Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0448

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2014. № 10. С. 292–307.

DOI: **10.7463/1014.0727891**

Представлена в редакцию: 27.09.2014

УДК 519.6

Методы решения задачи перспективного развития распределительной городской сети электроснабжения

профессор, д.ф.-м.н. Карпенко А. П.[1],
Кузьмина И. А.[1,*]

[*]kuzminainna@yandex.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Целью работы является разработка методов решения задачи перспективного развития сети энергоснабжения. В статье приведена постановка задачи перспективного развития сети энергоснабжения в виде задачи дискретного программирования, для ее решения предложены два метода – метод редукции к совокупности вложенных задач глобальной минимизации и метод декомпозиции. Статья является продолжением работы Карпенко А. П., Кузьминой И. А. «Формализация и постановка задачи проектирования городской сети энергоснабжения при учете ее перспективного развития» (опубликована в электронном научно-техническом журнале «Наука и образование» №5, 2014 год).

Ключевые слова: городская распределительная сеть энергоснабжения; перспективное развитие; математическое моделирование; декомпозиция задачи; редукция задачи

Введение

Под распределительной городской сетью электроснабжения (электросетью) понимаем сеть городского масштаба, представляющую собой совокупность трансформаторных и распределительных подстанций и соединяющих их линий электропередач, предназначенную для передачи и распределения электрической энергии. Задачу перспективного развития электросети (ПРЭ) рассматриваем как задачу определения путей ее оптимального развития с точки зрения конфигурации, загрузки оборудования, параметров и т. д.

В работе [1] нами выполнен обзор отечественных и зарубежных программных систем автоматизированного проектирования городских электросетей. Показано, что в силу различий российских и иностранных норм и стандартов в области проектирования городских распределительных электросетей, для решения задач ПРЭ не могут быть использованы зарубежные программные системы. Отечественные программные системы не поддерживают решение этих задач или поддерживают их в недостаточной мере. Таким образом, актуальной является задача разработки отечественного методического, алгоритмического и программного обеспечения задачи ПРЭ.

В работе [1] также представлена разработанная авторами математическая модель распределительной городской электросети с учётом её перспективного развития. На основе этой модели в той же работе поставлена задача оптимизации ПРЭ в виде задачи многокритериальной структурно-параметрической оптимизации. Обоснована целесообразность использования метода редукции этой задачи к однокритериальной задаче с помощью той или иной скалярной свёртки. Указанная задача однокритериальной оптимизации ПРЭ представляет собой задачу непрерывно-дискретно-целочисленного программирования. В той же работе обосновано представление этой задачи в виде задачи дискретного программирования на основе дискретной аппроксимации возможных областей строительства новых трансформаторных и распределительных подстанций.

Указанная задача дискретного программирования относится к классу NP-сложных [2]. Решение задач данного класса производят точными и приближенными методами. Точное решение задачи в практически значимых задачах ПРЭ требует неприемлемо высоких вычислительных затрат в силу высокой размерности вектора варьируемых параметров и большой мощности множества допустимых значений этого вектора [3, 4]. Приближенные методы не гарантируют получение оптимального решения задачи, но обеспечивают получение эффективного (полиномиально сложного) решения, разумно близкого к оптимальному [5, 6]. Классификация приближенных методов решения задачи дискретного программирования представлена, например, в работе [7].

Данная работа является продолжением работы [1]. Целью работы является разработка методов решения задачи оптимизации ПРЭ. Соответствующие алгоритмы и программное обеспечение составят предмет самостоятельных публикаций.

В первом разделе работы приводим постановку задачи ПРЭ в виде задачи дискретного программирования. Во втором разделе представляем метод редукции указанной задачи к совокупности вложенных задач глобальной минимизации. Третий раздел посвящён решению задачи ПРЭ методом декомпозиции. В заключении обсуждаем основные результаты работы и перспективы её развития.

1. Постановка задачи оптимизации электросети с учетом перспектив её развития

Запись вида $|A|$, где A – счётное множество, далее означает мощность (число элементов) этого множества; запись вида $|B|$, где B – вектор, означает его размерность.

Электросеть представляем совокупностью трансформаторных подстанций (ТП), распределительных подстанций (РП), потребителей электроэнергии и кабельных линий (КЛ). Различаем уже построенные ТП и ТП, которые надлежит построить (новые ТП).

Построенную ТП T_i определяет вектор известных постоянных параметров A_i^T. Новую ТП T_j задаёт кортеж $\left\langle A_j^T, N_j^T, H_j^T \right\rangle$, где A_j^T – аналогичный A_i^T вектор известных параметров; N_j^T – неизвестный вектор номеров ТП, РП, к которым будет произведено подключение данной ТП; H_j^T – неизвестные географические координаты ТП.

Построенную РП R_i определяет вектор известных параметров A_i^R. Новой РП R_j соответствует кортеж $\left\langle A_j^R, H_j^R \right\rangle$, где H_j^R – неизвестный вектор географических координат места строительства РП.

Потребителя C_i определяет кортеж $\left\langle A_i^C, n_i^C \right\rangle$, где A_i^C – вектор известных параметров; n_i^C – неизвестный номер ТП или РП, к которой должно быть произведено подключение данного потребителя.

