

*В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова, С. А. Михайлов,  
А. А. Тихомирова, С. А. Бростилов*

## ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*V. Ya. Goryachev, T. Yu. Brostilova, S. A. Mikhaylov,  
A. A. Tikhomirova, S. A. Brostilov*

## PROBLEMS OF OPTIMIZATION OF SYSTEMS ELECTROSUPPLIES

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Объектом исследования является система электроснабжения населенных пунктов. Предметом исследования является определение оптимальных мест расположения подстанций соответствующего класса напряжения. Целью работы является рассмотрение путей оптимизации системы электроснабжения сельскохозяйственного района на основе применения метода распределенных удельных мощностей. **Материалы и методы.** Для определения места расположения источников питания районов малоэтажной застройки использован разработанный авторами метод распределенных удельных мощностей. В качестве критериев оптимизации использована величина потерь на передачу электрической энергии. **Результаты.** Предложен метод, основанный на том, что каждая нагрузка на поверхности представлена фигурами в виде тел вращения, ограниченных поверхностями, образованными произведением базовой функции на мощность нагрузки. Анализ результатов проводится путем замены группы потребителей эквивалентным потребителем и определением радиуса рассеяния. Рассмотрена методика выбора оптимального места расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ и подстанций 110(35)/10(6) кВ. **Выводы.** Метод распределенных удельных мощностей позволяет спроектировать систему электроснабжения, обладающую лучшими характеристиками по признаку минимальных потерь на передачу электрической энергии. Предложенный метод достаточно универсален и может быть использован при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий, области в целом и для определения оптимальных мест установки компенсаторов реактивной мощности.

**A b s t r a c t. Background.** The object of research is the power supply system of settlements. The subject of the study is to determine the optimal locations of substations of the corresponding voltage class. The aim of the work is to consider ways to optimize the power supply system of the agricultural area on the basis of the method of distributed specific capacity. **Materials and methods.** For determining the location of power sources in low-rise areas, the authors used the method of distributed specific power. As optimization criteria, the value of losses on transmission of electric energy is used. **Results.** The proposed method is based on the fact that each surface load is represented by figures in the form of bodies of rotation bounded by surfaces formed by the product of the basic function on the load power is proposed. The analysis of the results is carried out by replacing a group of consumers with an equivalent consumer and determining the scattering radiation. The method of choosing the optimal location of 10(6)/0.4 kV substations and 110(35)/10(6) kV substations is considered. **Conclusions.** The method of the distributed specific capacities allows to design the system of power supply possessing the best characteristics on the basis of the minimum losses on transfer of electric en-

ergy. The proposed method is quite universal and can be used in the design of power supply systems of industrial enterprises, the region as a whole and to determine the optimal places of installation of reactive power compensators.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** электроснабжение населенных пунктов, подстанция, оптимизация, потребитель электрической энергии, потери электроэнергии, место расположения подстанций.

**К e y w o r d s:** the electricity settlements, substation, optimization, consumers of electricity, loss of electricity, the location of the substations.

### *Введение*

Основным показателем качества системы электроснабжения являются минимальные потери на передачу электрической энергии. Фактором, влияющим на этот показатель, является выбор места расположения питающих подстанций. Вопросу выбора оптимального места расположения цеховых подстанций посвящен ряд работ Каменевой [1, 2]. Речь идет о методе, который получил название «центра масс». Однако возможности предложенной ей методики ограничиваются нахождением оптимального места расположения одной цеховой подстанции. В ряде случаев даже при проектировании систем электроснабжения оптимальным является расположение двух и более подстанций в пределах одного цеха. Критериями оптимальности в этом случае являются или минимальные потери на передачу электрической энергии, или минимальная металлоемкость системы электроснабжения. Не последним критерием оптимальности является и минимальная стоимость работ.

Выбор оптимальных мест расположения цеховых подстанций является частным случаем вопроса выбора подстанций классом 10(6)/0,4 кВ. Это объясняется тем, что условия проектирования систем электроснабжения районов малоэтажной застройки и городских районов с многоэтажными домами отличаются от условий проектирования электроснабжения цехов.

Следует обратить внимание на то, что, кроме подстанций 10(6)/0,4 кВ, существуют и подстанции более высокого класса напряжений. При проектировании сетей 110, 220, 500 кВ могут возникнуть те же проблемы выбора оптимального места расположения подстанций. Таким образом, имеется необходимость разработки универсального метода определения мест расположения подстанций.

### *Трансформаторы, классы подстанций и сети*

Развитие электроэнергетических систем привело к следующим уровням напряжений сетей электроснабжения в настоящее время: 0,4(0,6) кВ, 10(6) и 20 кВ, 110(35) и 220 кВ, 500(330) кВ [3]. Первый класс напряжений 0,4(0,6) кВ используется непосредственно в установках преобразования электрической энергии в другой вид энергии. Второй класс напряжений используется в распределительных сетях электроснабжения. Стоит отметить и то, что в ряде случаев этот уровень напряжения используется и для питания установок, преобразующих электрическую энергию в другие виды энергии. Третий уровень напряжений используется для транспортировки электрической энергии внутри электроэнергетических систем. Четвертый уровень напряжений необходим для линий межсистемных связей. Представленное деление уровней напряжений не имеет четких границ, но отражает сложившуюся ситуацию на данный момент времени.

