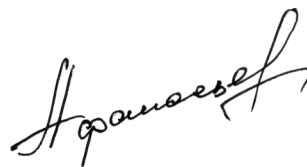


На правах рукописи



АФАНАСЬЕВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ГОРОДСКИХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ
КОМПЬЮТЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ
ПЛОТНОСТИ НАГРУЗКИ**

05.09.03– Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (КнАГТУ) на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Научный руководитель:

Гринкруг Мирон Соломонович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Общей
физики» ФГБОУ ВПО
«Комсомольский-на-Амуре
государственный технический
университет»

Официальные оппоненты:

Савина Наталья Викторовна,
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой «Энергетики»
ФГБОУ ВПО «Амурский
государственный университет»
г. Благовещенск

Дементьев Юрий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
«Электропривода и
электрооборудования»
«Национальный исследовательский
Томский политехнический
университет» г. Томск

Ведущая организация:

**ФГБОУ ВПО «Дальневосточный
государственный университет
путей сообщения» г. Хабаровск**

Защита диссертации состоится 17 октября 2014 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д 212.092.04 в ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201-3, E-mail: kerapu@knastu.ru

С диссертацией можно ознакомиться на сайте по адресу: <http://www.knastu.ru/dissertationannounces.html> и в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Автореферат разослан «__» августа 2014 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять в адрес Ученого совета университета.

Ученый секретарь



В.И. Суздорф

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Данное исследование посвящено модернизации действующих и разработке новых методов и подходов к решению задачи параметрической технико-экономической оптимизации городских систем электроснабжения (СЭС) низкого напряжения (НН).

В настоящее время математическую основу для решения задач проектирования, реконструкции и планирования работы, городских СЭС составляют модели, базирующиеся на алгоритмах теории графов.

Данные модели не учитывают эффектов взаимодействия объектов СЭС с окружающей средой, архитектурными, топологическими и экономико-географическими особенностями рассматриваемого региона.

Для действующих моделей СЭС, плотность нагрузки является одним из ключевых критериев, на основе которого рассчитываются базовые параметры элементов сетей электроснабжения (ЭС), однако в них не учитывается неоднородность плотности нагрузки, как по пространственным координатам, так и по абсолютным значениям.

Обозначенные выше проблемы ставят вопрос о необходимости модернизации существующих методов и подходов к задаче параметрической оптимизации городских систем электроснабжения.

В качестве базовых инструментов для решения задач параметрической оптимизации выступают современные геоинформационные системы (ГИС) и технологии, методы компьютерной геометрии, алгоритмы дискретной математики и математической морфологии.

Объект исследования – городская система электроснабжения низкого напряжения 0.38 кВ.

Предмет исследования – методы и подходы к осуществлению параметрической технико-экономической оптимизации городских систем электроснабжения с учетом неоднородности плотности нагрузки.

Целью диссертационной работы

Модернизация действующих и разработка новых подходов к параметрической технико-экономической оптимизации городских систем ЭС НН с использованием инструментария ГИС технологий, компьютерной геометрии и математической морфологии, учитывающих неоднородность плотности нагрузки.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих подходов и методик выбора параметров элементов городских сетей ЭС на соответствие требованиям, предъявляемым к СЭС, в современных экономических условиях и определены основные направления разработки новых подходов к задаче параметрической оптимизации городских систем ЭС НН.

2. Получены и обработаны данные по нагрузкам городской сети ЭС НН используемой в качестве экспериментальной. Проанализированы и структу-

рированы ГИС данные потребителей электрической энергии (ЭЭ), центров питания (ЦП) и понижающих трансформаторных подстанций (ТПП).

3. Выведены и обоснованы соотношения для коэффициентов неоднородности плотности нагрузки при определении оптимальных технико-экономических параметров элементов СЭ.

4. Разработан программный модуль, осуществляющий построение обычных и взвешенных диаграмм Вороного, определены оптимальные зоны ответственности трансформаторных подстанций (ТП) в экспериментальной области.

5. С помощью оптимизационных процедур, использующих модернизированный вариант критерия приведенных затрат, получена матрица кумулятивных дистанций с помощью которой определены оптимальные технико-экономические параметры элементов городской сети ЭС НН.

6. Сформулированы рекомендации по применению предлагаемой методики при выполнении работ по параметрической оптимизации городских систем электроснабжения.

Основная идея работы – заключается в усовершенствовании принципов параметрической технико-экономической оптимизации городских систем электроснабжения на основе методов компьютерной геометрии, алгоритмов обработки сигналов, что позволяет более полно учесть региональные особенности области проектирования/реконструкции сети ЭС и уменьшить уровень неопределенности и неполноты исходных данных.

Методы исследования

Соотношения для расчета коэффициента неоднородности плотности нагрузки получены на основе методов теории информации и математической статистики. Анализ изображений плотности нагрузки выполнялся с помощью алгоритмов цифровой обработки изображений. При определении областей ответственности ТП использовались алгоритмы компьютерной геометрии и математической морфологии. Для определения оптимальных параметров элементов сетей ЭС НН применялись методы непрерывной и дискретной оптимизации модернизированной целевой функции, описывающей относительные приведенные затраты на создание и эксплуатацию элементов сети ЭС, а также методы поиска оптимальных путей на графах. Общей базой для сбора информационных данных, структурирования, анализа и отображения служила программная среда компьютерной математики –MATLAB.

Научная новизна работы определяется следующими полученными результатами:

1. Соотношениями для учета неоднородности плотности нагрузки при осуществлении параметрической оптимизации городских систем ЭС.

2. Методикой определения зон ответственности ТП и ЦП, их параметров и дескрипторов определяемых на основе обычных и взвешенных диаграмм Вороного.

3. Разработанной информационной структурой в виде кумулятивной матрицы геодезических дистанций и способе ее применения для определения оптимального местоположения ТП.

4. Разработанным подходом и его программной реализацией для определения оптимальных, с технико-экономической точки зрения, трасс для прокладки кабельных линий (КЛ).

Основные положения выносимые на защиту:

1. Математическая модель городской СЭ НН, учитывающая неоднородность плотности нагрузки при выполнении параметрической оптимизации элементов сети.

