

## Математическая модель распределительной городской сети электроснабжения с учетом ее перспективного развития

# 05, май 2014

DOI: 10.7463/0514.0709781

профессор, д.ф.-м.н. Карпенко А. П., Кузьмина И. А.

УДК 519.6

Россия, МГТУ им. Баумана

[apkarpenko@mail.ru](mailto:apkarpenko@mail.ru)

[kuzminainna@yandex.ru](mailto:kuzminainna@yandex.ru)

### Введение

Под распределительной городской сетью электроснабжения (далее – электросеть) 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., а также с точки зрения определения необходимости и сроков ввода в эксплуатацию новых объектов электросети. Особенно актуальными вопросы ПРЭ являются для мегаполисов в связи с высокими темпами развития городской инфраструктуры этих городов.

Лидером в области автоматизированного проектирования городских электросетей являются США. Американские энергетики используют для проектирования электросетей большое число передовых методов, которые легли в основу мощного программного обеспечения [1, 2]. Из наиболее успешных программных комплексов, разработанных в США, выделим следующие продукты:

- специализированная система автоматизированного проектирования (САПР) *AutoCADElectrical* компании *AutoDesk* [3];
- решения американо-канадской фирмы *CYMEInternational*, в частности, САПР *CYME PSAF* [4];
- программа имитационного моделирования распределительных сетей фирмы *BentleySystems* – *BentleyExpertDesignerElectric*, основанная на собственной платформе компании *MicroStation* [5].

Основными критериями оптимальности при проектировании распределительных электросетей в Великобритании являются удобство эксплуатации этих сетей (скорость устранения неисправностей) и распределение токов короткого замыкания [6]. Описания программ, применяемых компанией *UKPowerNetworks*, представлены в отчете [7].

Большое внимание обеспечению бесперебойной подачи электроэнергии городскими электросетями уделяется в Швейцарии. В результате эта страна имеет одни из самых низких показателей в мире по частоте отказов в работе сети и времени обесточивания объектов электроснабжения [8, 9]. В качестве сред проектирования электросетей швейцарские специалисты помимо стандартных инструментов *CAD* активно используют программные разработки немецких и норвежских специалистов – *CADprofiElectrical* [10] и *DDS-CADElectrical* [11].

В отличие от Швейцарии, уровень надежности распределительных сетей Испании не слишком высок [8, 9]. Исследования испанских ученых при проектировании электросетей направлены, прежде всего, на повышение надежности этих сетей [12].

Первой страной в мире по темпам развития систем электропотребления является Китай. Поэтому исследованиям в области проектирования этих систем китайские ученые уделяют большое внимание. Для решения задач автоматизированного проектирования городских электросетей китайские специалисты внедряют собственные программно-аппаратные комплексы [13].

Представленные на рынке программные системы позволяют рассчитывать параметры энергосистем, режимы работы сети, отображать схемы энергоснабжения и производить оформление технической документации, но не поддерживают автоматизированное проектирование оптимальной топологии сети с учетом факторов перспективного развития города.

В России для поддержки проектирования электросетей используют в основном программные комплексы *EnergyCSLine* [16, 17] и *ModelStudioCS* ЛЭП [18].

Программный комплекс *EnergyCSLine* (компания *CSoftDevelopment*) предназначен для проектирования воздушных линий электропередач и решения ряда инженерных и общепроектных задач. Опыт проектирования энергетических объектов с помощью САПР *EnergyCS* показывает его следующие достоинства:

- возможность расчета токов короткого замыкания и установившегося режима работы электросети;
  - высокая гибкость, позволяющая быстро анализировать различные варианты решений;
  - возможность документирования исходных данных и результатов расчетов.
- Программный комплекс *ModelStudioCS* ЛЭП [18] решает аналогичные задачи проектирования сетей электроснабжения. Комплекс использует современные интерактивные информационные технологии, результаты эргономических исследований и математические решения на основе алгоритмов Н.Б. Ильичева (Ивановский энергетический университет). *ModelStudioCS* ЛЭП работает на платформе *AutoCAD* 2006/2007/2008, что позволя-

ет использовать всю функциональность этой платформы. Важно, что комплекс разработан с учетом российских норм и стандартов.

В силу различий российских и иностранных норм и стандартов в области проектирования городских распределительных электросетей, для решения задач ПРЭ не могут быть использованы иностранные программные комплексы. Отечественные программные комплексы 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.

Основной целью работы является разработка математической модели распределительной городской электросети с учетом ее перспективного развития. На основе этой модели в 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 свертки. Заметим, что в настоящее время в практике решения задач оптимизации ПРЭ используют метод главного критерия, в качестве которого выступают приведенные затраты на строительство и эксплуатацию сети энергоснабжения [19, 20].

Указанная задача однокритериальной оптимизации ПРЭ представляет собой задачу непрерывно-дискретно-целочисленного программирования. В работе обосновано представление этой задачи в виде задачи дискретного программирования на основе дискретной аппроксимации возможных областей строительства новых трансформаторных и распределительных подстанций.

На основе представленной в работе математической модели авторами разработаны методы решения задачи оптимизации ПРЭ, соответствующие алгоритмы и программное обеспечение, которые составят предмет самостоятельных публикаций.

