблица 6. Стоимость прокладки 1м КЛ

Сечение $s_{i,j}$	**Стоимость** $c_{i,j}\left(s_{i,j}\right)$
60	10
95	15
120	20
150	25
240	30

$s_{i,j}$ мм^2 – возможные сечения КЛ.

Значение $s_{i,j}$ выбирается на основании сведений о мощности передаваемого по КЛ тока $s_{i,j}\left(P_{i,j}^L\right)$ (таблица 7) [9].

Таблица 7. Стоимость прокладки 1м КЛ

Сечение $s_{i,j}$	**Максимальная мощность** $\max P_{i,j}^L$
60	50
95	70
120	90
150	110
240	130

Для упрощения расчетов положим, что мощность, передаваемая по КЛ, равна мощности подключенного потребителя $P_{i,j}^L(\mathbf{X}) = P_{i,j}^L\left(X_j\right) = P_j^C$

Итоговый критерий оптимальности:

$$Z = Z_1 + Z_2 \to \min$$

Алгоритм решения задачи:

Шаг 1. Определение расстояния от каждого потребителя до каждой ТП по формуле 1. Например,

$$l_{1,1} = \sqrt{(1000-900)^2 + (1000-990)^2}$$

Результат вычислений приведен в таблице 8.

Таблица 8. Расстояния между объектами электросети, м

Номер ПП	Номер ТП			
	1	2	3	4
1	30	70	10	80
2	60	30	60	90

Шаг 2. Проверка полученных значений по ограничению $W_1(\mathbf{X}) \geq 0$

Красным в таблице 8 отмечены ячейки, не удовлетворяющие условию.

Таким образом, число возможных вариантов подключения: 3^2=9 (рисунок 2).

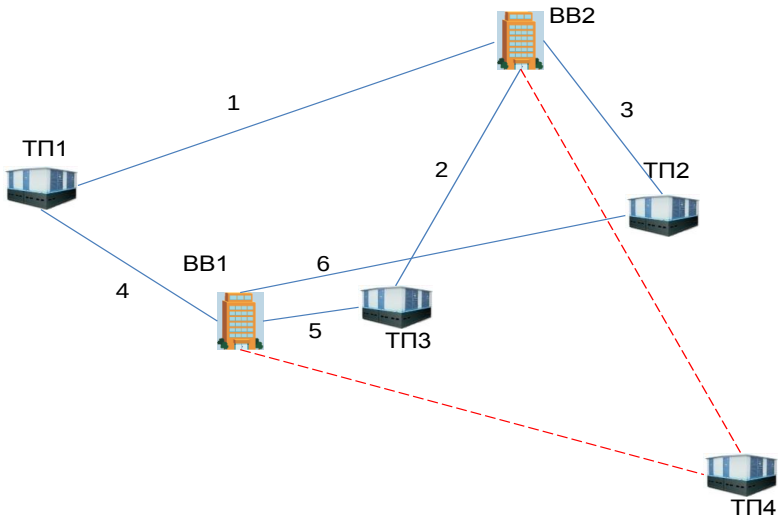

Рис. 2. Допустимые варианты подключения новых потребителей

Шаг 3. Проверим возможные варианты подключения на условия выполнение ограничений.

Вариант 1: КЛ 1+4($l_{1,2} + l_{1,1}$)

$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_1^T - P_1^{\Sigma}\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 630 - (300+100+100) < 0$ - условие не выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_1 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_1(\mathbf{X}) = 2 - 2 = 0$$ - условие выполнено

Вариант 2: КЛ 1+5($l_{1,2} + l_{3,1}$)

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_1^T - P_1^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 630 - (300 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_1 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_1(\mathbf{X}) = 2 - 1 = 1$$ - условие выполнено

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_3^T - P_3^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 400 - (100 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_3 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_3(\mathbf{X}) = 0 - 1 = -1$$ - условие не выполнено

Вариант 3: КЛ 1+6 ($l_{1,2} + l_{2,1}$)

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_1^T - P_1^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 630 - (300 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_1 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_1(\mathbf{X}) = 2 - 1 = 1$$ - условие выполнено

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_2^T - P_2^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 1000 - (500 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_2 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_2(\mathbf{X}) = 7 - 1 = 6$$ - условие выполнено