2. Расчетные выражения для учета неоднородности плотности нагрузки, как по пространственным координатам, так и по абсолютным значениям;

3. Методика и алгоритмы определения зон ответственности ТП на основе обычных и взвешенных диаграмм Вороного.

4. Метод определения оптимального местоположения ТП как координат минимального элемента в кумулятивной матрице геодезических дистанций.

5. Рекомендации для применения, разработанной в исследовании, параметрической оптимизации городских СЭС.

Практическая ценность работы заключается в разработке основных принципов и подходов для практического осуществления параметрической оптимизации элементов городских сетей ЭС НН с учетом неоднородности плотности нагрузки на базе комплексного использования оптимизационных процедур с применением ГИС и методов компьютерной геометрии, что позволяет:

- провести качественный анализ и получить количественные оценки технико-экономических параметров действующих и/или проектируемых городских систем электроснабжения НН;

- получить оптимальную, по технико-экономическим параметрам, топологическую структуру сети ЭС в рассматриваемой области;

- разработать комплекс мер и рекомендаций по выбору значений параметров элементов: сечений жилы кабельных линий, мощности трансформаторов и числа подключений к ним;

- определить наиболее энергоемкие области и разработать рекомендации по перегруппировке потребителей ЭЭ по зонам ответственности ТП с целью равномерного распределения нагрузки и управлению режимами функционирования сети ЭС в наиболее эффективном технико-экономическом режиме.

Основные результаты диссертационной работы были получены автором в ходе исследований, выполняющихся в рамках НИР «Автономные системы децентрализованного энергообеспечения (кластерные энергосберегающие системы выработки, транспорта и преобразования тепловой и электрической энергии)» программа: стратегия ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» и опубликованы в научных изданиях.

Апробация работы. Результаты и выводы диссертационной работы докладывались и получили одобрение на:

- международной научно-технической конференции "Электротехнические комплексы и системы" г. Комсомольск-на-Амуре 2010 г.

– международной научно-технической конференции "Энергоэффективность и энергосбережение" г. Благовещенск 2011 г.

– международной научной конференции "Хейлунцзян–Приамурье" г. Биробиджан 2013 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ: 7 статей и тезисов, 1 программа для ЭВМ, в том числе 2 статьи в журнале «Электротехнические комплексы и системы», включенном в Перечень ВАК РФ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы и трех приложений. Общий объем диссертации 185 страниц машинописного текста, в том числе 147 страниц основного текста, 59 рисунков и 14 таблиц, списка использованных источников из 103 наименований, 3 приложения на 38 страницах.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность кандидату технических наук, Ткачевой Юлии Ильиничне за оказанную помощь в планировании работы, обсуждении научных результатов и большую консультативную работу при написании и предоставлении данной работы к защите.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено краткому описанию действующих подходов к параметрической оптимизации городских систем электроснабжения НН. Проанализированы основные допущения данных методов. Отмечены их достоинства и недостатки. Определены основные направления модернизации существующих подходов к параметрической оптимизации СЭС.

Сформулированы цель, задачи и методы исследования.

В первой главе диссертации рассмотрена общая постановка задачи выбора параметров элементов СЭ, показано, что у различных исследователей наблюдается единый методологический подход,

Дан краткий обзор и анализ литературных источников, в которых рассматриваются различные варианты выполнения параметрической оптимизации городских СЭС НН.

Введена и рассмотрена модернизированная безразмерная целевая функция (1) приведенных затрат на основе которой определяются оптимальные технико-экономические параметры элементов СЭС НН:

$$Z = \frac{K + \sum_{t=1}^T \frac{Q_t}{(1+k_{dr})^{t-1}}}{c \cdot \sum_{t=1}^T W_{an} \cdot \frac{(1+k_{wc})^{t-1}}{(1+k_{dr})^{t-1}}} + \frac{\sum_{t=1}^T W_{ls} \cdot \frac{(1+k_{wc})^{t-1}}{(1+k_{dr})^{t-1}}}{\sum_{t=1}^T W_{an} \cdot \frac{(1+k_{wc})^{t-1}}{(1+k_{dr})^{t-1}}}, \quad (1)$$

здесь: K – капитальные вложения, руб., Q_t – затраты в году t на обслуживание сети, руб., W_{ls} – потери электроэнергии в элементах сети в году t , кВт·ч, c – стоимость электроэнергии в начальном году, руб./кВт·ч, W_{an} – суммарная энергия, переданная потребителям в году t кВт·ч, k_{wc} – коэффициент роста цены на электроэнергию, k_{dr} – коэффициент приведения разновременных затрат.

Показано, что задача определения параметров элементов СЭС НН является оптимизационной задачей технико-экономической природы.

Проанализированы, действующие подходы к определению местоположения ТП (2), числа отходящих от ТП линий НН (4) и мощности трансформаторов (3) в них

$$X_{TS} = \sum_{i=1}^n S_i x_i / \sum_{i=1}^n S_i ; Y_{TS} = \sum_{i=1}^n S_i y_i / \sum_{i=1}^n S_i , \quad (2)$$

здесь: S_i, x_i и y_i – полная мощность и координаты i – той нагрузки соответственно, X_{TS}, Y_{TS} – координаты центров нагрузок, кандидаты на размещение ТП.

Установлено, что соотношения:

$$S_{TS} = 1.45 \cdot \sqrt[3]{\sigma^2} \quad (3)$$

и

$$N_{TS} = 1.65 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{\sigma^2} \quad (4)$$

получены исходя из энергетических потребностей середины прошлого века.

Как показывают соотношения (3) и (4), фактор плотности нагрузки – σ непосредственно влияет на значения параметров элементов сети.

Рассмотрены основные подходы к определению сечений КЛ и воздушных линий (ВЛ) для различных напряжений. Отмечено, что выбор сечений по экономической плотности тока, не соответствует текущей экономической ситуации.

Выполнен обзор существующих методов и подходов к определению нагрузок различных для типов потребителей.

Рассмотрены варианты косвенного учета неоднородности плотности нагрузки с помощью регрессионных зависимостей.

Рассмотрен вопрос выбора характерного линейного параметра – λ_0 , в пределах которого $\sigma = \text{const}$. Сделан вывод, что величина λ_0 соответствует технолого-экономическому радиусу сети данного напряжения. Для сети НН $\lambda_0 \approx 0.3$ км. Отмечено, что данный радиус уменьшается с увеличением числа потребителей ЭЭ на единицу площади.