## 1. Математическая модель электросети и постановка задачи и ее оптимизации

Если не оговорено противное, запись вида  $|A|$ , где  $A$  – счетное множество, далее означает мощность (число элементов) этого множества. Аналогично, если  $B$  – вектор, то  $|B|$  – его размерность. Если мощность множества  $A$  или размерность вектора  $B$  не указаны, то имеется в виду, что эти мощность и размерность равны соответственно  $|A|$ ,  $|B|$ .

**Типы объектов.** Электросеть представляет собой совокупность объектов следующих типов:

- трансформаторная подстанция (ТП);
- распределительная подстанция (РП);
- потребитель электроэнергии;
- кабельная линия (КЛ).

Потребители электроэнергии могут быть подключены к ТП на уровне напряжения 0,4 кВ и к РП на уровне напряжения 10 кВ.

Различаем уже построенные ТП и ТП, которые надлежит построить (новые ТП).

Построенную ТП  $T_j$  определяет вектор известных постоянных параметров  $A_j^T$ , включающий в себя следующие величины: уникальный номер ТП; суммарная мощность подключенных потребителей; мощность установленного трансформатора; число потребителей, которые могут быть подключены к ТП и т.д.

Новую ТП  $T_j$  задает набор параметров  $\langle A_j^T, N_j^T, H_j^T \rangle$ , где  $A_j^T$  – аналогичный  $A_j^T$  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.

Заметим, что ТП могут отличаться по мощности установленных на них трансформаторов (в настоящее время – 400, 630, 1000 или 1250 кВА), а также по максимальному общему числу потребителей, которые могут быть подключены к ТП (сейчас – 10 или 16 потребителей). Данные обстоятельства учитываются с помощью ограничений (см. ниже). Заметим, кроме того, что в процессе решения задачи ПРЭ может оказаться целесообразным увеличение мощности трансформатора, установленного на той или иной ТП. В рамках рассматриваемой модели электросети эту возможность также формализуем с помощью соответствующих ограничений.

Аналогично ТП, различаем построенные и новые РП. Построенную РП  $R_j$  определяет вектор известных параметров  $A_j^R$  (уникальный номер РП, число объектов, которые могут быть подключены к РП и т.д.). Новой РП  $R_j$  соответствует набор параметров  $\langle A_j^R, H_j^R \rangle$ , где  $H_j^R$  – неизвестный вектор географических координат места строительства РП.

Модель РП не включает в себя схему подключения ее к *питающему центру*, поскольку соответствующие электросети не принадлежат распределительной сетевой компании.

Потребителя  $C_i$  определяет набор параметров  $\langle A_i^C, n_i^C \rangle$ , где  $A_i^C$  – вектор констант, включающий в себя уникальный номер потребителя, объем требуемой мощности согласно заявке на технологическое присоединение, запрашиваемый уровень напряжения 0,4 или 10 кВ, годовое число часов использования потребителем максимума электриче-

ской нагрузки, географические координаты потребителя и т.д.;  $n_i^C$  – неизвестный номер ТП или РП, к которой должно быть произведено подключение данного потребителя.

Рассматриваем КЛ, которые должны быть построены (новые КЛ), чтобы соединить новые ТП с сетью энергоснабжения (на уровне напряжения 10 кВ), а также подключить потребителей к ТП, РП (на уровнях напряжения 0,4 и 10 кВ соответственно). Кабельной линии  $L_{i,j}$ , соединяющей  $i$ -й и  $j$ -й узлы электросети указанных типов, поставлен в соответствие набор параметров  $A_{i,j}^L$ , в число которых входят ее длина, площадь поперечного сечения проводников, мощность, передаваемая по КЛ, максимальная мощность, которая может быть передана по КЛ (пропускная способность КЛ) и т.д.

Часть параметров каждого из наборов  $A_k^T$ ,  $A_l^R$ ,  $A_n^L$  являются заданными постоянными величинами, а значения остальных параметров определяют, в конечном счете, соответствующие компоненты вектора варьируемых параметров задачи  $X$  (см. ниже). Для простоты записи полагаем, что  $A_k^T = A_k^T(X)$ ,  $A_l^R = A_l^R(X)$ ,  $A_m^C = A_m^C(X)$ ,  $A_n^L = A_n^L(X)$ .

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

$$G^b = (T^b, R^b, L^b),$$

где  $T^b = \{T_i^b, i \in [1:|T^b|]\}$ ,  $R^b = \{R_i^b, i \in [1:|R^b|]\}$  – вершины графа (исходные множества узлов электросети типа ТП и РП соответственно);  $L^b = \{L_{i,j}^b, i, j \in [1:|T^b| + |R^b|], i \neq j\}$  – дуги графа (исходное множество всех КЛ электросети напряжением 10 кВ). Подчеркнем, что граф  $G^b$  не включает в себя КЛ электросети напряжением 0,4 кВ, с помощью которых к сети подключены существующие потребители. Говоря более строго, рассматриваем этих потребителей как текущую нагрузку ТП/РП и формализуем в виде значений соответствующих параметров ТП/РП.

Пример графа  $G^b$  представлен на рисунке 1, где также показаны потребители,  $C = \{C_i, i \in [1:|C|]\}$ , которые должны быть подключены к электросети.

