

УДК 620.9:662.6; 621.1

М. С. Гринкруг, Ю. И. Ткачева, А. П. Афанасьев

АНАЛИЗ И ВОЗМОЖНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПЛОТНОСТИ НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ АППАРАТА ДВУХМЕРНОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В статье рассматриваются проблемы связанные с возросшей неоднородностью и сингулярным характером плотности нагрузки. Отмечается, что данный факт не учитывается в основных соотношениях, по которым определяются параметры системы электроснабжения. В качестве возможного решения предлагается использовать математический аппарат вейвлет преобразований.

Ключевые слова: Плотность нагрузки, неоднородность, двухмерный сигнал, вейвлет преобразование, вейвлет Хаара.

Myron S. Grinkrug, Yulia I. Tkatcheva, Aleksandr P. Afanasiev. ANALYSIS AND POSSIBLE CLASSIFICATION OF INHOMOGENEITIES DENSITY LOADS USING TWO-DIMENSIONAL WAVELET TRANSFORMATION APPARATUS (Far Eastern State Academy for Social and Humanity Studies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University).

The article discusses the problems associated with increased heterogeneity and the singular character density of the load. As a possible solution is proposed to use the mathematical apparatus of wavelet transforms.

Keywords: The density of the load, heterogeneity, two-dimensional signal, wavelet transform, the Haar wavelet.

Плотность нагрузки является одним из основных параметров для расчета проектируемых и модернизируемых сетей электроснабжения (ЭС). Данный параметр позволяет определить ориентировочные значения экономически целесообразной установленной или проектируемой мощности трансформаторной подстанции (ТП) 10/0,4 кВ $S_{ТП}$ и количества отходящих от ТП линий 380 В $N_{ТП}$.

$$S_{ТП} = 1,45 \cdot \sqrt[3]{\sigma^2}, \quad (1)$$

$$S_{ТП} = 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{\sigma^2} \quad (2)$$

где σ - удельная плотность нагрузки на рассматриваемой территории, кВА/кв.км;

Приведенные соотношения (1) и (2) остаются неизменными на протяжении более четверти века и фигурируют не только в директивных документах [1], но и в учебно-методической литературе [2]. Как показано в [3], данные соотношения соответствуют уровню энергопотребления последней четверти прошлого века.

Характерную для выражений (1) и(2) зависимость можно найти в работах исследователей того времени, так например, в работе [4] приводятся графики зависимости оптимальных значений мощности ТП от поверхностной плотности нагрузки рис.1 и числа питающих линий рис.2.

Соотношения которые иллюстрируют данные графики были получены из критерия минимума приведенных затрат с помощью метода критериального программирования.

Как видно данные графики хорошо аппроксимируют зависимость $f = f(\sigma^{\frac{2}{3}})$, которой соответствуют и выражения (1) и (2).

Зависимости приведенные на графиках были получены с помощью модели потребления в которой потребители электрической энергии (ЭЭ) равномерно распределены по поверхности, что дает возможность проводить анализ пренебрегая дискретностью изменения параметров. Таким образом, рассмотренная технико-экономическая модель сети потребления ЭЭ описывается непрерывными функциями, что дает свободу использования градиентных оптимизационных процедур, но не совсем соответствует физической природе реальной системы потребления ЭЭ.