Во второй главе представлен технико-экономический анализ распределительной сети ЭС города с малоэтажной застройкой на примере города Биробиджана.

Анализ парка ТП городской сети НН выполнен на основе замеров в период зимнего максимального энергопотребления. Определены коэффициенты нагрузки трансформаторов.

Сделан вывод о слабой загруженности городского парка ТП, что приводит к увеличенным потерям холостого хода. Сопоставление полученных данных с данными города Комсомольск-на-Амуре, показало, что коэффициент корреляции находится на уровне $R_{corr} = 0.97$, что свидетельствует об общей закономерности в распределениях трансформаторов по коэффициентам загрузки.

С помощью инструментария ГИС получено распределение $\sigma(x,y)$ по пространственным координатам и абсолютным значениям (рис. 1).

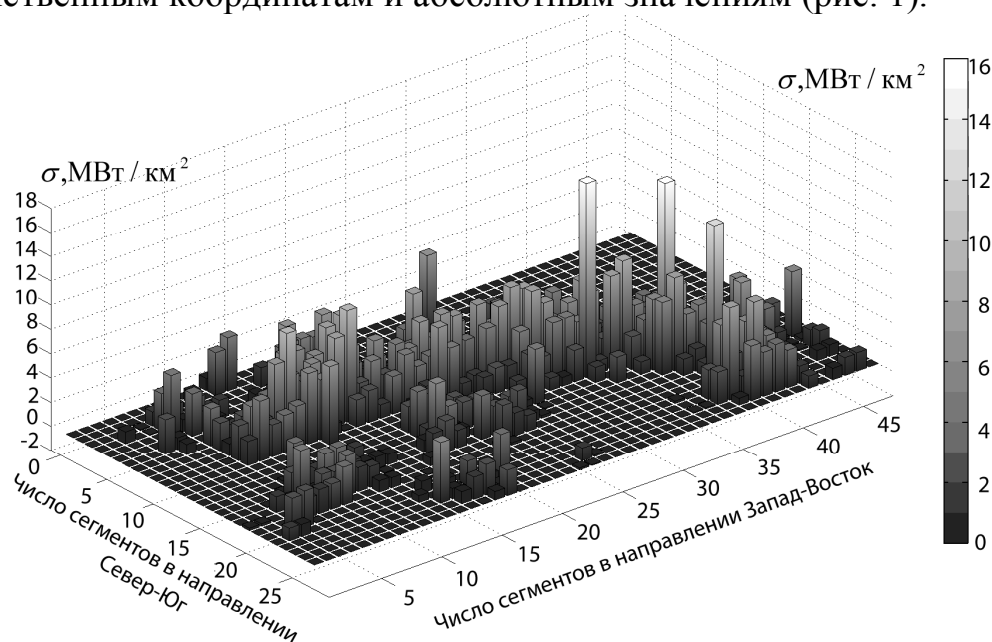


Рис. 1 – Распределение плотности нагрузки по пространственным координатам и абсолютным значениям (МВт/км^2).

Для анализа пространственных графиков $\sigma(x,y)$ использовались алгоритмы цифровой обработки сигналов. С помощью пороговой обработки $\sigma(x,y)$ выполнена сегментация карты плотности нагрузки (рис. 2).

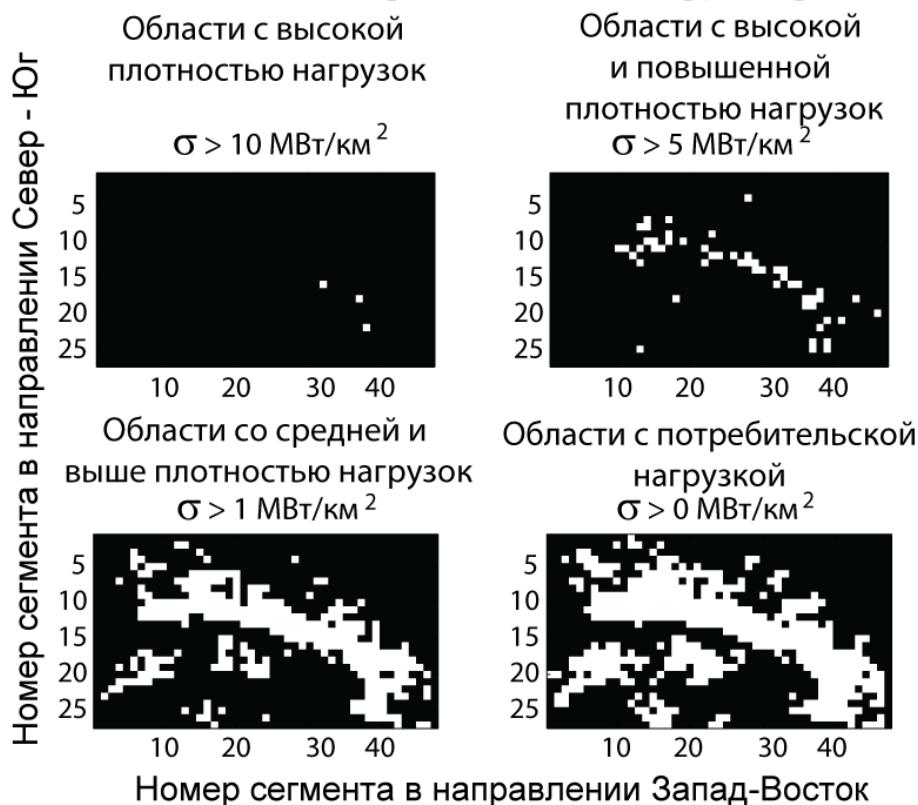


Рис. 2 – Сегментация плотности нагрузки на 4 зоны по абсолютным значениям σ .

По результатам сегментации получены предварительные выводы о топологии, иерархии напряжений и особенностям нагрузки в регионе.

Анализ сегментов выполнялся на основе скелетонизации двумерных форм $Sk(X) = \bigcup_{\rho>0} \bigcap_{\mu>0} [(X \ominus \rho B) - (X \ominus \rho B) \circ \mu \bar{B}]$, где $\ominus$ и $\circ$ морфологические операции эрозии и открытия соответственно.