Рассматриваем КЛ, которые должны быть построены (новые КЛ). Кабельной линии $L_{i,j}$, соединяющей *i*-й и *j*-й узлы электросети указанных типов, поставлен в соответствие набор параметров $A_{i,j}^L$.

Исходную электросеть (на уровне напряжения 10 кВ) представляем в виде графа

$$G^b = \left\langle T^b, R^b,\ L^b \right\rangle,$$

где $T^b = \left\{ T_i^b, i \in \left[1 : \left| T^b \right| \right] \right\}$, $R^b = \left\{ R_i^b, i \in \left[1 : \left| R^b \right| \right] \right\}$ – вершины графа (исходные множества узлов электросети типа ТП и РП соответственно); $L^b = \left\{ L_{i,j}^b,\ i,\ j \in \left[1 : \left| T^b \right| + \left| R^b \right| \right], i \neq j \right\}$ – дуги графа (исходное множество всех КЛ электросети напряжением 10 кВ).

Для подключения потребителей множества C к сети электроснабжения, определяемой графом G^b, необходима модификация этой сети. Граф результирующей электросети обозначаем

$$G^e = \left\langle T^e, R^e, L^e \right\rangle,$$

где $T^e = \tilde{T}^b \bigcup \hat{T}$ – совокупность ТП, полученная путём объединения новых ТП $\hat{T}$ и существующих, но модифицированных ТП $\tilde{T}^b$; $R^e = \tilde{R}^b \bigcup \hat{R}$ – аналогичный набор РП; $L^e = \tilde{L}^b \bigcup\ \hat{L}^{10} \bigcup \hat{L}^{0,4}$ – совокупность КЛ, полученная объединением существующих модифицированных линий $\tilde{L}^b$, множества КЛ $\hat{L}^{10}$ напряжением 10 кВ, которые должны быть проложены в ходе модификации сети, а также аналогичного множества КЛ $\hat{L}^{0,4}$ напряжением 0,4 кВ.

Вектор варьируемых параметров задачи имеет вид

$$X = \left(H^T, H^R, N^T,\ N^C,\ \left| \hat{T} \right|,\ \left| \hat{R} \right| \right),$$

где $H^T=\left(H_i^T, i\in\left[1:\left|\hat{T}\right|\right]\right)$ – объединённый вектор географических координат ТП (размерность равна $2\left|\hat{T}\right|$); $H^R=\left(H_i^R, i\in\left[1:\left|\hat{R}\right|\right]\right)$ – объединённый вектор географических координат РП размерностью $2\left|\hat{R}\right|$; $N^T=\left(N_i^T, i\in\left[1:\left|\hat{T}\right|\right]\right)$ – объединённый вектор номеров ТП, РП размерности $2\left|\hat{T}\right|$, к которым планируется подключить новые ТП; $N^C=\left(n_i^C, i\in[1:|C|]\right)$ – объединённый $|C|$-мерный вектор номеров ТП, РП, к которым должны быть подключены потребители множества C; $\left|\hat{T}\right|$, $\left|\hat{R}\right|$ – числа новых ТП и РП соответственно.

На варьируемые параметры могут быть наложены ограничения вида

$$W\left(A^T, A^R, A^C, A^L, X\right)=W(X)\geq 0,$$

где $A^T=\left(A_1^T(X), A_2^T(X), A_3^T(X),...\right)$ – совокупность всех векторов $A_k^T(X)$; A^R, A^C, A^L – аналогичные совокупности; $W(X)=\left(w_1(X), w_2(X), ..., w_{|W|}(X)\right)$ – $|W|$-мерная вектор функция. Имеется в виду, что указанное неравенство выполняется покомпонентно.

Выделяем базовые (обязательные) ограничения $W_X(X)\geq 0$ и пользовательские ограничения $W_U(X)\geq 0$, которые определяют области допустимых значений вектора варьируемых параметров D_X, D_U соответственно [1].

Определены частные критерии оптимальности вида

$$Z\left(A^T, A^R, A^C, A^L, X\right)=Z(X)=\left(z_1(X),\ z_2(X),\ ...,\ z_{|Z|}(X)\right),$$

на первые $\left|\bar{Z}\right|\leq|Z|$ которых наложены критериальные ограничения вида

$$z_i^-\leq z_i(X)\leq z_i^+,\ i\in\left[1...\left|\bar{Z}\right|\right],$$

где z_i^-, z_i^+ – минимальное и максимальное допустимые значения i-го критерия оптимальности соответственно. Критериальные ограничения формируют область допустимых значений вектора варьируемых параметров D_Z.

Задачу оптимизации ПРЭ ставим в виде

$$Z(X^*)=\min_{X\in D} Z(X), \qquad (1)$$

где X^* – искомые допустимые оптимальные значения компонентов вектора варьируемых параметров; D – множество допустимых значений этого вектора:

$$D=D_X\bigcap D_U\bigcap D_Z.$$

С помощью той или иной скалярной свёртки задачу многокритериальной оптимизации (1) сводим к однокритериальной детерминированной задаче глобальной оптимизации вида

$$z\left(X^*\right)=\min_{X\in D} Z(X).\qquad(2)$$

Используем сведение задачи (2) к задаче дискретного программирования путём дискретной аппроксимации множества $O=\{o_i,\, i\in[1:|O|]\}$ – совокупности возможных областей строительства новых ТП и РП. Дискретную аппроксимацию этих областей обозначаем $\bar{O}=\left\{(x_j;y_j),\, j\in\left[1:|\bar{O}|\right]\right\}$.