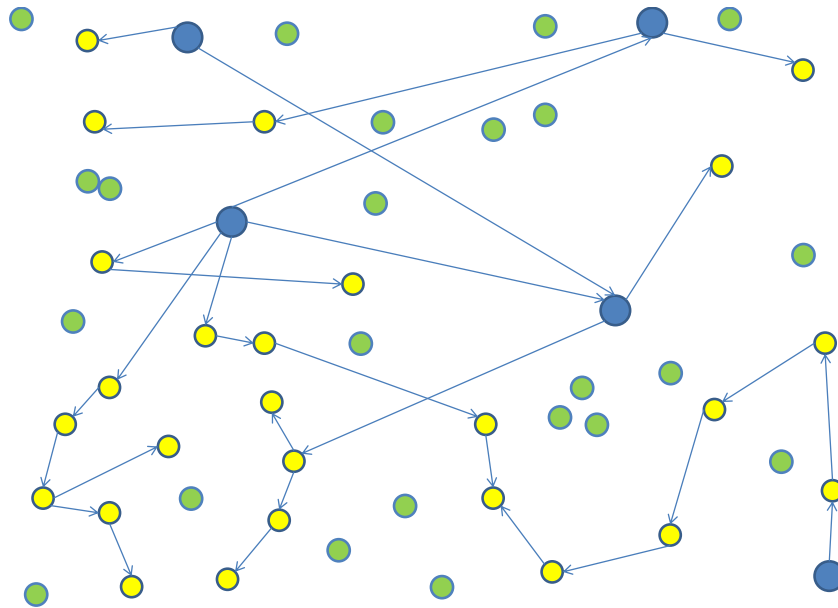


Рисунок 1. Пример графа  $G^b$ : ● – РП; ● – ТП; ● – подключаемый потребитель электроэнергии;  
 ↓  
 – КЛ;

**Искомая электросеть.** Для подключения потребителей множества  $S$  к сети электроснабжения, определяемой графом  $G^b$ , необходима модификация этой сети. Граф результирующей электросети (рисунок 2) обозначаем

$$G^e = (T^e, R^e, L^e).$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$T^e = \tilde{T}^b \cup \hat{T}$  – совокупность ТП, полученная путем объединения новых ТП  $\hat{T}$  и существующих, но модифицированных ТП  $\tilde{T}^b$ ;

$R^e = \tilde{R}^b \cup \hat{R}$  – аналогичный набор РП;

$L^e = \tilde{L}^b \cup \hat{L}^{10} \cup \hat{L}^{0,4}$  – 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. Под модификацией исходной сети понимаем изменение ее параметров в результате подключения к соответствующим узлам сети новых потребителей и новых ТП. Заметим, что множество  $\hat{L}^{10}$  включает в себя КЛ между ТП и РП, а также КЛ между соответствующими потребителями и РП.

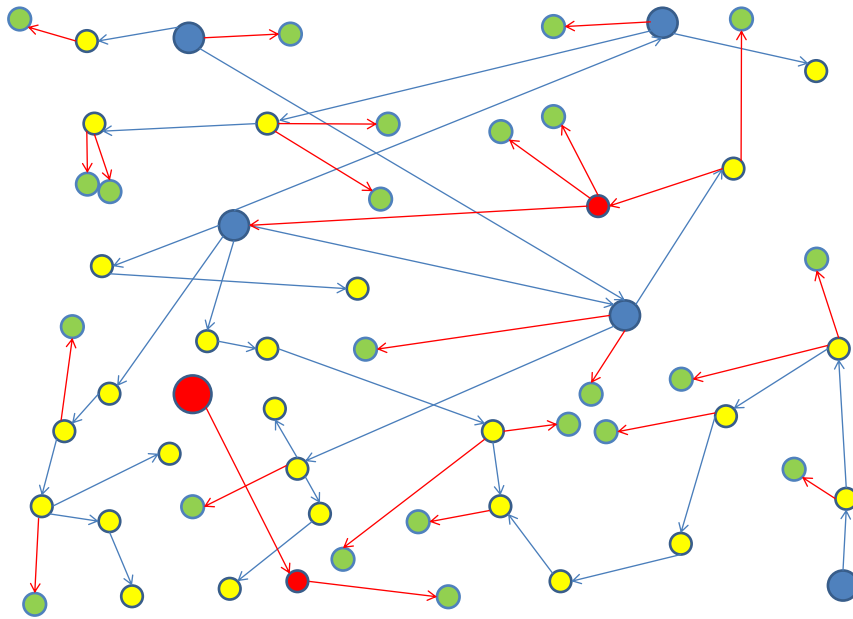









Рисунок 2. Пример графа  $G^e$ : , ,  – исходные РП, ТП и КЛ соответственно;  – подключаемый потребитель электроэнергии; ,  – новые РП и ТП соответственно;  – новые КЛ

**Варьируемые параметры.** Вектор варьируемых параметров задачи имеет вид

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

Здесь приняты следующие обозначения:

$H^T = (H_i^T, i \in [1:|\hat{T}|])$  – объединенный вектор географических координат указанных ТП (размерность равна  $2|\hat{T}|$ );

$H^R = (H_i^R, i \in [1:|\hat{R}|])$  – объединенный вектор географических координат указанных ТП размерностью  $2|\hat{R}|$ ;

$N^T = (N_i^T, i \in [1:|\hat{T}|])$  – объединенный вектор номеров ТП, РП размерности  $2|\hat{T}|$ , к которым планируется подключить новые ТП;

$N^C = (n_i^C, i \in [1:|C|])$  – объединенный  $|C|$ -мерный вектор номеров ТП, РП, к которым должны быть подключены потребители множества  $C$ ;

$|\hat{T}|$ ,  $|\hat{R}|$  – числа новых ТП и РП соответственно.