Скелетон (рис. 3) служит образом графа сети ЭС, и на его основе проведена оценка коэффициентов ветвления k_{br} , распределения нагрузки k_L .

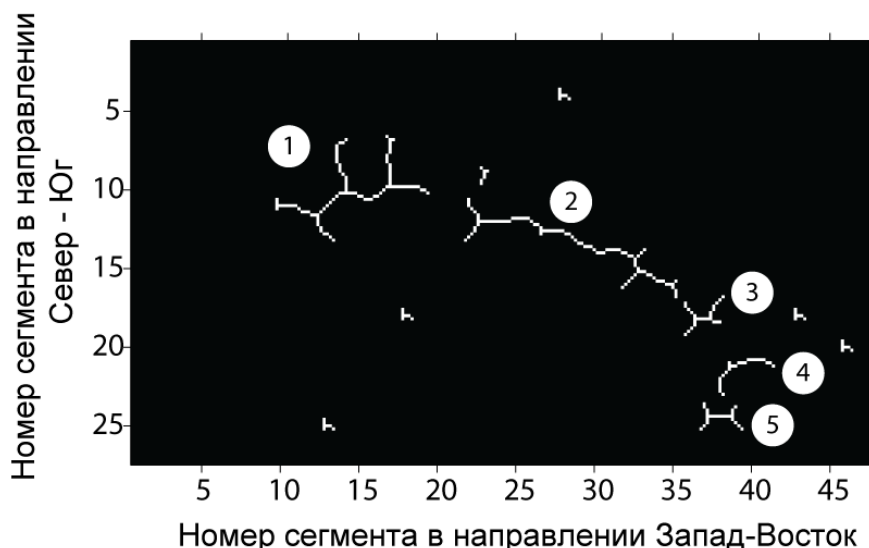


Рис. 3 – Скелетон для области с $\sigma \geq 5$ МВт/км².

Из выражений для расчета коэффициентов ветвления $k_{br,A} = \frac{6a + k^2(n+1)(2n+1)}{3k(2 + kn(n+1))}$ схем типа А (рис. 5*) и $k_{br,B} = \frac{2n^2 + n(6m^2 - 3) + 1}{3n(2m^2 + n - 1)}$ типа В, находятся коэффициенты разветвленности СЭ. Здесь: n – количество участков разбиения фидера, k – количество ответвлений в узле, a – количество тупиковых ветвей, m – количество лучей.

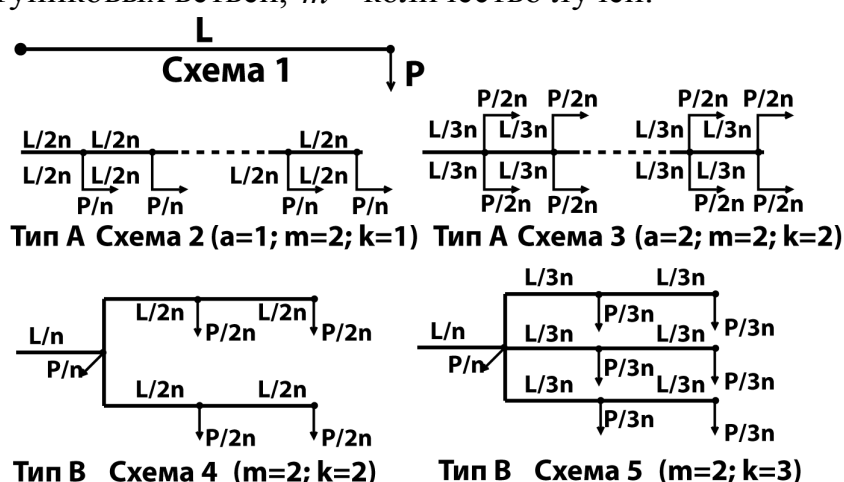


Рис. 5 – Варианты схем А и В для оценки коэффициента ветвления сети.

* Соотношения для k_{br} и изображение на рис. 5 взяты из Воротицкий В.Э., Калинкин М.А. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Учебно-методическое пособие. 3-е стереотип. изд. – М.: ИПК госслужбы, 2003. – 64 с.

В третьей главе рассмотрены традиционные подходы к сегментации областей с потребительской нагрузкой зонами ответственности ТП, на основе которых получены соотношения (3) и (4) для параметров элементов городских систем электроснабжения НН. В качестве основных моделей рассматриваются модели В.К. Плюгачева (покрытие равномерной квадратной сеткой) и модель равномерным гексагональным покрытием. Делается вывод об ограниченности применения данных моделей, так как они предполагают размещение потребителей ЭЭ в узлах правильных геометрических форм.

В качестве альтернативы предлагается модель зон ответственности ТП на основе обычных и взвешенных диаграмм Вороного.

Обычные диаграммы Вороного определяются как множество точек, для которых выполняется: $V(P_i) = \{x \in V(P_i) \mid d(x, P_i) \leq d(x, P_j), j = 1, 2, \dots, n, j \neq i\}$, здесь $d(x, P_i)$ обозначает Евклидову дистанцию между точкой x и P_i – точкой из контрольного множества P , и $P_i \neq P_j, i \neq j, i, j = \{1, 2, \dots, n, i \neq j\}$.

В контексте данного исследования, множество $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ это местоположения трансформаторных подстанций на плоскости, а множество x – местоположения потребителей ЭЭ. Для городов, кроме Евклидовой метрики, характерна также Манхэттенская метрика.

Взвешенные диаграммы Вороного для точек $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, $V(P_i, w_i) = \{x \in V(P_i, w_i) \mid w_i d(x, P_i) \leq w_j d(x, P_j), j = 1, 2, \dots, n, j \neq i\}$ w_i – вес (5) P_i .

Диаграммы Вороного, по отношению к рассматриваемым задачам, обладают следующими важными свойствами:

- учитывают неоднородность плотности нагрузки с помощью весов w_i (5);
- содержат в себе традиционные модели как области с $\sigma = const$;
- обладают свойствами глобальной устойчивости по отношению к локальным изменениям в структуре;

Учет неоднородности σ на основе взвешенных диаграмм Вороного производится с помощью относительных весовых коэффициентов w_i :

$$w_i = (\sigma_i / \bar{\sigma})^{-m}, \quad (5)$$

здесь: m – параметр первоначального приближения, равный 1/3 для модели В.К. Плюгачева и 1/2 для равномерного гексагонального покрытия; $\sigma_i = S_i / A_i$ – плотность нагрузки i - того сегмента; $\bar{\sigma} = \sum_i S_i / A_{reg}$ – средняя, плотность нагрузки.