В результате указанной дискретизации множество D допустимых значений вектора варьируемых параметров преобразуем в дискретное множество $\bar{D}$ и задачу (2) сводим к однокритериальной дискретной задаче глобальной оптимизации вида

$$z\left(\bar{X}^*\right)=\min_{X\in\bar{D}} z\left(\bar{X}\right),\qquad(3)$$

где $\bar{X}=\left(\bar{H}^T, \bar{H}^R, N^T, N^C, |\hat{T}|, |\hat{R}|\right)$, $\bar{H}^T\in\bar{O}$, $\bar{H}^R\in\bar{O}$.

Для простоты записи далее там, где это не вызывает опасности неверного чтения, опускаем указание на дискретность указанных множеств и значений соответствующих векторов.

2. Метод редукции к совокупности вложенных задач глобальной минимизации

Представим вектор варьируемых параметров задачи (3) в виде

$$X=\left(X^1, X^2, X^3\right),$$

где

$$X^1=\left(H^T, H^R, |\hat{T}|, |\hat{R}|\right),\ X^2=N^C,\ X^3=N^T.$$

В этих обозначениях решение задачи (3) эквивалентно решению совокупности вложенных задач оптимизации меньшей размерности [8, 9]:

$$\min_{X\in D} z\left(X^*\right)=\min_{X^1\in D}\ \min_{X^2\in D\left(X^1\right)}\ \min_{X^3\in D\left(X^1,\, X^2\right)} z(X).\qquad(4)$$

Здесь $D\left(X^1\right)$ – подобласть области D, соответствующая фиксированным значениям компонентов вектора X^1; $D\left(X^1, X^2\right)$ – аналогичная подобласть D при фиксированных значениях компонентов векторов X^1, X^2.

Схема метода представлена на рис. 1.

Согласно рисунку 1, на верхнем уровне иерархии решаем подзадачу 1 – определяем числа и места строительства новых ТП и РП. Решение этой подзадачи – значения компонентов вектора X_t^1 – передаём подзадаче 2. Далее вектор X_t^2 – вариант подключения новых потребителей к электросети, найденный в результате решения подзадачи 2, а также вектор X_t^1 передаём подзадаче 3, которая призвана определить оптимальный вариант подключения новых РП и ТП к существующей электросети. При решении подзадачи 3 на каждой итерации t вычисляем значение целевой функции $z(X_t) = z(X_t^1, X_t^2, X_t^3)$. Далее переходим к следующей итерации, которая может начинаться с решения любой из подзадач 1 – 3.

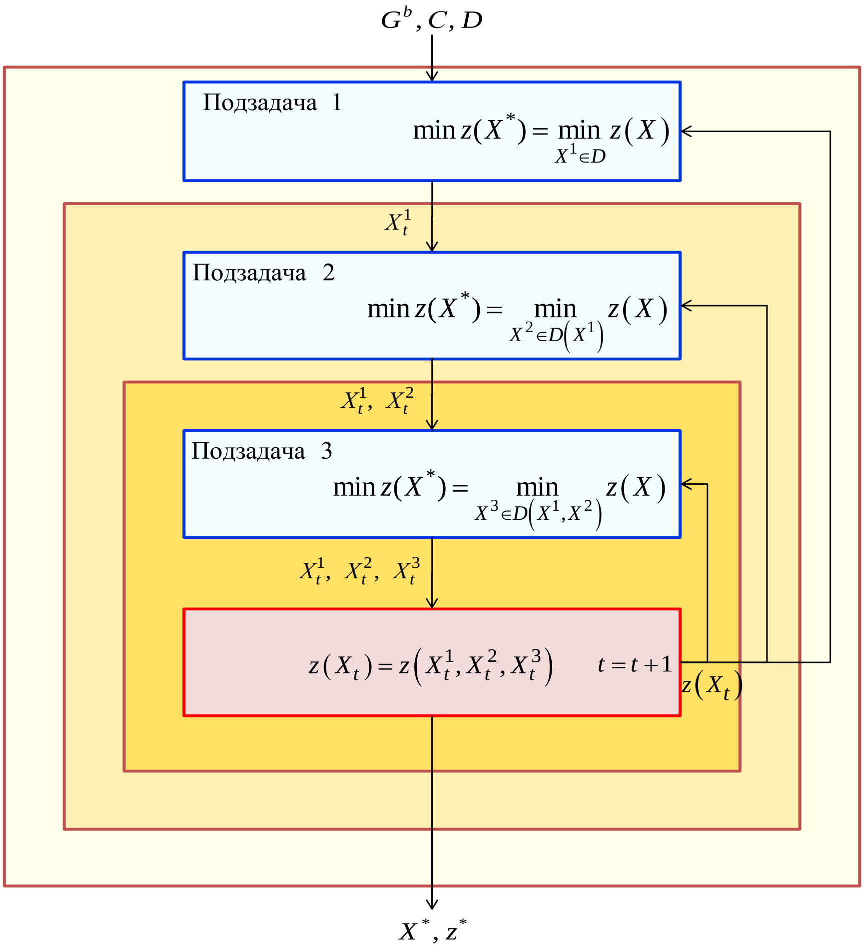

Рис. 1. Схема метода редукции к совокупности вложенных задач глобальной минимизации: *t* – номер итерации

Для решения подзадач 1 – 3 могут быть использованы, вообще говоря, различные алгоритмы дискретной оптимизации и различные условия окончания итераций [10, 11].