Заметим, что размерность вектора  $N^T$  равна  $2|\hat{T}|$ , поскольку каждая ТП должна быть подключена к двум ТП, РП.

Таким образом, размерность вектора варьируемых параметров  $X$  представляет собой переменную величину, равную

$$|X| = |X|(|\hat{T}|, |\hat{R}|) = 4|\hat{T}| + 2|\hat{R}| + |C| + 2.$$

При планировании на один год в практически значимых задачах ПРЭ типичные значения величин  $|\hat{T}|, |\hat{R}|, |C|$  составляют примерно 200, 50, 3000, чему соответствует размерность вектора  $X$ , равна  $\sim 3900$ . При планировании на пять лет эта величина увеличивается примерно в пять раз.

На варьируемые параметры могут быть наложены ограничения вида

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

где  $A^T = \{A_k^T(X)\}$  - совокупность всех векторов  $A_k^T(X)$ ;  $A^R, A^C, A^L$  - аналогичные совокупности;  $W(X) = (w_1(X), w_2(X), \dots, w_{|W|}(X))$  -  $|W|$ -мерная вектор функция.

Имеется в виду, что указанное неравенство выполняется покомпонентно.

Выделяем два следующих типа ограничений (так что  $|W| = |W_X| + |W_U|$ ).

- Базовые (обязательные) ограничения определяет вектор  $W_X(X)$ . Данные ограничений формируют функциональные и структурные требования безотказного снабжения всех потребителей электроэнергией надлежащего качества и в требуемом количестве, условия отсутствия перегрузки трансформаторов и КЛ, ограничения на предельную длину КЛ и т.д.

- Пользовательские ограничения, задает вектор  $W_U(X)$ . Число и состав этих ограничений определяет пользователь для каждой решаемой задачи.

Ограничения

$$W_X(X) \geq 0, \quad W_U(X) \geq 0$$

определяют области допустимых значений вектора варьируемых параметров

$$D_X = \{X | W_X(X) \geq 0\}, \quad D_U = \{X | W_U(X) \geq 0\}$$

соответственно.

**Критерии оптимальности.** Определены частные критерии оптимальности, имеющие в общем случае вид

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

Не нарушая общности, полагаем, что на первые  $|\bar{Z}| \leq |Z|$  критериев наложены критериальные ограничения вида

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



где  $z_i^-$ ,  $z_i^+$  – минимальное и максимальное допустимые значения  $i$ -го критерия оптимальности соответственно.

Критериальные ограничения (1) формируют область допустимых значений вектора варьируемых параметров

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

**Постановка задачи оптимизации ПРЭ.** Задачу оптимизации ПРЭ ставим в виде

$$Z(X^*) = \min_{X \in D} Z(X), \quad (2)$$

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

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

С содержательной точки зрения, задача (2) представляет собой задачу многокритериальной структурно-параметрической оптимизации. Особенностью задачи является то, что поскольку структура итоговой электросети заранее не известна, размерность вектора варьируемых параметров  $X$  не фиксирована.

## 2. Редукция многокритериальной задачи оптимизации ПРЭ к однокритериальной

Критерии оптимальности  $z_1(X)$ ,  $z_2(X)$ , ...,  $z_{|\bar{Z}|}(X)$  в общем случае противоречат друг другу, то есть улучшение значений одного из критериев приводит к ухудшению значений других критериев. Поэтому решение задачи (2) может быть только компромиссным [21]. В настоящее время существует большое число методов решения многокритериальных задач (МКО-задач), а также различные подходы к их классификации. На верхнем уровне иерархии методы решения МКО-задач классифицируем следующим образом [22].

– Методы поиска решения без участия лица, принимающего решения (ЛПР), построенные на основе на некоторых эвристических принципах [23].

– Методы поиска решения с участием ЛПР. В зависимости от варианта вовлечения ЛПР в процесс принятия решения МКО-задачи, в этом случае различают априорные, апостериорные и интерактивные методы [22].

Методы последнего класса разделяют на две следующие группы.

а) Методы, которые не предполагают свертывание частных критериев в скалярный. К данным методам можно отнести метод справедливого компромисса, метод отклонения от идеальной точки, метод последовательных уступок, метод анализа иерархий, метод Парето-аппроксимации и др. [24].

б) Методы, сводящие МКО-задачу к однокритериальной: метод главного критерия и метод свертывания векторного критерия в скалярный.

Метод главного критерия заключается в выделении одного из критериев в качестве основного и переводе остальных критериев в ограничения. Основным недостатком данного метода заключается в том, что поиск оптимального решения фактически ведется по одному из критериев, и значения остальных критериев напрямую не влияют на результаты поиска.