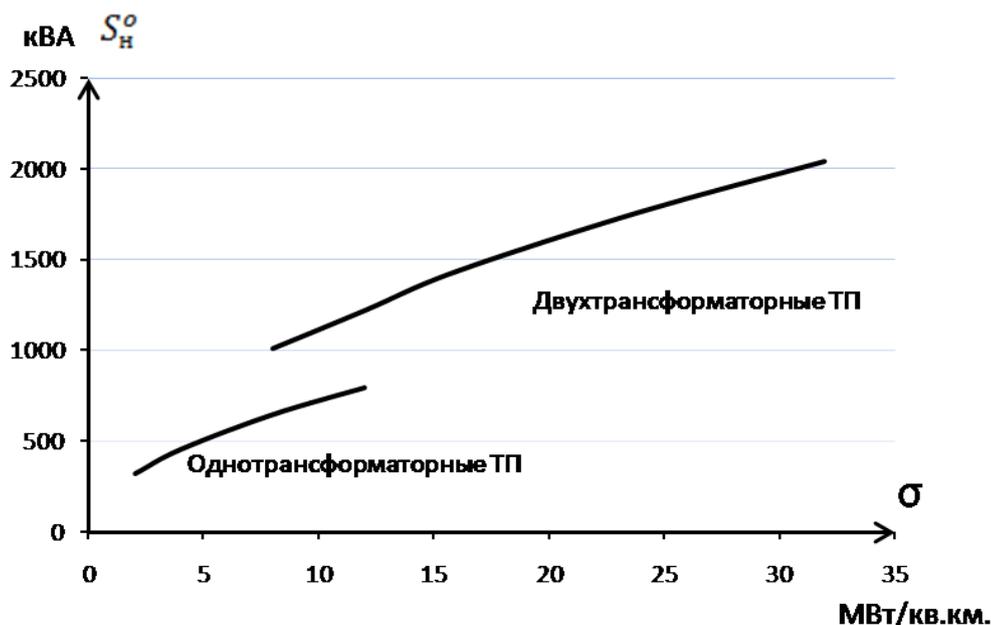


Рис. 1. Зависимости оптимальных значений мощности ТП от поверхностной плотности нагрузки

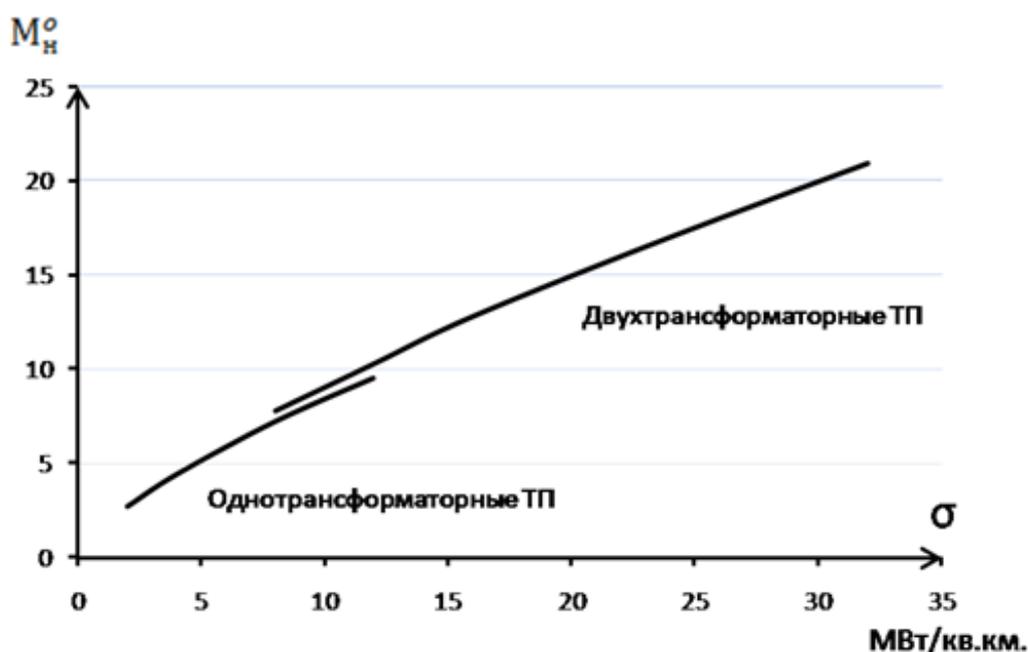


Рис. 2. Зависимости оптимальных значений числа питающих линий от поверхностной плотности нагрузки

Данный подход к анализу и расчету сетей ЭС является доминирующим и в настоящее время. Так, например, в [5] при выводе расчетных выражений, накладываются ограничения следующего характера — равномерное распределение потребителей ЭЭ на рассматриваемой территории, пункты потребления ЭЭ должны находиться в узлах правильных геометрических форм, данном случае в узлах квадратной решетки с периодом λ_0 — средним расстоянием между потребителями. Эта модель также использует принцип минимума приведенных затрат.

Здесь следует заметить, что принцип минимума приведенных затрат, несмотря на изменение социально-экономических условий, не утратил своей актуальности и в настоящее время. Аргументы в пользу этого можно найти в [6] где указано, что проведенный группой ученых МЭИ анализ существующих подходов к обоснованию и выбору предпочтительных решений при проектировании систем ЭС за рубежом и в России убедительно показал, что известный метод приведенных затрат не противоречит и согласуется с принятыми методиками в мировой практике.