3. Метод декомпозиции

3.1. Схема метода

Метод предполагает разбиение задачи (3) на подзадачи 1 – 3 и задачу координации (рис. 2). Координацию подзадач 1 – 3 осуществляем с помощью вектора координирующих (лимитирующих и стимулирующих) параметров

$$S = \left(s_i\ ,\ i \in [\ 1 \ldots\ |S|\ \ ]\right) = S^{\lim} \bigcup S^{\mathrm{st}}\ , \qquad (5)$$

где s_i – i-й параметр; S^{lim}, S^{st} – подвекторы параметров лимитирующей и стимулирующей координации соответственно [12, 13].

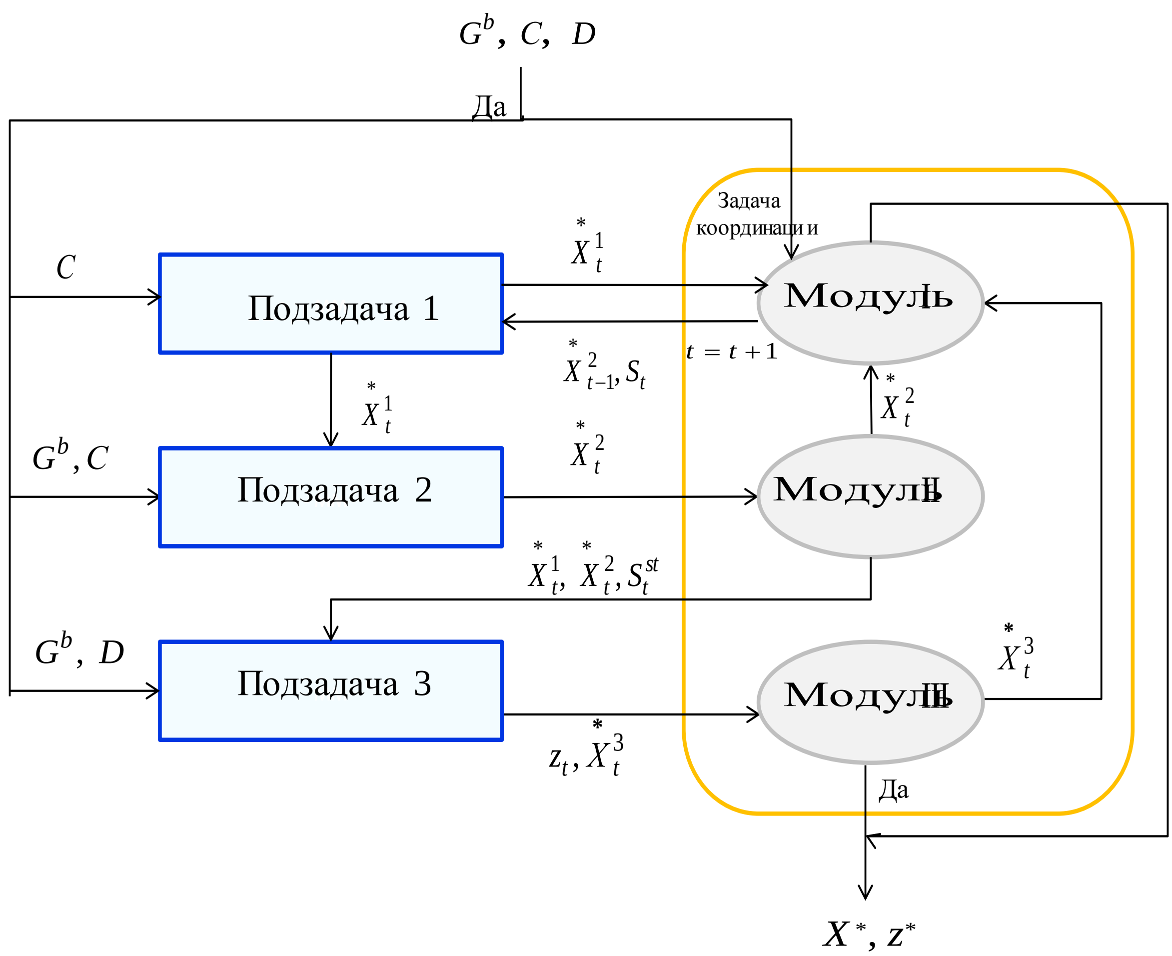

Рис. 2. Схема метода декомпозиции

Лимитирующую координацию реализуем с помощью системы дополнительных ограничений вида

$$W_S\left(X,\ S^{\text{lim}}\right) = \left\{W_i\left(X,\ S^{\text{lim}}\right) \geq 0,\ i \in [\ 1 \ldots\ |W_S|]\right\},$$

которые определяют область допустимых значений вектора варьируемых параметров

$$D_S = \left\{X \left| W_S\left(X,\ S^{\text{lim}}\right) \geq 0\right.\right\}.$$