Наиболее часто используемой сверткой критериев является аддитивная скалярная свертка вида

$$z(X) = \sum_{i=1}^{|Z|} \lambda_i z_i(X), \quad X \in D,$$

где  $z(X)$  – скалярный критерий оптимальности;  $\lambda_i \geq 0$  – коэффициенты свертки, которые трактуют как «веса» или «коэффициенты важности» соответствующих частных критериев, так что более важному из них ЛПР назначает больший «вес», а менее важному – меньший.

Недостаток аддитивной скалярной свертки состоит в том, что в случае задачи с невыпуклой границей множества Парето эта свертка не позволяет получить все эффективные по Парето решения [25]. От указанного недостатка аддитивной свертки свободна свертка Гермейера

$$z(X) = \min_i \left( \frac{z_i(X)}{\mu_i} \right), \quad i \in [1..|Z|], \quad X \in D,$$

где  $\mu_i > 0$  – параметры свертки. Эта свертка позволяет получить как эффективные по Парето, так и эффективные по Слейтеру (слабо эффективные) решения [22].

С помощью той или иной скалярной свертки исходную МКО-задачу (2) сводим к однокритериальной детерминированной задаче глобальной оптимизации вида

$$z(X^*) = \min_{X \in D} Z(X). \quad (3)$$

### 3. Сведение задачи ПРЭ к задаче дискретного программирования

Компоненты векторов  $H^T, H^R$  представляют собой вещественные числа. Допустимые значения компонентов вектора варьируемых параметров  $N^C, N^T$  образуют, вообще говоря, несколько наборов целочисленных величин. Переменные  $|\hat{T}|, |\hat{R}|$  являются целочисленными. Таким образом, задача (3) представляет собой однокритериальную задачу непрерывно-дискретно-целочисленного программирования (НДЦ-программирования).

Для решения задач НДЦ-программирования используют три основных подхода [26]:

- решение задачи без каких-либо упрощений;
- сведение к непрерывной задаче;
- сведение к задаче дискретного программирования.

Решение задачи (3) как задачи НДЦ-программирования предполагает выбор значений координат  $H^T, H^R$  из непрерывного диапазона значений. Учитывая прогнозный характер определения подключаемой к электросети нагрузки, затраты на вычисление точных значений координат строительства новых ТП и РП являются неоправданными.

Сведение НДЦ-задачи к задаче непрерывного программирования приводит, во-первых, к увеличению вычислительной сложности задачи. Во-вторых, близость значений дискретных величин в пространстве поиска не соответствует в общем случае близости решений в пространстве критериев оптимальности. В результате данный подход может дать решение, сильно отличающееся от оптимального, или решение, выходящее за границы области допустимых значений  $D$ .

На основе представленных аргументов используем сведение задачи (3) к задаче дискретного программирования по следующей схеме.

Пусть  $O = \{O_i, i \in [1:|O|]\}$  – совокупность возможных областей строительства новых ТП и РП. Дискретную аппроксимацию этих областей обозначаем  $\bar{O} = \{(x_j; y_j), j \in [1:|\bar{O}|]\}$  (рисунок 3).

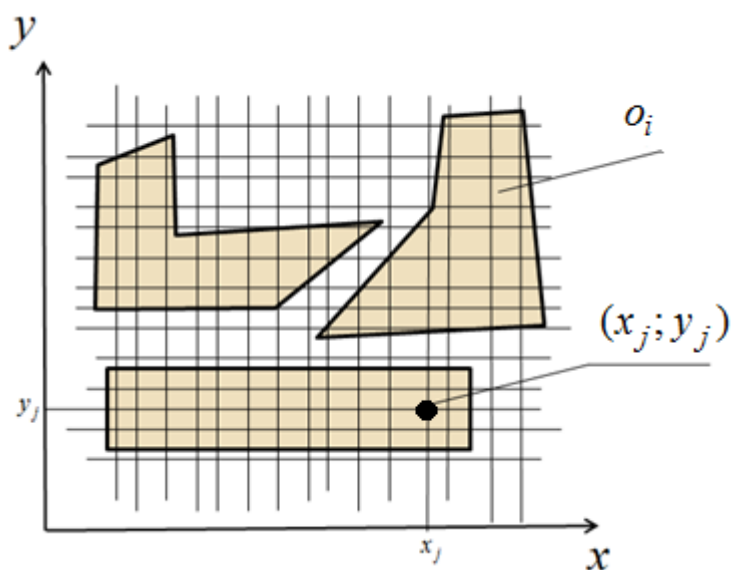


Рисунок 3. Пример дискретизации множества  $O$

В результате указанной дискретизации множество  $D$  допустимых значений вектора варьируемых параметров преобразуем в дискретное множество  $\bar{D}$  и задачу (3) сводим к однокритериальной дискретной задаче глобальной оптимизации вида

$$z(\bar{X}^*) = \min_{X \in \bar{D}} z(\bar{X}), \quad (4)$$

где  $\bar{X} = (\bar{H}^T, \bar{H}^R, N^T, N^C, |\hat{T}|, |\hat{R}|)$ ,  $\bar{H}^T \in \bar{O}$ ,  $\bar{H}^R \in \bar{O}$ . Заметим, что поскольку размерности векторов  $\bar{H}^T, \bar{H}^R$  равны  $|\hat{T}|, |\hat{R}|$  соответственно, размерность вектора  $\bar{X}$  меньше размерности вектора  $X$  и равна  $|\bar{X}| = 3|\hat{T}| + |\hat{R}| + |C| + 2$ .