Для получения диаграмм Вороного с весом (5) необходимо определить значения σ в зонах действия ТП. Для городских кварталов, пространственное распределение потребителей ЭЭ близко к прямоугольной топологии, и σ определяется из модели В.К. Плюгачева. Для произвольного распределения нагрузки предпочтительнее модель с гексагональным покрытием.

В модели В.К. Плюгачева, оптимальный радиус зоны ответственности ТП: $R_{opt} = k_{\sigma P} \cdot \sigma^{-1/3}$, где $k_{\sigma P} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot C_{TS} \cdot j_{ec} \cdot \cos \varphi \cdot c_{TS}}{k_{br} \cdot (b \cdot c_{0.38} + 3 \cdot j_{ec}^2 \cdot \rho \cdot c \cdot \tau \cdot 10^3)}}$.

В модели с равномерным гексагональным покрытием: $R_{opt} = k_{\sigma H} \cdot \sigma^{-1/2}$,
здесь $k_{\sigma H} = 0.62 \cdot \sqrt{n \cdot \beta \cdot S / k_{nc}}$.

С целью количественного анализа карт плотности нагрузки было получено выражение для коэффициента неоднородности $\sigma - k_H$.

Так как карта $\sigma(x, y)$ – двумерный цифровой сигнал, то мерой пространственной неоднородности служит относительная энтропия Шеннона:

$$E(A)_r = -(1 / \log_2 n) \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i \log_2 \omega_i, \quad (6)$$

здесь $\omega_i = A_i / \sum_{i=1}^n A_i$ – доля i -того сегмента взвешенной диаграммы Вороного.

Неоднородность плотности нагрузки по абсолютным значениям характеризуется коэффициентом вариации плотности нагрузки:

$$\nu = (1/\bar{\sigma}) \cdot \sqrt{(1/n) \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}. \quad (7)$$

Используя соотношения (6) и (7) получаем выражение для эффективной плотности нагрузки:

$$\sigma_{eff} = k_H \bar{\sigma} = (1 + E_r \nu) \bar{\sigma}. \quad (8)$$

Для исследуемого района города была произведена процедура сегментации на взвешенные полигоны Вороного (рис. 7 маркером «звезда» показаны центры потребительских нагрузок).

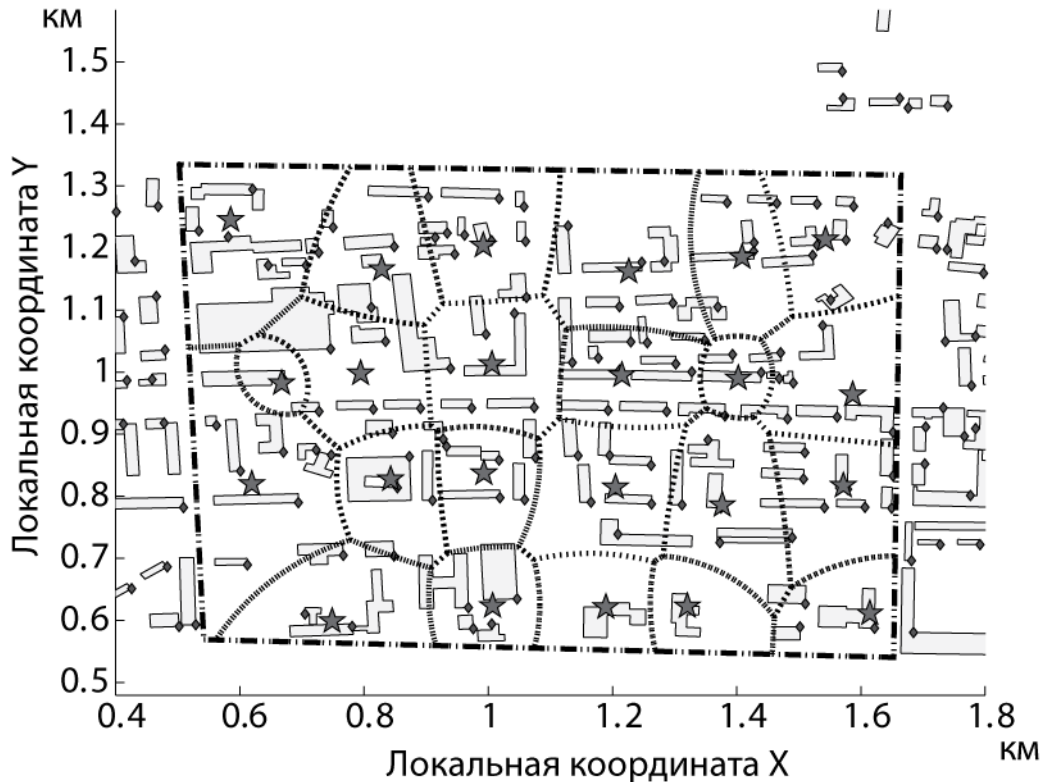


Рис. 7 – Сегментация региона на взвешенные диаграммы Вороного

В результате сегментации на взвешенные полигоны Вороного, произошла перегруппировка потребителей ЭЭ по зонам ответственности, с

уменьшением значения коэффициента вариации плотности нагрузки – v (7), что является признаком более равномерного распределения нагрузки по трансформаторным подстанциям в регионе исследования.

Для определения оптимальных параметров КЛ и ТП с помощью целевой функции Z (1) была получена целевая функция относительных, приведенных удельных затрат – z_0^{cl} характеризующая удельные затраты на 1 м. КЛ.

$$z_0^{cl} = \frac{c_0^{cl} + 6.55 \cdot 10^{-3} \cdot c_{ls} \cdot r_0 \cdot \sum_{t=1}^T \left(\frac{P_{\max}}{U_n} \right)^2 \cdot \left(\frac{1+k_{wc}}{1+k_{dr}} \right)^{t-1}}{c \cdot \sum_{t=1}^T P_{\max} \cdot \tau_{\max} \cdot \left(\frac{1+k_{wc}}{1+k_{dr}} \right)^{t-1}}, \quad (9)$$

здесь c_{ls} – стоимость потерь электроэнергии, определяется из (13).