Стимулирующая координация подзадач 1 – 3 производится с помощью связующих параметров, вводимых в целевую функцию:

$$z(X) \to z\left(X, S^{\text{st}}\right).$$

С учётом векторов S^{lim}, S^{st} задачу ПРЭ ставим в виде

$$z\left(X^*, S\right) = \min_{X \in D_\Sigma} z\left(X, S^{\text{st}}\right), \tag{6}$$

$$D_\Sigma = D \bigcap D_S.$$

Согласно рисунку 2, решение задачи начинается с определения модулем I начального вектора S_0, который передаётся подзадаче 1. Исходными данными для подзадачи 1 на начальной итерации $(t=0)$ являются множество подключаемых к сети потребителей C и вектор координирующих параметров S_0. На итерации $(t>0)$ к этим данным добавляется рассчитанный на предыдущей итерации вектор $\overset{*}{X}{}^{2}_{t-1}$. Результатом решения подзадачи 1 на итерации t является вектор $\overset{*}{X}{}^{1}_{t}$, который далее передаётся подзадаче 2.

При решении подзадачи 2 на основании информации о числе и местах строительства новых ТП и РП, представленных вектором $\overset{*}{X}{}^{1}_{t}$, а также графе G^b, производим подключение потребителей множества C к сети электроснабжения. Полученное решение $\overset{*}{X}{}^{2}_{t}$ передаём координирующему модулю II.

Модуль II в случае наличия потребителей, подключение которых на текущей итерации t невозможно, передает сведения о них в модуль I для дальнейшего определения тактики решения задачи ПРЭ. В случае если в ходе решения подзадачи 2 все потребители были подключены, осуществляем переход к решению подзадачи 3.

Исходными данными для подзадачи 3 являются векторы $\overset{*}{X}{}^{1}_{t}$, $\overset{*}{X}{}^{2}_{t}$, S_t^{st} граф G^b, а также область допустимых значений вектора варьируемых параметров D_{Σ}. Результатом решения подзадачи 3 является вектор $\overset{*}{X}{}^{3}_{t}$. На основе информации о значениях компонентов векторов $\overset{*}{X}{}^{1}_{t}$, $\overset{*}{X}{}^{2}_{t}$, $\overset{*}{X}{}^{3}_{t}$ производится расчёт значения целевой функции $z\left(X_t, S_t^{\mathrm{st}}\right)$. Результат решения подзадачи 3 передаётся координирующему модулю III.

Модуль III осуществляет проверку выполнения условия окончания вычислений $P(\hat{X}_t, \hat{z}_t)=1$, где $P(\hat{X}_t, \hat{z}_t)$ – предикат такой, что

$$P(\hat{X}_t, \hat{z}_t)=\begin{cases}1, & \text{если условие окончания вычислений выполнено,}\\ 0, & \text{в противном случае.}\end{cases}$$

Здесь $\hat{X}_t=\{X_i, i\in[1...\,t]\}$ – набор векторов X на итерациях $[1...\,t]$; $\hat{z}_t=\{z(X_i), i\in[1...\,t]\}$ – набор значений целевой функции $z(X)$ на тех же итерациях.

В случае $P(\hat{X}_t, \hat{z}_t)\neq 1$ модуль III передаёт вектор $\overset{*}{X}{}^{3}_{t}$ координирующему модулю I, который определяет дальнейшую тактику решения задачи ПРЭ. В случае если $P(\hat{X}_t, \hat{z}_t)=1$, решение задачи завершается.

3.2. Задача координации

Исходными данными для задачи координации являются векторы $\overset{*}{X}{}_t^1$, $\overset{*}{X}{}_t^2$, $\overset{*}{X}{}_t^3$, полученные в результате решения подзадач 1 – 3. Основными функциями, которые призвана решать задача координации, являются:

1) расчёт параметров координации S;

2) определение последовательности решения подзадач 1 – 3;

3) определение момента окончания вычислений.

Полагаем, что вектор лимитирующих параметров координации является двумерным, то есть

$$S^{\mathrm{lim}} = \left(s_1^{\mathrm{lim}}, s_2^{\mathrm{lim}}\right),$$

где величины $s_1^{\mathrm{lim}} = \left|\hat{R}\right|$, $s_2^{\mathrm{lim}} = \left|\hat{T}\right|$ – минимальные числа РП, ТП, соответственно, которые должны быть построены.

Вектор стимулирующих параметров координации S^{st} имеет размерность вектора $\bar{O}$:

$$S^{\mathrm{st}} = \left(s_i^{\mathrm{st}} = \lambda_i, i \in \left[1 : \left|\bar{O}\right|\right]\right).$$

Здесь λ_i – величина, характеризующая *полезность* строительства новой ТП в точке $\bar{o}_i \in \bar{O}$.

Предлагаем два алгоритма определения стимулирующих параметров λ_i.

1) Первый алгоритм не учитывает электрические мощности потребителей и задается формулой

$$\lambda_i = \alpha \Big/ \sum_{j=0}^{\left|\tilde{C}\right|} \delta(l_{i,j}), \quad i \in \left[1 : \left|\bar{O}\right|\right], \tag{7}$$

где

$$\delta(l_{i,j}) = \begin{cases} 1, & \text{если } \ l_{i,j} < l^{\max}, \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

α – нормировочный коэффициент; $\tilde{C} = \left\{\tilde{c}_j, j \in \left[1 : \left|\tilde{C}\right|\right]\right\}$ – текущее множество неподключенных потребителей; $l_{i,j}$ – длина кабельной линии $L_{i,j}$; $l^{\max}$ – максимально допустимая длина КЛ.