Задача (4) относится к классу *NP*-сложных [27]. Решение задач данного класса производят точными и приближенными методами.

Точное решение задачи (4) в практически значимых задачах ПРЭ требует неприемлемо высоких вычислительных затрат в силу высокой размерности вектора варьируемых параметров  $X^*$  и большой мощности множества  $\bar{D}$  допустимых значений этого вектора [28].

Приближенные методы решения задачи (4) не гарантируют получение оптимального решения задачи, но обеспечивают получение эффективного (полиномиально сложного) решения, разумно близкого к оптимальному. Эти методы можно разделить на следующие четыре группы [29].

- Детерминированные методы, представляющие собой модификации соответствующих точных методов. Такая модификация, например, может заключаться в прерывании процесса вычислений на определенном шаге решения.

- Методы случайного поиска, отличительной особенностью которых является случайный характер перебора допустимых решений. К методам случайного поиска относят эволюционные методы и поведенческие методы оптимизации [29].

- Методы решения задач специальной структуры, примерами которых являются задача коммивояжера, задача размещения и т.д. [30].

- Эвристические методы, заключающиеся в применении различных эвристик, основанных на неформальных предположениях, специфичных для конкретной задачи [30].

## Заключение

В работе представлена математическая модель ПРЭ. На этой основе поставлена задача многокритериальной структурно-параметрической оптимизации ПРЭ, основной особенностью которой является переменная размерность вектора варьируемых параметров.

Обоснована целесообразность использования метода редукции указанной многокритериальной задачи к задаче однокритериальной оптимизации с помощью той или иной скалярной свертки. Поставлена соответствующая однокритериальная задача, представляющая собой задачу непрерывно-дискретно-целочисленного программирования.

Показана целесообразность преобразования последней задачи к задаче дискретного программирования на основе дискретной аппроксимации возможных областей строительства новых трансформаторных и распределительных подстанций. Поставлена соответствующая дискретная задача оптимизации ПРЭ.

Научная новизна работы заключается в предложенной математической модели ПРЭ и формализации задачи оптимизации ПРЭ в виде задачи многокритериальной структурно-параметрической оптимизации.

### Список литературы

1. Brown R.E. Electric Power Distribution Reliability. 2<sup>nd</sup> ed. Marcel Dekker, Inc., CRC Press, 2008. 423 p.
2. Willis H.L. Power Distribution Planning Reference Book. 2<sup>nd</sup> ed. Marcel Dekker, Inc., 2004. 1218 p.
3. Программное обеспечение САПР для проектирования электрических систем. Режим доступа: <http://www.autodesk.ru/adsk/servlet/home?siteID=871736&id=1096170> (дата обращения 01.04.2014).
4. SYME international – Software Systems Analysis Framework. Режим доступа: <http://www.cyme.com/software/psaf/> (дата обращения 01.04.2014).
5. Utility Design & GIS Software Electric, Gas, Water, Wastewater. Режим доступа: <http://www.bentley.com/en-US/Products/Bentley+Expert+Designer/> (дата обращения 01.04.2014).
6. Review of International Network Design Standards, Practices and Plant and Equipment Specifications. Contractor's Report to the DECC Emerging Energy Technologies Programme. KEMA Limited, 2009. P. 45-55.
7. IFI/LCNF Report. April 2010 to March 2011. For the licensed companies: Eastern Power Networks plc, London Power Networks plc, South Eastern Power Networks plc. UK Power Networks, 2011. 117 p.
8. Sumper A., Sudria A., Ferrer F. International Reliability Analysis in Distribution Networks. CITCEA Report for ENDESA RED. Spain, 2005. P. 32-36.
9. Kueng L., Schiesser H.-H., Cettou R., Continuity of Supply: Benchmarking Five Urban Electric Distribution Utilities in Switzerland // Proc. CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution. Vienna, 21-24 May 2007. P. 68-69.
10. CADprofi Electrical. Режим доступа: <http://www.cadprofi.com/main/ru/products/cadprofi-electrical> (дата обращения 01.04.2014).
11. DDS-CAD Electrical. Режим доступа: <http://www.dds-cad.net/products/dds-cad-electrical/> (дата обращения 01.04.2014).
12. Diaz-Dorado E., Cidras J., Miguez E. Application of Evolutionary Algorithms for the Planning of Urban Distribution Networks of Medium Voltage // IEEE Transactions on Power Systems. 2002. Vol. 17, no. 3. P. 879-884. DOI: [10.1109/TPWRS.2002.800975](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.800975)
13. Saiyi Wang, Jianmin Wang, Yinong Li. Study and Application of Decision-Making Support System for Urban Distribution Network Planning of Shanghai // CIRED 20th International Conference on Electricity Distribution. Prague, 8-11 June 2009. P. 264-267.

14. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во НЦЭНАО, 2006. 349 с.
15. Московская объединенная электросетевая компания. Годовой отчет. М., 2010. 247 с.
16. Ильичев Н.Б. Расчет и проектирование ВЛ, ОРУ и ВОЛС в среде EnergyCS Line // CADmaster. 2007. № 3. С. 12-16.
17. Ильичев Н., Долотов В., Мастраков Н. Опыт применения программного комплекса EnergyCS при проектировании электроэнергетических объектов в ОАО «Ивэлектронладка» // CADmaster. 2007. № 5. С. 56–58.
18. Воробьев С.П. Прирученная автоматизация, или как выполнить проект в Model Studio CS ЛЭП // Четвертая Российская научно-практическая конференция с международным участием «ЛЭП-2010 : проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 15-17 сентября 2010 г.): матер. 2010. С. 237-246.
19. Приказ Минэнерго России от 30.06.03 № 281 «Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем СО 153-34.20.118-2003». 2003.
20. Ананичева С.С., Калинин М.А. Практические задачи электрических сетей: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2012. 112 с.
21. Соловьев В.И. Методы оптимальных решений: учеб. пособие. М.: Финансовый университет, 2012. 364 с.
22. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: учеб. пособие. М.: МАКС Пресс, 2008. 197 с.
23. 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 01.04.2014).
24. Никонов О.Я., Подоляка О.А., Подоляка А.Н., Скакалина Е.В. Математические методы решения многокритериальной задачи о назначениях // Вестник ХНАДУ. 2011. № 55. С. 103-111.
25. Каменев Г.К., Лотов А.В., Рябиков А.И. Использование параллельных вычислений при аппроксимации многомерной границы Парето в задачах многокритериальной оптимизации // Пятая международная конференция «Параллельные вычисления и задачи управления» (Москва, 26-28 октября 2010 г.): сб. докл. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 241-264.
26. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретные задачи математического программирования // Итоги науки. Сер. Теория вероятности. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. 1966. М.: ВИНТИ, 1967. С. 59-110. [Discrete problems of mathematical programming]
27. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи: пер. с англ. М.: Мир, 1982. 466 с.

28. Коган Д.И. Динамическое программирование и дискретная многокритериальная оптимизация: учеб. пособие. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та, 2004. 150 с.
29. Ковалев М.М. Дискретная оптимизация (целочисленное программирование). Минск: Изд-во БГУ, 1977. 192 с.
30. 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.



**A mathematical model of urban distribution electro-network considering its future development**

# 05, May 2014

DOI: 10.7463/0514.0709781

A.P. Karpenko, I.A. Kuzmina

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

[apkarpenko@mail.ru](mailto:apkarpenko@mail.ru)[kuzminainna@yandex.ru](mailto:kuzminainna@yandex.ru)

A distribution urban power supply network (further, the power supply network) is the network of urban scale. Designed to transfer and distribute electric power it represents a set of transforming and distributional substations and power lines to connect them. We consider a problem of the prospective development of power supply network (PDPSN) as a task to define the ways for its optimum development in terms of configuration, equipment loads, parameters, etc., as well as from the point of view of need and terms to put into service the new objects of the power supply network.

The program systems represented in the market allow us to calculate parameters of power supply systems, network operating modes, to display power supply schemes, and to make technical documentation, but they do not support the CAD of optimum network topology taking into account factors of the prospective urban development.

A main objective of the work is development of mathematical model of the power supply network taking into account its prospective development. Based on this model the task is set to optimize the prospective power supply network development through the solving a problem of multi-criteria structural and parametrical optimization. Expediency is proved to use a method of reduction to the one-criteria task by means of this or that scalar convolution to solve this task.

The specified problem of one-criteria optimization of PDPSN represents a problem of continuous-discrete-integer programming. The paper proves its representation as a problem of discrete programming based on the discrete approximation of possible regions to construct new transforming and distributional substations.

---

**Publications with keywords:** [mathematical modeling](#), [multiobjective optimization](#), [perspective development](#)

**Publications with words:** [mathematical modeling](#), [multiobjective optimization](#), [perspective development](#)

---



## References

1. Brown R.E. *Electric Power Distribution Reliability*. 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., CRC Press, 2008. 423 p.
2. Willis H.L. *Power Distribution Planning Reference Book*. 2nd ed. Marcel Dekker, Inc., 2004. 1218 p.
3. Programmnoe obespechenie SAPR dlya proektirovaniya elektricheskikh system [CAD software for design of electrical systems]. Available at: <http://www.autodesk.ru/adsk/servlet/home?siteID=871736&id=1096170> , accessed 01.04.2014. (in Russian).
4. SYME international – Software Systems Analysis Framework. Available at: <http://www.cyme.com/software/psaf/> , accessed 01.04.2014.
5. Utility Design & GIS Software Electric, Gas, Water, Wastewater. Available at: <http://www.bentley.com/en-US/Products/Bentley+Expert+Designer/> , accessed 01.04.2014.
6. Review of International Network Design Standards, Practices and Plant and Equipment Specifications. Contractor's Report to the DECC Emerging Energy Technologies Programme. KEMA Limited, 2009, pp. 45-55.
7. IFI/LCNF Report. April 2010 to March 2011. For the licensed companies: Eastern Power Networks plc, London Power Networks plc, South Eastern Power Networks plc. UK Power Networks, 2011. 117 p.
8. Sumper A., Sudria A., Ferrer F. International Reliability Analysis in Distribution Networks. CITCEA Report for ENDESA RED. Spain, 2005, pp. 32-36.
9. Kueng L., Schiesser H.-H., Cettou R. Continuity of Supply: Benchmarking Five Urban Electric Distribution Utilities in Switzerland. *Proc. CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution*. Vienna, 21-24 May, 2007, pp. 68-69.
10. CADprofi Electrical. Available at: <http://www.cadprofi.com/main/ru/products/cadprofi-electrical> , accessed 01.04.2014.
11. DDS-CAD Electrical. Available at: <http://www.dds-cad.net/products/dds-cad-electrical/> , accessed 01.04.2014.
12. Diaz-Dorado E., Cidras J., Miguez E. Application of Evolutionary Algorithms for the Planning of Urban Distribution Networks of Medium Voltage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 879-884. DOI: [10.1109/TPWRS.2002.800975](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2002.800975)
13. Saiyi Wang, Jianmin Wang, Yinong Li. Study and Application of Decision-Making Support System for Urban Distribution Network Planning of Shanghai. *CIRED 20th International Conference on Electricity Distribution*. Prague, 8-11 June, 2009, pp. 264-267.