Изменения, прошедшие за последние 20 лет в электроэнергетической отрасли, потребовали пересмотра ряда существующих и разработки новых подходов и методов расчета и оптимизации параметров и режимов систем электроснабжения. Требуют корректировки также ограничения, которые накладываются на распределения потребителей по площади.

Неравномерность плотности нагрузки существовала и до настоящего времени, так например, исследованиях [7] отмечается неопределенный и неравномерный характер плотности нагрузки в сельских и промышленно менее развитых районах. Неравномерность и неоднородность плотности нагрузки, как будет показано ниже, наблюдается и в индустриальных центрах, где достаточно высокий уровень потребления ЭЭ.

Более того, как представляется, данная неравномерность и неоднородность присутствует на разных масштабах функционирования системы ЭС. Она присутствует, как в масштабах региона и обусловлена дифференциацией городских и сельских потребителей ЭЭ, так и в масштабах городского квартала или даже многоквартирного дома.

Здесь возникает вопрос наименьшего линейного порога — масштаба, по которому еще возможно усреднение нагрузки в пределах площади характеризующейся данным масштабом. Данный наименьший порог является аналогом λ_0 — среднего расстояния между потребителями в рассмотренных выше рекомендациях [5]. В качестве наименьшего масштаба в работе [8] предлагается размер экономической зоны действия сети 0,4 кВ, который для мегаполиса типа Хельсинки равен 0,6 км. Таким образом, наименьшая площадь, по которой можно рассматривать параметр плотности нагрузки как неизменный составляет порядка 0,4 кв.км. Как мы видим в рекомендациях [5] плотность нагрузки считается по формуле:

$$\sigma = \frac{p_0}{\lambda_0^2}, \quad (3)$$

где p_0 — усредненная нагрузка одного потребителя;

λ_0 — характерное расстояние между пунктами потребления (между домами).

В этой связи интересно, что из этих основных допущений и вытекает закономерность $f = f(\sigma^{\frac{2}{3}})$, которая фигурирует и в соотношениях (1) и (2).

Опуская подробные выкладки, их можно найти в [5], оценим работу которую необходимо выполнить разработчику для того чтобы воспользоваться предложенной методикой.

Исходя из технико экономического принципа наименьших затрат и при допущениях постоянной плотности нагрузки и равномерном распределении пунктов потребления ЭЭ по рассматриваемой территории, дифференцируя слагаемые входящие в целевую функцию, зависящие от радиуса действия ТП — r , по r , получаем следующее выражение для оптимального радиуса действия ТП:

$$r_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{2k_{\text{ТП}} \cdot \sqrt{3} \cdot p_{\text{ТП}} \cdot j \cdot U \cos \varphi}{\psi \sigma (b p_{0,23} + 3 \cdot j^2 \cdot \rho \cdot \tau \cdot c \cdot 10^{-3})}} \quad (4)$$

чуть позже мы опишем все параметры входящие в данные выражения, отметим, что в знаменателе подкоренного выражения присутствует σ — плотность нагрузки, которая считается в соответствии с выражением (3).

Используя (4) и считая, что оптимальное число ТП — $N_{ТП0}$ можно найти из соотношения:

$$N_{ТП0} = \frac{z \cdot \lambda_0^2}{4 \cdot r_{0nm}^2} \quad (5)$$

получаем следующее выражение для оптимального числа ТП:

$$N_{ТП0} = z \lambda_0 \left[\frac{\sigma \cdot \psi \cdot (b \cdot p_{0,38} + \sqrt{3} \cdot j^2 \cdot \rho \cdot \tau \cdot c \cdot 10^{-3})^2}{16 \cdot k_{ТП} \cdot p_{ТП} \cdot U \cdot j \cdot \cos \varphi} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

среднюю мощность ТП можно найти, используя соотношение

$$S_{ср} = \frac{z p_0}{N_{ТП0} \cos(\varphi)}.$$

Для того чтобы оценить трудозатраты разработчика, который использует данную методику распишем смысл всех параметров входящих в выражение (6):

- z — количество жилых домов (пунктов потребления ЭЭ);
- λ_0 — среднее расстояние между жилыми домами;
- σ — плотность нагрузки потребителей;
- ψ — коэффициент разветвленности сети;
- b — коэффициент переменной составляющей стоимости линии в сетях 0,38 кВ, руб./км·кв.мм;
- $p_{0,38}$ — ежегодные отчисления от капитальных вложений в линию 0,38 кВ;
- j — экономическая плотность тока, А/кв.мм;
- ρ — удельное сопротивление провода постоянному току Ом·кв.мм/км;
- τ — годовое время максимальных потерь, ч/год;
- c — себестоимость потерь электроэнергии в сети 0,38 кВ руб./кВт·ч;
- $k_{ТП}$ — стоимость трансформаторной подстанции, руб.;
- $p_{ТП}$ — ежегодные отчисления от стоимости ТП;
- U — линейное номинальное напряжение, кВ;
- $\cos \varphi$ — коэффициент мощности сети.