Формула (7) имеет следующий смысл. Каждой точке $\bar{o}_i$ ставим в соответствие значение величины λ_i, обратно пропорциональное числу неподключенных потребителей, расстояние от которых до этой точки, меньше максимально возможной длины КЛ $l^{\max}$ (рис. 3).

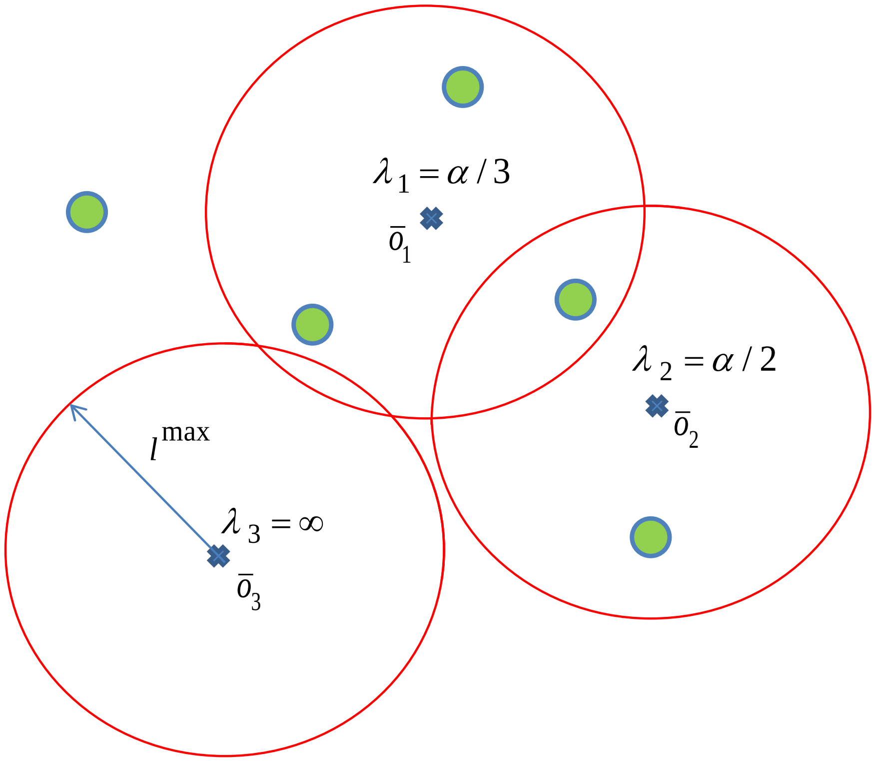

Рис. 3. Геометрическая интерпретация формулы (7)

– неподключенный потребитель; – точка возможного места строительства новой подстанции

2) Второй алгоритм учитывает не только длины КЛ, но и электрические мощности потребителей. Для каждого потребителя определяется *коэффициент полезности*

$$\delta_i(x_j, y_j) = \begin{cases} \alpha P_i \left(-\dfrac{l_{i,j}}{l^{\max}} + 1 \right), & l_{i,j} \le l^{\max}, \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases} \quad i \in \left[1 : \left|\bar{O}\right|\right]. \tag{8}$$

Здесь P_i – электрическая мощность i-ого потребителя; α – нормировочный коэффициент.

Геометрически, множество значений коэффициента $\delta_i(x_j, y_j)$ образует конус высокой αP_i с вершиной в точке (x_i, y_i) и окружностью радиусом $l^{\max}$ в основании. За пределами основания конуса величина $\delta_i(x_j, y_j)$ равна нулю (рис. 4).

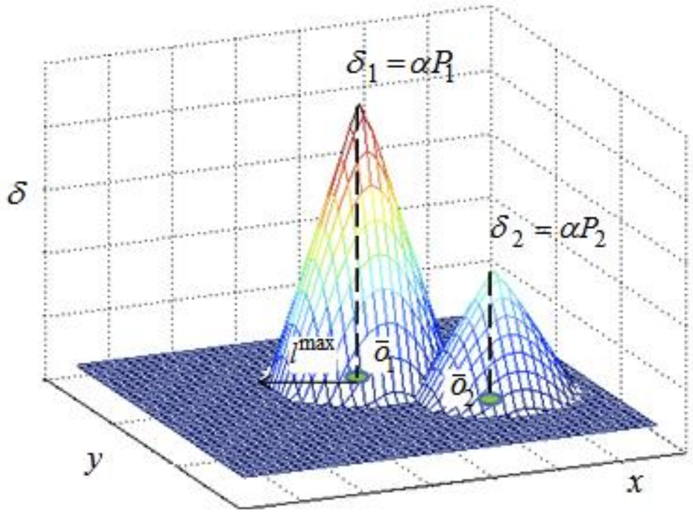

Рис. 4. Геометрическая интерпретация коэффициента полезности δ_i – неподключенный потребитель

Значения коэффициентов λ_j определяются формулой, аналогичной формуле (7). Геометрическая интерпретация алгоритма определения коэффициентов λ_j представлена на рис. 5.