Из значений z_0^{cl} по каждой нагрузке, для каждого квадратного метра, исследуемой области формируется матрица удельных затрат Z_0^{cl} (9) столбцы которой локальные X координаты, а строки Y координаты. Шаг дискретизации равен 1 м.:

$$Z_0^{cl} = \begin{bmatrix} z_0^{cl}(1,1) & z_0^{cl}(1,2) & \dots & z_0^{cl}(1,n) \\ z_0^{cl}(2,1) & z_0^{cl}(2,2) & \dots & z_0^{cl}(2,n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_0^{cl}(k,1) & z_0^{cl}(k,2) & \dots & z_0^{cl}(k,n) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

На Рис. 8 показана матрица Z_0^{cl} (10), для сегмента взвешенной диаграммы Вороного, в оттенках серого цвета, каждому оттенку соответствует определенное значение z_0^{cl} (9), 1 пиксель на изображении соответствует 1 м².



Рис. 8– Изображение матрицы значений Z_0^{cl}

Матрица Z_0^{cl} служит весовой матрицей для определения элементов матрицы геодезических дистанций $D_{i,G}^{cl}$ и оптимальных маршрутов КЛ.

Элементами матрицы геодезических дистанций $D_{i,G}^{cl}$ являются затраты на прокладку кабеля от точки с координатами ВРУ i -того потребителя:

$$D_{i,G}^{cl} = \begin{bmatrix} d_{i,G}^{cl}(1,1) & d_{i,G}^{cl}(1,2) & \dots & d_{i,G}^{cl}(1,n) \\ d_{i,G}^{cl}(2,1) & d_{i,G}^{cl}(2,2) & \dots & d_{i,G}^{cl}(2,n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i,G}^{cl}(k,1) & d_{i,G}^{cl}(k,2) & \dots & d_{i,G}^{cl}(k,n) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Из (11) формируется кумулятивная карта: $D_G^{cl} = \sum_i D_{i,G}^{cl}$.

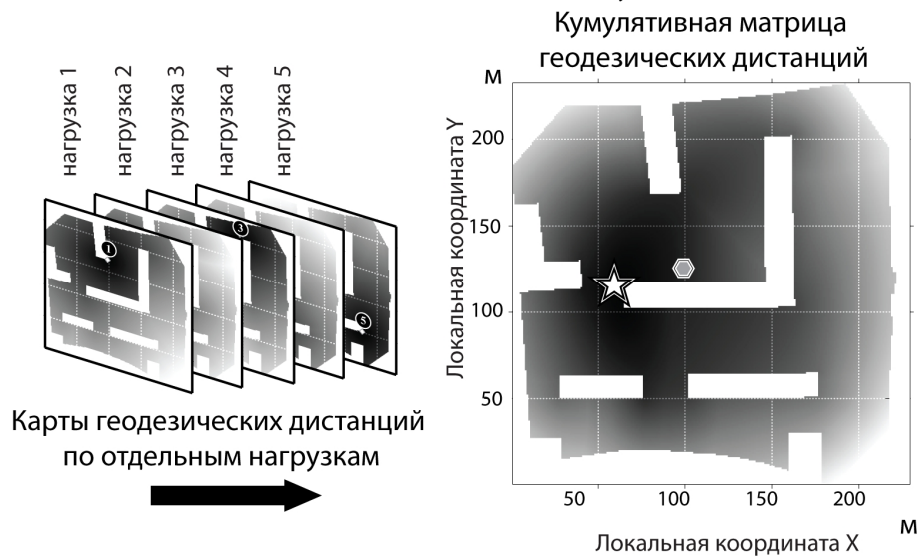


Рис. 9. – Карты $D_{i,G}^{cl}$ отдельных нагрузок и кумулятивная карта D_G^{cl} .

Наиболее затратные участки отмечены светлым оттенком серого, маркером «звезда» отмечена точка минимума как оптимальных координат ТП. По D_G^{cl} находятся оптимальные маршруты трасс прокладки КЛ. (рис. 10).

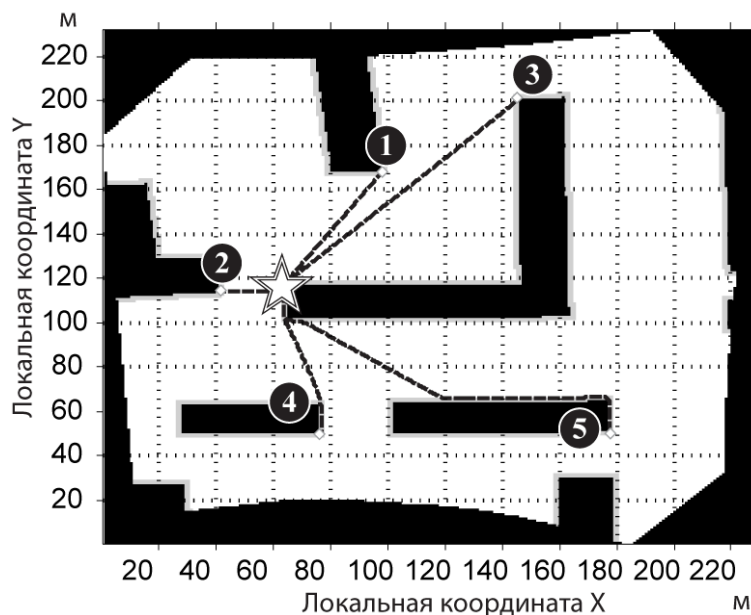


Рис.10. – Оптимальные траектории для прокладки КЛ.

Полученные маршруты проверяются на критерий падения напряжения. При не соответствии данному критерию, выбирается следующее сечение из номенклатурного ряда и производится перерасчет матрицы Z_0^{cl} . Процедура итеративно повторяется, пока выбранное сечение не будет удовлетворять критерию.

На рис. 11 представлена блок-схема алгоритма параметрической оптимизации городских систем ЭС, которая в графическом виде резюмирует предложенный в исследовании подход.