Вариант 4: КЛ 2+4 ($l_{3,2} + l_{1,1}$)

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_1^T - P_1^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 630 - (300 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_1 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_1(\mathbf{X}) = 2 - 1 = 1$$ - условие выполнено

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_3^T - P_3^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 400 - (100 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_3 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_3(\mathbf{X}) = 0 - 1 = -1$$ - условие не выполнено

Вариант 5: КЛ 2+5 ($l_{3,2} + l_{3,1}$)

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_3^T - P_3^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 400 - (100 + 100 + 100) > 0$$ - условие не выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_3 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_3(\mathbf{X}) = 0 - 2 = -1$$ - условие не выполнено

Вариант 6: КЛ 2+6 ($l_{3,2} + l_{2,1}$)

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_2^T - P_2^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 1000 - (500 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_2 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_2(\mathbf{X}) = 7 - 1 = 6$$ - условие выполнено

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_3^T - P_3^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 400 - (100 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_3 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_3(\mathbf{X}) = 0 - 1 = -1$$ - условие не выполнено

Вариант 7: КЛ 3+4 ($l_{2,2} + l_{1,1}$)

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_1^T - P_1^\Sigma\ (\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 630 - (300 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_1 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_1(\mathbf{X}) = 2 - 1 = 1$$ - условие выполнено

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_2^T - P_2^{\Sigma}(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 1000 - (500 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_2 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_2(\mathbf{X}) = 7 - 1 = 6$$ - условие выполнено

Вариант 8: КЛ 3+5 ($l_{2,2} + l_{3,1}$)

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_2^T - P_2^{\Sigma}(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 1000 - (500 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_2 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_2(\mathbf{X}) = 7 - 1 = 6$$ - условие выполнено

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_3^T - P_3^{\Sigma}(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 400 - (100 + 100) > 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_3 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_3(\mathbf{X}) = 0 - 1 = -1$$ - условие не выполнено

Вариант 9: КЛ 3+6 ($l_{2,2} + l_{2,1}$)

$$W_2(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot P_2^T - P_2^{\Sigma}(\mathbf{X}) = 0,7 \cdot 1000 - (500 + 100 + 100) = 0$$ - условие выполнено

$$W_3(\mathbf{X}) = n_2 - \sum_{j=1}^{2} \gamma_2(\mathbf{X}) = 7 - 2 = 5$$ - условие выполнено

Таким образом, лишь три варианта удовлетворяют ограничениям 1,2 и 3 (рисунок 3).

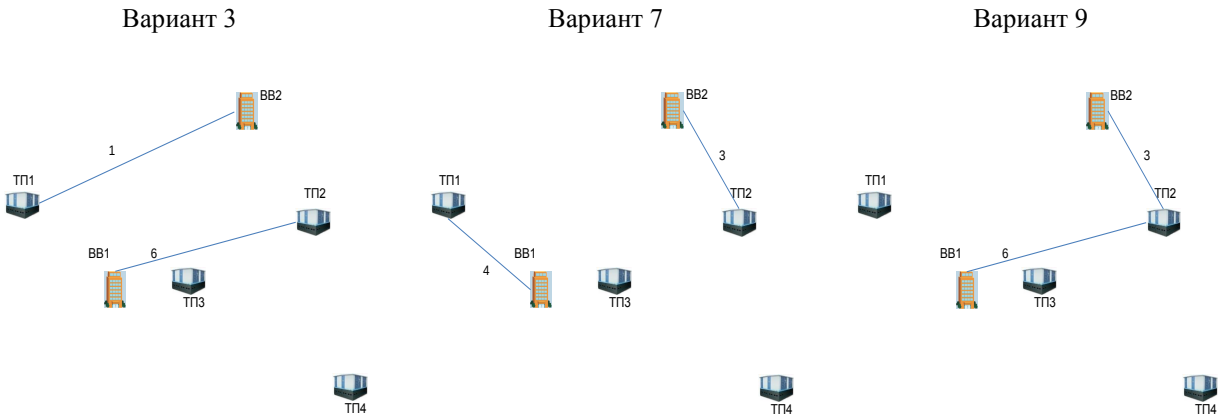

Рис. 3. Допустимые варианты подключения новых потребителей

Произведем оценку полученных вариантов.