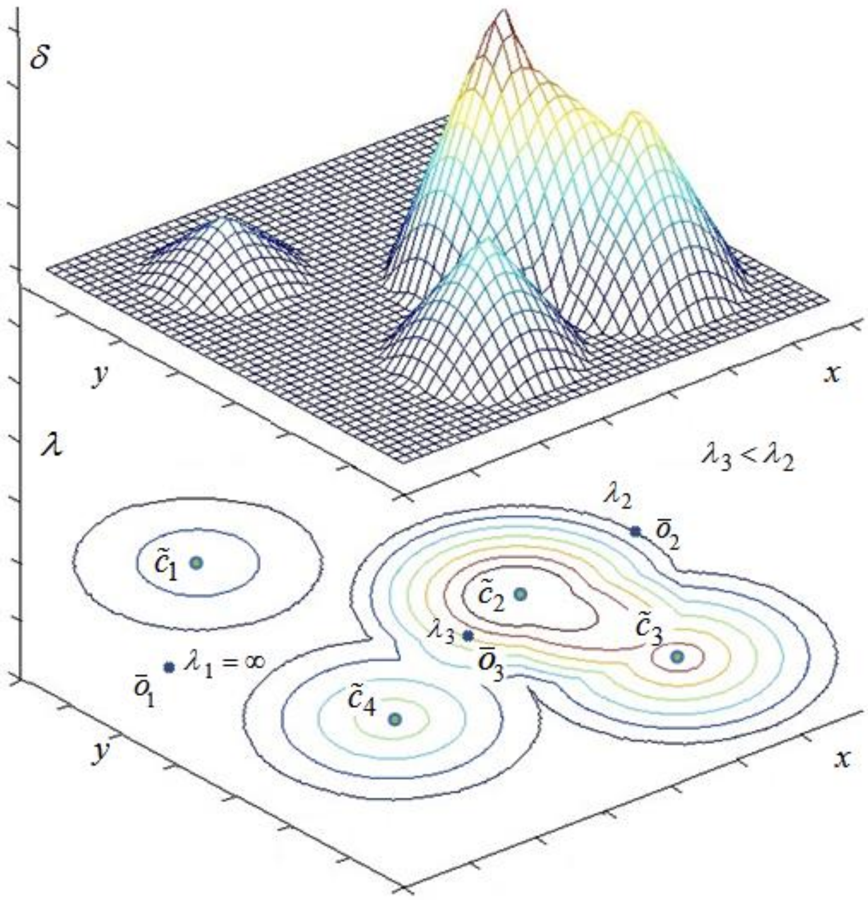

Рис. 5. Геометрическая интерпретация формулы (8) – неподключенный потребитель; – точка возможного места строительства новой подстанции

Заключение

В работе представлены два метода решения задачи оптимизации ПРЭ. Суть первого метода состоит в редукции указанной задачи к совокупности трёх вложенных задач глобальной минимизации меньшей размерности. Решение первой из этих подзадач определяет число и места строительства новых ТП и РП, второй подзадачи – вариант подключения новых потребителей к электросети, третьей подзадачи – оптимальный вариант подключения новых ТП к существующей электросети. Важно, что для решения этих подзадач могут быть использованы, вообще говоря, различные алгоритмы оптимизации и различные условия окончания итераций. Таким образом, метод порождает большое число алгоритмов оптимизации ПРЭ.

Второй метод – метод декомпозиции – предполагает разбиение задачи оптимизации ПРЭ на те же три подзадачи и задачу координации, которая выполняет расчёт параметров координации, определение последовательности решения подзадач и момента окончания вычислений. Координацию подзадач осуществляем с помощью векторов лимитирующих и стимулирующих параметров.

Рассмотрен двухмерный вектор лимитирующих параметров координации. Компоненты этого вектора имеют смысл минимальных чисел ТП, РП, которые должны быть построены. Размерность вектора стимулирующих параметров равна числу возможных мест строительства ТП, РП. Компоненты вектора стимулирующих параметров имеют смысл «полезности» строительства новых ТП, РП в указанных местах. Предложены два алгоритма вычисления «полезности».

Метод декомпозиции также порождает большое число алгоритмов оптимизации ПРЭ.

Рассмотрение алгоритмов оптимизации ПРЭ и соответствующего программного обеспечения, реализующего данные алгоритмы, составят предмет самостоятельных публикаций.

Список литературы

1. Карпенко А. П., Кузьмина И. А. Математическая модель распределительной городской сети электроснабжения с учетом ее перспективного развития // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С. 162-180. DOI: 10.7463/0514.0709781
2. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие. М.: МАКС Пресс, 2008. 197 с.
3. Соловьев В.И. Методы оптимальных решений: учеб. пособие. М.: Финансовый ун-т, 2012. 364 с.
4. Cohen G. Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems // Journal of Optimization Theory and Applications. 1980. Vol. 32, no. 3. P. 277-305. DOI: 10.1007/BF00934554

5. Жолобов Д.А. Введение в математическое программирование. М.: МИФИ, 2008. 376 с.
6. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи: пер. с англ. М.: Мир, 1982. 416 с.
7. Мухлисуллина Д. Т., Моор Д. А. Анализ эффективности различных сверток критериев оптимальности в задаче многокритериальной оптимизации // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2010. № 4. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/141623.html (дата обращения 01.09.2014).
8. Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы: учеб. пособие. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 238 с.
9. Цурков В.И., Литвинчев И.С. Декомпозиция в динамических задачах с перекрестными связями. М.: Наука, 1994. 352 с.
10. Gary Parker R. Discrete optimization. Academic Press, 1988. 472 p.
11. Rosen K.H. Handbook on Discrete Combinational Mathematics. CRC Press, 1999. 1232 p.
12. Экономическая кибернетика: учеб. пособие. Донецк: ДонГУ, 1999. 397 с.
13. Хорошев А.Н. Введение в управление проектированием механических систем: учеб. пособие для студентов втузов. М.: Высшая школа, 1999. 372 с.