Часть этих параметров являются общими для всех потребителей ЭЭ, а часть из них индивидуальная и присущая потребителям данного региона. Одной из основных и достаточно трудоемких задач — задача сбора и обработки информации, являющейся индивидуальной для данного потребителя. Без этой работы не имеет смысла использовать соотношение (6), так как можно сразу воспользоваться соотношениями (1) и (2).

Очевидно, что затраты на нахождение значений коэффициентов входящих в выражение (6) возрастают с увеличением масштаба территории потребления ЭЭ. Для небольших населенных пунктов собрать и обработать информацию для вычисления параметров входящих в (6) не составляет труда, но там собственно и проблемы выбора не стоит — одна две трансформаторные подстанции полностью решают проблему снабжения потребителей ЭЭ. Следовательно, данные рекомендации и методика применимы только для достаточно крупных потребителей с большим количеством пунктов потребления.

Тот факт, что плотность нагрузки имеет неоднородный характер, приводит к задаче выявления характера неоднородностей и дальнейшей их классификации. Классификация необходима для унифицированного подхода к описанию и рассмотрению подобных проблем.

Рассмотрим, для примера, изображение плотности нагрузки на карте г. Хельсинки рис. 3 (изображение взято из [8]).



Рис. 3. Распределение плотности нагрузки на карте города Хельсинки

В качестве характерного наименьшего масштаба здесь принята величина $\lambda_0 = 0,2$ км. Выбор данной величины объясняется тем, что уже на данных масштабах проявляются характерные признаки неоднородности плотности нагрузки, такие как дисперсионная "очаговая" структура.

На рис.4 показан "разрез" значений плотности нагрузки г. Хельсинки по направлению "Северо-Восток — Юго-Запад". Здесь отчетливо видно, что плотность нагрузки имеет неоднородный характер с особенностями, которые ярко выражены в зависимости от архитектурной топологии мегаполиса.