Вариант 3:

$$P_{1,2}^{КЛ} = P_2^{ПП} = 100 \Rightarrow s_{1,2} = 150, c_{1,2} = 25$$

$$P_{2,1}^{КЛ} = P_1^{ПП} = 100 \Rightarrow s_{2,1} = 150, c_{2,1} = 25$$

$$Z = \sum l_{i,j} \cdot c_{i,j} = 60 \cdot 25 + 70 \cdot 25 = 3250$$

Вариант 7:

$$P_{1,1}^{КЛ} = P_1^{ПП} = 100 \Rightarrow s_{1,1} = 150, c_{1,1} = 25$$

$$P_{2,2}^{КЛ} = P_2^{ПП} = 100 \Rightarrow s_{2,2} = 150, c_{2,2} = 25$$

$$Z = \sum l_{i,j} \cdot c_{i,j} = 30 \cdot 25 + 30 \cdot 25 = 1500$$

Вариант 9:

$$P_{2,1}^{КЛ} = P_1^{ПП} = 100 \Rightarrow s_{2,1} = 150, c_{2,1} = 25$$

$$P_{2,2}^{КЛ} = P_2^{ПП} = 100 \Rightarrow s_{2,2} = 150, c_{2,2} = 25$$

$$Z = \sum l_{i,j} \cdot c_{i,j} = 70 \cdot 25 + 30 \cdot 25 = 2500$$

Таким образом, оптимальное решение – вариант электросети №7.

Число проверок ограничений – 38;
Расчетов параметров элементов электросети – 20;
Расчетов целевой функции – 3.

Заключение

В работе представлен алгоритм решения задачи проектирования городской распределительной сети электроснабжения без разбиения исходной задачи на совокупность подзадач меньшей размерности. Приведен пример решения задачи, демонстрирующий предложенный подход.

Представленный метод реализован и протестирован в рамках интерактивного программного комплекса ELNET [10]. Выполнены расчеты тестовых карт размерности до 100 новых ТП и 100 новых подключаемых потребителей.

Метод позволяет получить точное решение, однако за счет высокой вычислительной сложности, решение практических задач может быть выполнено лишь с использованием высокопроизводительных ЭВМ и приемов распараллеливания.

Список литературы

[1]. Карпенко А.П., Кузьмина И.А. Математическая модель распределительной городской сети электроснабжения с учетом ее перспективного развития // Наука и образование: электронное научное издание. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. №5. С. 162-180. DOI:10.7463/0514.0709781 Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html (дата обращения: 21.09.2017)

[2]. Кузьмина И. А. Постановка и формализация задачи проектирования сети энергоснабжения // Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2014: материалы XVI молодежной Международной научно-технической конференции. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014.

[3]. Карпенко А.П., Кузьмина И.А. Методы решения задачи перспективного развития распределительной городской сети энергоснабжения // Наука и образование: электронное научное издание. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 10. С. 292-304. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/727891.html (дата обращения: 21.09.2017)

[4]. Кузьмина И.А. Применение принципов декомпозиции и координации для решения задачи перспективного развития городской распределительной сети энергоснабжения // Проблемы современной науки и образования. 2016. №30. С. 40-46.

[5]. Правила устройства электроустановок. Официальные тексты по состоянию на 01.03.2007. 7-е издание, переработанное и дополненное / Министерство топлива и энергетики. М.: Новационный центр ЭНАС. 2015. 560 с.

[6]. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий. СП 31-110-2003. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП. 2004. 138 с.

[7]. Сибикин М.Ю. Электроснабжение. Учебное пособие. М.: РадиоСофт. 2014. 328 с.

[8]. Амерханов Р.А., Богдан А.В., Вербицкая С.В., Гарькавый К.А. Проектирование систем энергообеспечения. М.: Энергоатомиздат. 2010. 548 с.

[9]. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. Учебник для бакалавриата. М.: КНОРУС. 2013. 352 с.

[10]. Кузьмина И.А. Системы автоматизации проектирования объектов электроэнергетики. Интерактивный программный комплекс ELNET // Информатизация инженерного образования: труды Международной научно-практической конференции (Москва, 12-13 апреля 2016 г.). М.: Издательский дом МЭИ. 2016. С. 346-347.