.

Science&Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0448

Science and Education of the Bauman MSTU, 2014, no. 10, pp. 292–307.

DOI: **10.7463/1014.0727891**

Received: 27.09.2014

Problem-Solving Methods for the Prospective Development of Urban Power Distribution Network

A.P. Karpenko[1], **I.A. Kuzmina**[1,*]

[*]kuzminainna@yandex.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: urban power distribution network; prospective development; mathematic simulation; decomposition; reduction

This article succeeds the former A. P. Karpenko's and A. I. Kuzmina's publication titled "A mathematical model of urban distribution electro-network considering its future development" (electronic scientific and technical magazine "Science and education" No. 5, 2014).

The article offers a model of urban power distribution network as a set of transformer and distribution substations and cable lines. All elements of the network and new consumers are determined owing to vectors of parameters consistent with them.

A problem of the urban power distribution network design, taking into account a prospective development of the city, is presented as a problem of discrete programming. It is in deciding on the optimal option to connect new consumers to the power supply network, on the number and sites to build new substations, and on the option to include them in the power supply network.

Two methods, namely a reduction method for a set the nested tasks of global minimization and a decomposition method are offered to solve the problem.

In reduction method the problem of prospective development of power supply network breaks into three subtasks of smaller dimension: a subtask to define the number and sites of new transformer and distribution substations, a subtask to define the option to connect new consumers to the power supply network, and a subtask to include new substations in the power supply network. The vector of the varied parameters is broken into three subvectors consistent with the subtasks. Each subtask is solved using an area of admissible vector values of the varied parameters at the fixed components of the subvectors obtained when solving the higher subtasks.

In decomposition method the task is presented as a set of three, similar to reduction method, reductions of subtasks and a problem of coordination. The problem of coordination specifies a sequence of the subtasks solution, defines the moment of calculation termination. Coordination is realized by introducing the vectors of parameters of limiting and stimulating coordination into the problem. Vector components of limiting coordination mean the minimum numbers of substations to be built. Vector components of stimulating coordination define "usefulness" of new substations to be built on possible sites. There are two offered options to determine parameters of stimulating coordination.

The offered methods of reduction and decomposition generally generate a large number of the optimization algorithms. Subsequent publications are expected to consider these algorithms and a software to implement them.

References

1. Karpenko A.P., Kuz'mina I.A. A mathematical model of urban distribution electro-network considering its future development. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 5, pp. 162-180. DOI: 10.7463/0514.0709781 (in Russian).
2. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Mnogokriterial'nye zadachi priniatiia reshenii* [Multicriteria decision making problems]. Moscow, MAKS Press, 2008. 197 p. (in Russian).
3. Solov'ev V.I. *Metody optimal'nykh reshenii* [Method for finding optimal solution]. Moscow, Finansovy universitet Publ., 2012. 364 p. (in Russian).
4. Cohen G. Auxiliary problem principle and decomposition of optimization problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1980, vol. 32, no. 3, pp. 277-305. DOI: 10.1007/BF00934554
5. Zholobov D.A. *Vvedenie v matematicheskoe programmirovanie* [Introduction to mathematical programming]. Moscow, MIFI Publ., 2008. 376 p. (in Russian).
6. Garey M., Johnson D. *Computers and Intractability. A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York, W.H. Freeman and Company, 1979. (Russ. ed.: Garey M., Johnson D. *Vychislitel'nye mashiny i trudnoreshaemye zadachi*. Moscow, Mir Publ., 1982. 466 p.).
7. Mukhlisullina D.T., Moor D.A. Analysis of the effectiveness of different scalar convolutions in multiobjective optimization problem. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2010, no. 4. Available at: http://technomag.edu.ru/doc/141623.html , accessed 01.09.2014. (in Russian).
8. Sigal I.Kh., Ivanova A.P. *Vvedenie v prikladnoe diskretnoe programmirovanie: modeli i vychislitel'nye algoritmy* [Introduction to applied discrete programming: models and computational algorithms]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 238 p. (in Russian).
9. Tsurkov V.I., Litvinchev I.S. *Dekompozitsiia v dinamicheskikh zadachakh s perekrestnymi sviaziami* [Decomposition in dynamic problems of cross-linked]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 352 p. (in Russian).
10. Gary Parker R. *Discrete optimization*. Academic Press, 1988. 472 p.

11. Rosen K.H. *Handbook on Discrete Combinational Mathematics*. CRC Press, 1999. 1232 p.
12. Ekonomicheskaia kibernetika [Economic Cybernetics]. Donetsk, DonSU Publ., 1999. 397 p. (in Russian).
13. Khoroshev A.N. *Vvedenie v upravlenie proektirovaniem mekhanicheskikh sistem: ucheb. posobie dlia studentov vtuzov* [Introduction to control of mechanical systems design]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1999. 372 p. (in Russian).