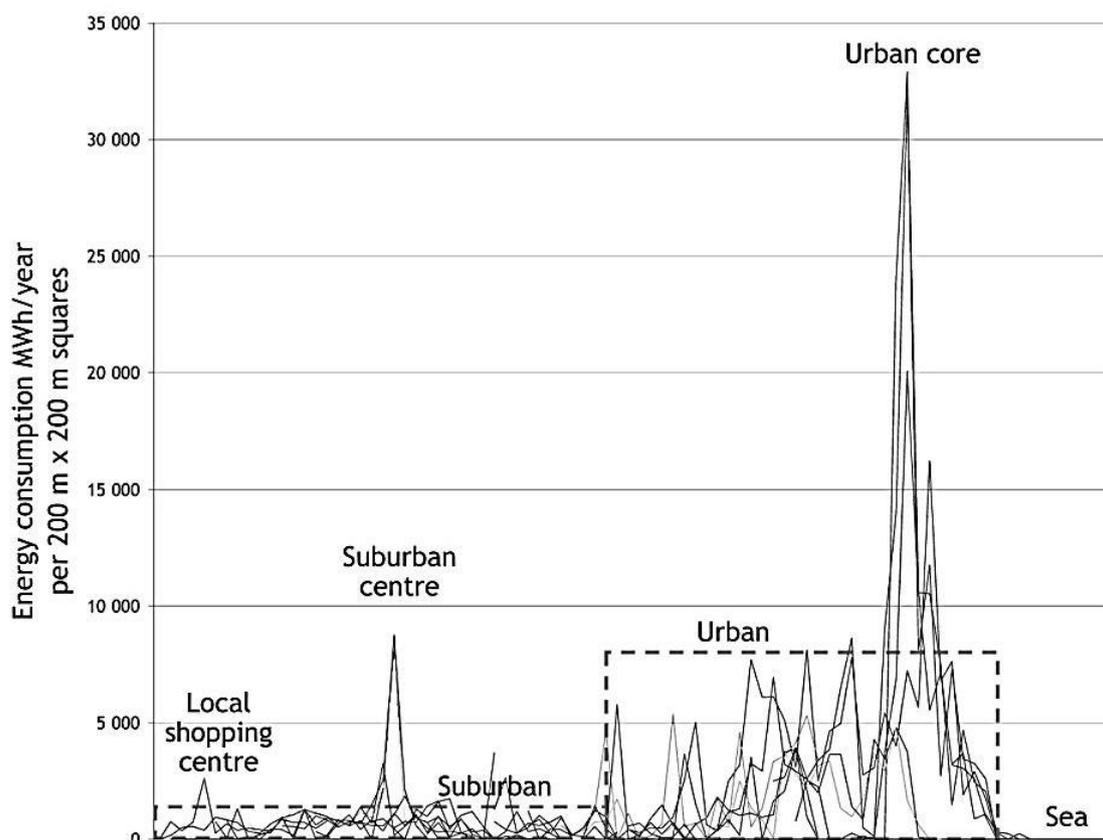


Рис. 4. График плотности нагрузки г. Хельсинки в разрезе по направлению "Северо-Восток — Юго-Запад"

Понятно, что подход с одинаковым потреблением ЭЭ в пунктах потребления находящихся в узлах квадратной сетки, в данном случае будет не правомерен.

Подобная картина распределения плотности нагрузки характерна не только для Хельсинки, наверняка она будет подобно выглядеть и для российских крупных городов.

Для средних городов характер несколько изменится, пики нагрузки не будут такими "острыми", но дисперсионная "очаговая" структура будет присутствовать, так как она обусловлена, в большей мере, архитектурной топологией города, а городов с геометрически идеальной топологией не существует.

Что касается сельских районов, то здесь необходим классификационный механизм, который бы позволил выявить общие характеристики неоднородностей плотности нагрузки. Тот факт, что в сельских районах также существует неоднородность, подтверждается тем, что в той же методике [5] бытовые потребители ЭЭ разделяются на 5 категорий по уровню потребления и вводятся три уровня потребления для личных подворных хозяйств.

Рассмотрим карту плотности нагрузки как двухмерный сигнал с присутствующими ему атрибутами — спектральной плотностью и другими статистиче-

скими характеристиками. Тогда для анализа подобных сигналов можно применить соответствующий математический аппарат.

Так как изображение карты плотности нагрузки состоит мозаики квадратов со стороной λ_0 , каждый из этих квадратов имеет свой оттенок "серого", который соответствует плотности нагрузки в данной точке, то мы имеем двухмерную ступенчатую функцию градаций плотности нагрузки.

Как в приведенном примере, так и в общем случае подобные двухмерные функции имеют неоднородный и нерегулярный характер. Т.е. мы имеем дело с двухмерным сигналом, в котором присутствуют особенности.

К таким сигналам возможно применение аппарата спектрального анализа, например двухмерного преобразования Фурье. Но преобразование Фурье имеет некоторые ограничения, одно из которых является существенным для нашей задачи. Фурье преобразование дает весь частотный спектр изображения, на котором невозможно определить, к какой пространственной (нашем случае) области относится та или иная частота. Конечно, можно использовать оконное преобразование Фурье, но и здесь возникают проблемы связанные с эффектом Гиббса, т.е. с искажениями, возникающими на границах окна.

В последние два десятилетия бурно развивается и хорошо себя зарекомендовал при работе с сигналами, в которых присутствуют неоднородности и особенности математический аппарат вейвлет-преобразования. Основной особенностью вейвлет-преобразования то, что оно анализирует сигнал, в нашем случае двухмерную карту плотности нагрузки на различных масштабах и соответственно выявляет особенности присущие данному пространственному масштабу. При применении вейвлет-преобразования необходимо выбрать "материнский вейвлет" который бы соответствовал анализируемому сигналу. Для анализа ступенчатых функций наверно наиболее подходящим будет вейвлет Хаара [9]. На рис.5 представлен вейвлет Хаара и его скейлинг функция.