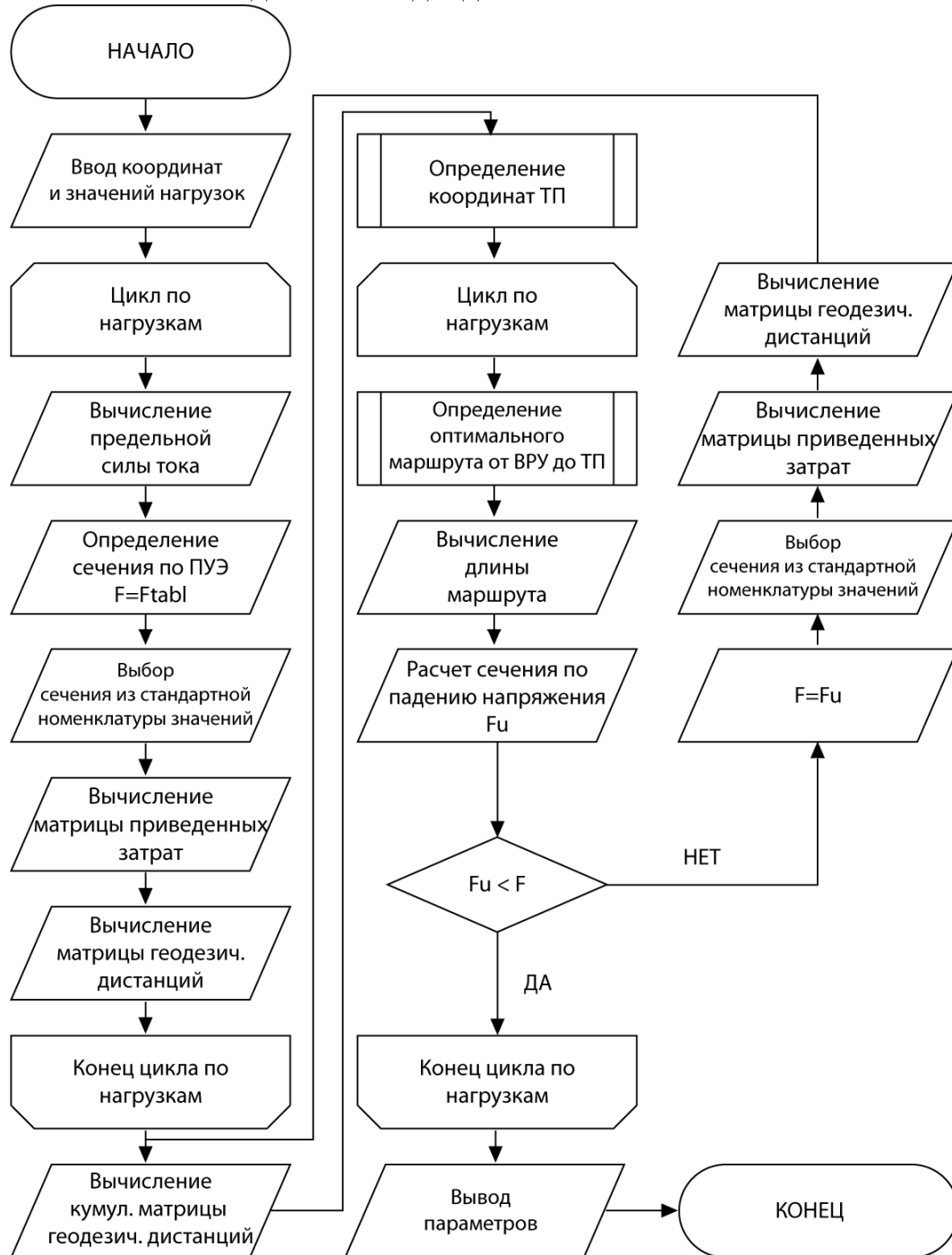


Рис. 11. – Блок – схема предложенного алгоритма.

В четвертой главе рассматриваются вопросы сравнительного технико-экономического анализа для выборочной совокупности параметров элементов и экономических показателей для действующей сети ЭС и синтетических

вариантов сетей полученных на основе подходов и решений, разработанных в исследовании.

Определены параметры для анализа на период эксплуатации сети:

- суммарная мощность ТП характеристика энерговооруженности;
 - потери ЭЭ в кабельных линиях;
 - средняя площадь зоны ответственности ТП;
 - суммарная длина кабельных линий;
 - средняя длина кабельных линий;
 - суммарное сечение головных участков;
 - процент затрат на прокладку кабеля по отношению к рабочему варианту;
 - суммарные затраты на сооружение КЛ и эксплуатационные расходы.
- Обоснован и выполнен расчет капитальных затрат для монтажа КЛ в условиях Дальневосточного региона.

Расчет потерь электроэнергии, по рассматриваемому региону, выполнялся на основе выражения для расчета по обобщенным данным:

$$\Delta W_{0.4} = k_{0.4} \cdot \left(\frac{W_{0.4}}{N} \right)^2 \cdot \frac{(1 - d_{ld})^2 \cdot (1 + tg^2 \varphi) \cdot L_{eqv}}{F_{hm} \cdot D} \cdot \frac{1 + 2 \cdot k_{fill}}{3 \cdot k_{fill}}, \quad (12)$$

здесь: F_{hm} – среднее сечение головного участка, мм²; d_{ld} – доля электроэнергии, потребляемая на расстоянии двух линейных ответвлений от ТП, по отношению к суммарному отпуску в сеть 0.4 кВ.

Значения $W_{0.4}$ рассчитывались по результатам 1593 замеров тока в фидерах ТП в период зимнего годового максимума нагрузки, оценка $W_{0.4}$ для других сезонов была получена с помощью поправочного коэффициента, учитывающего сезонные колебания нагрузки: $\lambda_{rel} = P/P_{max} = A + B \cdot \sin(C \cdot t + D)$, здесь A , B , C , и D величины, характеризующие сезонную неравномерность в потреблении электрической энергии. Для Дальневосточного региона среднее значение величины λ_{rel} равно 0.7.