14. Faybisovich D.L., ed. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey* [Handbook of electrical networks designing]. Moscow, NTsENAO Publ., 2006. 349 p. (in Russian).
15. Moskovskaya ob"edinennaya elektrosetevaya kompaniya. Godovoy otchet [Moscow United Electric Grid Company. Annual report]. Moscow, 2010. 247 p. (in Russian).
16. Il'ichev N.B. [Calculation and design of overhead lines, outdoor switchgear and fiber-optic communication lines in EnergyCS Line medium]. *CADmaster*, 2007, no. 3, pp. 12-16. (in Russian).
17. Il'ichev N., Dolotov V., Mastrakov N. [Experience of application of software package EnergyCS at designing of electric power facilities in JSC "Ivelektronaladka"]. *CADmaster*, 2007, no. 5, pp. 56–58. (in Russian).
18. Vorob'ev S.P. [Tamed automation or how to perform project in Model Studio CS PL]. *Chetvertaya Rossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "LEP-2010 : proektirovanie, stroitel'stvo, opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress": materialy* [Proc. of the Fourth Russian scientific and practical conference with international participation "PTL-2010: design, construction, operation experience and scientific and technical progress"], Novosibirsk, 15-17 September, 2010, pp. 237-246. (in Russian).
19. Order of the Ministry of Energy of Russia "Guidelines for designing power system development CO 153-34.20.118-2003" of June 30, 2003 No. 281. 2003. (in Russian).
20. Ananicheva S.S., Kalinkina M.A. *Prakticheskie zadachi elektricheskikh setey* [Practical tasks of electric networks]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2012. 112 p. (in Russian).
21. Solov'ev V.I. *Metody optimal'nykh reshenii* [Method for finding optimal solution]. Moscow, Finansovyĭ universitet Publ., 2012. 364 p. (in Russian).
22. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Mnogokriterial'nye zadachi prinyatiya reshenii* [Multicriteria decision making problems]. Moscow, MAKS Press, 2008. 197 p.
23. 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.bmstu.ru/en/doc/141623.html> , accessed 01.04.2014. (in Russian).
24. Nikonov O.Ya., Podolyaka O.A., Podolyaka A.N., Skakalina E.V. [Mathematical methods for solving multicriteria assignment problem]. *Vestnik KhNADU*, 2011, no. 55, pp. 103-111. (in Russian).
25. Kamenev G.K., Lotov A.V., Ryabikov A.I. [Use of parallel computing in the approximation of multidimensional Pareto frontier in multicriteria optimization problems]. *Pyataya*

- mezhdunarodnaya konferentsiya "Parallel'nye vychisleniya i zadachi upravleniya": sb. dokl.* [Proc. of the Fifth International Conference "Parallel Computations and Control Problems"], Moscow, 26-28 October, 2010. Moscow, IPU RAN Publ., 2010, pp. 241-264. (in Russian).
26. Korbut A.A., Finkel'shteyn Yu.Yu. [Discrete problems of mathematical programming]. *Itogi nauki. Ser. Teoriya veroyatnosti. Matematicheskaya statistika. Teoreticheskaya kibernetika* [Results of science. Ser. Probability theory. Mathematical statistics. Theoretical cybernetics], 1966. Moscow, VINITI Publ., 1967, pp. 59-110. (in Russian).
27. 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.).
28. Kogan D.I. *Dinamicheskoe programmirovaniye i diskretnaya mnogokriterial'naya optimizatsiya* [Dynamic programming and discrete multicriteria optimization]. N.Novgorod, NSU Publ., 2004. 150 p. (in Russian).
29. Kovalev M.M. *Diskretnaya optimizatsiya (tselochislennoe programmirovaniye)* [Discrete optimization (integer programming)]. Minsk, BSU Publ., 1977. 192 p. (in Russian).
30. Sigal I.Kh., Ivanova A.P. *Vvedeniye v prikladnoye diskretnoye programmirovaniye: modeli i vychislitel'nye algoritmy* [Introduction to applied discrete programming: models and computational algorithms]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 238 p. (in Russian).