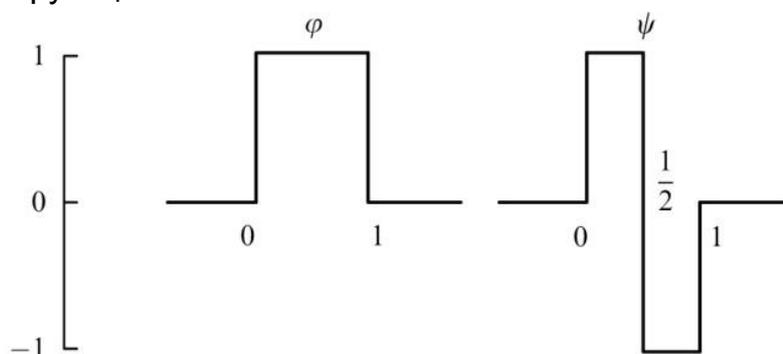


Рис. 5. Скейлинг-функция $\varphi(\mathbf{x}) \equiv \varphi_{0,0}(\mathbf{x})$ и "материнский вейвлет" $\psi(\mathbf{x}) \equiv \psi_{0,0}(\mathbf{x})$ Хаара

Аналитический вид масштабированных и смещенных версий скейлинг функций и "материнского вейвлета" представлен ниже:

$$\varphi_{j,k} = 2^{j/2} \varphi(2^j x - k),$$

$$\psi_{j,k} = 2^{j/2} \psi(2^j x - k).$$

Как из формы вейвлета Хаара, его сдвиг и масштабирование позволит выявить особенности плотности поверхностной нагрузки на различных уровнях, которые соответствуют масштабам рассматриваемой системы ЭС.

Вопрос интерпретации вейвлет-коэффициентов полученных в результате применения вейвлет преобразования к карте плотности нагрузки составляет предмет дальнейших наших исследований.

Рассмотрение плотности нагрузки как неоднородного двухмерного сигнала с особенностями, допускает возможность использовать в качестве инструмента для классификации кластерный анализ.

Выбор конкретного аппарата для кластерного анализа является предметом предпочтений исследователя. Здесь возможно использовать как иерархический кластерный анализ, метод *c-means* или инновационный подход, связанный с использованием самоорганизующихся карт Кохонена.

Каждый из этих алгоритмов имеет свои достоинства поэтому предпочтение того или иного метода определяет сам исследователь.

Выводы:

1. В соотношениях для выбора параметров элементов электроснабжения не учитывается неоднородный характер плотности нагрузки.

2. Для анализа неравномерностей в распределении плотности нагрузки предлагается рассматривать карту плотности как двухмерный неоднородный сигнал с сингулярностью и применять аппарат вейвлет-преобразования, в котором в качестве "материнского вейвлета" использовать вейвлет Хаара.

3. В качестве инструмента классификации неоднородностей плотности нагрузке предлагается применять методы кластерного анализа.

Литература

1. Электротехнический справочник: в 3 т./Под общ. ред. профессоров МЭИ. Т. 3, кн. 1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 880с.
2. Озерский В.М., Маковецкий С.Я. Расчеты электроснабжения городов: Учебное пособие; Саратов.гос.техн.ун-т. Саратов, 1999. 68 с.
3. Гринкруг М.С., Афанасьев А.П. Выбор мощности понижающих трансформаторов распределительных сетях 6-0,4 кВ в современных экономических условиях: Материалы Международного симпозиума "Образование, наука и производство: проблемы, достижения перспективы" г. Комсомольск на Амуре, 2010. с. 310—312

4. Кнахал Падма Прасад. Закономерности формирования оптимальных параметров и основные алгоритмы автоматизированного проектирования городских распределительных электрических сетей. Дисс. на соискание уч.ст. к. техн. н., Москва, МЭИ, 1979.

5. Методика определения потребности в средствах электроснабжения для социального развития села. М.: 2001 (рассмотрена и утверждена на заседании секции технологического проектирования научно-технического совета Минсельхоза России)

6. Зорин В.В., Тисленко В.В. Системы электроснабжения общего назначения. Чернигов: ЧГТУ, 2005. 341 с.

7. Лещинская Т.Б., Метельков А.А. Разработка методики планирования систем электроснабжения районов с малой плотностью нагрузок с учётом неопределённости исходной информации. М.: Агроконсалт, 2003. 116 с.

8. Markuu Hyvvarinen. Electrical networks and economies of load density. Doctoral Dissertation.: Helsinki University of Technology, 2008. 158с.

9. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование Успехи физических наук. т. 171, №5. 2001 с. 465—501.