Коэффициент $k_{0.4}$ в (12) рассчитывается по формуле: $k_{0.4} = k_u \cdot (7.78 - 2.67 \cdot d_{ld} - 1.48 \cdot d_{ld}^2) \cdot (1.25 + 0.14 \cdot d_{ld})$, где $k_u = 1$ для линии 0.4/0.23 кВ и 3 для линии 220/127 В.

Удельные затраты на покрытие потерь ЭЭ рассчитывались по формуле:

$$c_{ls,k} = \varphi_k + \psi_k / h_k, \quad (13)$$

где φ_k и ψ_k – коэффициенты для элементов сети; h_k – показатель режима нагрузки.

Усредненные показатели φ_k и ψ_k , были приведены к ценам 2014 года.

Результаты выборочного сравнительного технико-экономического анализа, выполненные в ценах, приведенных к ценам 2014 г. показывают, что построение и эксплуатация СЭС на принципах и механизмах предложенных в исследовании дает 30% экономию в затратах на капитальные вложения и эксплуатацию по сравнению с действующими подходами.

В целях формирования единого подхода и наработки практических навыков сформулированы рекомендации, которые устанавливают порядок и требования к определению параметров элементов сетей ЭС НН.

Для действующих сетей возможен постепенный перевод зон обслуживания в соответствии сегментацией на взвешенные полигоны Вороного, так как, при добавлении или удалении вершины сегмента Вороного перестраивается ближайшее окружение, что приводит к локальным изменениям в топологической компоновке сети ЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целями и задачами данного исследования являются модернизация действующих и разработка новых подходов к осуществлению параметрической оптимизации городских систем ЭС НН. В ходе достижения поставленных целей были получены следующие результаты:

1. Обоснована и доказана необходимость пересмотра действующих подходов и методов к определению параметров элементов городских систем электроснабжения, как несоответствующих современной экономической ситуации и уровню развития современных информационных технологий;

2. Определено, что решение поставленных в исследовании задач возможно на основе синтеза действующих подходов использующих алгоритмы теории графов и современных достижений в области дискретной математики, математической морфологии, компьютерной геометрии с использованием аппарата ГИС технологий;

3. На основе методов математической морфологии и компьютерной геометрии разработаны подходы для прогноза и оценки развития сети ЭС используя матрицы плотности нагрузки в виде двумерных структур;

4. Проведено теоретическое обоснование и получены соотношения для оценки степени неоднородности плотности нагрузки в виде коэффициентов неоднородности, учитывающих неоднородность плотности нагрузки, как по пространственным координатам, так и по абсолютным значениям;

5. Установлено, что применение обычных и взвешенных диаграмм Вороного делает возможным перераспределение потребителей ЭЭ по зонам ответственности ТП с целью уменьшения неоднородности плотности нагрузки, что позволяет ТП региона функционировать в относительно одинаковых режимах;

6. Разработана информационная структура в виде кумулятивной матрицы геодезических дистанций, аккумулирующая затраты на прокладку всей совокупности КЛ. Установлено, что координаты минимума кумулятивной матрицы геодезических дистанций являются локальными координатами оптимального местоположения ТП. Определены оптимальные технико-экономические маршруты прокладки кабельных линий и вычислена их протяженность.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах соискателя.

В изданиях рецензируемых ВАК

1. Афанасьев А.П., Гринкруг М.С. Особенности применения критерия поверхностной плотности нагрузки и при выборе местоположения и мощности трансформаторных подстанций//Научно-технический журнал «Электротехнические комплексы и системы управления» –Воронеж,2013.–№ 4.–С.1-4.
2. Афанасьев А.П., Гринкруг М.С. Определение зон ответственности трансформаторных подстанций 6/0.4 кВ на основе диаграмм Вороного с учетом неоднородности плотности нагрузки//Научно-технический журнал «Электротехнические комплексы и системы управления». – Воронеж, 2014. – № 1. – С. 36-41.

Свидетельства

3. Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014613462. Программа для ЭВМ «Определение зон ответственности трансформаторных подстанций на основе диаграмм Вороного с использованием ГИС-технологий» // Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, М.С. Гринкруг, А.П. Афанасьев, Ю.И. Ткачева – заявка № 2014610745, г. Москва 2014. – 5 с.

Статьи

4. Афанасьев А.П., Гринкруг М.С. Выбор мощности понижающих трансформаторов в распределительных сетях 6/0.4 кВ в современных экономических условиях // материалы международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы». – Комсомольск на Амуре, 2010. – С. 148-150
5. Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Афанасьев А.П. Анализ и возможная классификация неоднородностей плотности нагрузки с помощью аппарата двумерного вейвлет преобразования // Вестник Дальневосточной государственной социально-гуманитарной академии Серия 1: Точные науки.– Биробиджан: Изд-во ДВГСГА, 2011. - №1/1 (4) – С. 38-44.
6. Гринкруг М.С., Ткачева Ю.И., Афанасьев А.П., Анализ энергоэффективности понижающих трансформаторов в распределительной сети города с малоэтажной застройкой// материалы международной научно-технической конференции «Энергоэффективность и энергосбережение». – Благовещенск, 2011. – С. 148-153.
7. Афанасьев А.П., Гринкруг М.С. Учет неоднородности плотности нагрузки с помощью диаграмм Вороного // Хэйлунцзян – Приамурье: сборник материалов I междунар. науч. конф, Россия, Биробиджан, ФГБОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема», 30 октября 2013 г. В 2 ч. – Биробиджан: Изд-во ФГБОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема», 2013. – Ч. 1. – С. 32-36.
8. Афанасьев А.П., Афанасьева М.А. Определение оптимальных технико-экономических параметров элементов сетей электроснабжения с использованием инструментария ГИС // Современная техника и технологии. – Апрель 2014.-№ 4[Электронный ресурс].URL: <http://technology.snauka.ru/2014/04/3405> (дата обращения: 25.04.2014).

Афанасьев Александр Петрович

**Параметрическая оптимизация городских систем электроснабжения на
основе алгоритмов компьютерной геометрии с учетом неоднородности
плотности нагрузки**

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано к печати 21.07.2014.

Формат 60×84 1/16. бумага 65 г/м². Ризограф EZ570E.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,10. Тираж 100 экз. Заказ 26415

Полиграфическая лаборатория

ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре

государственный технический университет»

618013, г.Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.