Переход с одного уровня напряжения на другой реализуют подстанции, основным элементом которых являются трансформаторы. Очевидно то, что самыми распространенными подстанциями являются подстанции 10(6)/0,4 кВ и 110(35)/10(6) кВ. В настоящее время в некоторых случаях уже вводятся в эксплуатацию подстанции 20/0,4 кВ. Это подстанции недалекого будущего.

Эффективные мощности эксплуатируемых подстанций 10(6)/0,4 кВ находятся в пределах от 25 до 250 кВА. Подстанции 110(35)/10(6) кВ эффективны при мощностях от 2,5 до 200 МВА. Мощности подстанций других уровней напряжения проектируются индивидуально.

Поэтому основной проблемой при проектировании электрических сетей в настоящее время является проблема выбора мест расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ и подстанций 110(35)/10(6) кВ.

### Основы метода распределенных удельных мощностей

Из разработанных ранее методов определения оптимального расположения подстанций известен метод «центра масс» [4]. В его основу положено представление нагрузок в форме равновысоких цилиндров, площадь оснований которых пропорциональна мощности потребителя. Координаты центра основания цилиндра каждого потребителя соответствуют координатам потребителя. Совокупность всех цилиндров, расположенных на плоскости, образует тело, центр массы которой и определяет оптимальное место расположения цеховой подстанции. Если предприятие имеет несколько цехов, то оптимальное место расположения главной понижающей подстанции более высокого уровня определяется с использованием того же метода, но в качестве «потребителей» используются параметры цеховых подстанций. Речь идет о координатах и мощностях этих подстанций.

В теории проектирования для определения оптимальных мест расположения подстанций известен метод потенциальных поверхностей [4]. Суть метода заключается в том, что каждой точке расположения потребителя на плоскости присваивается электрический потенциал, величина которого пропорциональна мощности потребителя. Результирующее электрическое поле, образованное полями «зарядов» потребителей, представляет собой сложную поверхность. Линии равных «потенциалов» поверхности позволяют выбрать область места расположения подстанции. Описанные методы имеют ряд недостатков, которые не позволяют их использовать в качестве универсальных методов.

Авторами разработан новый метод, позволяющий определить оптимальное место расположения подстанций [5]. Основой метода является представление нагрузки в форме поверхности, описываемой следующей формулой:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a)^2+(y-b)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $\sigma$  – радиус рассеяния значений функции;  $a$  и  $b$  – координаты центра функции на плоскости  $x, y$ .

Объем тела, ограниченного поверхностью  $f(x, y)$  и плоскостью  $x, y$ , равен единице.

Умножив базовую функцию на мощность потребителя  $P$ , находящегося в точке с координатами  $x, y$ , получаем поверхность, описываемую уравнением

$$f(x, y) = P \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a)^2+(y-b)^2}{2\sigma^2}}.$$

Объем фигуры, ограниченной поверхностью и плоскостью  $x, y$ , равен мощности потребителя.

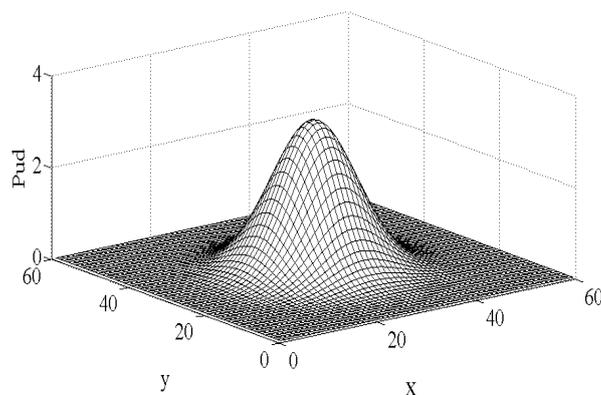


Рис. 1. Поверхность одного потребителя на площади 60×60 м при  $\sigma = 10$  и  $P = 1000$  Вт

На рис. 1 представлена поверхность одного потребителя на площади 60×60 м при  $\sigma = 10$  и  $P = 1000$  Вт. Значение функции в каждой точке с координатами  $x, y$  является удельной

мощностью  $P_{ud}$ , т.е. мощностью на единицу площади. По этой причине данный метод получил название метода распределенных удельных мощностей.

В основе метода лежит анализ поверхности, описываемой уравнением

$$P_{ud}(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a_i)^2+(y-b_i)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $n$  – номер потребителя;  $P_{ud}$  – удельная мощность в точке поверхности с координатами  $x, y$ ;  $P_i$  – активная мощность  $i$ -го потребителя;  $a_i, b_i$  – координаты расположения  $i$ -го потребителя.

Анализ результирующей поверхности позволяет определить оптимальное место расположения подстанций системы электроснабжения.

Описанный метод был опробован авторами для оптимизации сети электроснабжения цеха [5]. Однако использование данного метода при проектировании системы электроснабжения населенных пунктов имеет свои особенности.

#### **Определение оптимального места расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ**

Особенность систем электроснабжения населенных пунктов сельскохозяйственных районов заключается в том, что объекты электроснабжения достаточно разнородны и удалены друг от друга на значительные расстояния. Наряду с частными домами, потребление электроэнергии которых небольшое, в таких населенных пунктах в ряде случаев имеются объекты со значительным потреблением электрической энергии. Это, как правило, предприятия по переработке продукции сельскохозяйственного производства.

На структуру электроснабжения сельскохозяйственных районов повлиял и исторический фактор. На первоначальном этапе развития электроснабжения населенных пунктов потребителями являлись частные домовладения, электроэнергия в которых использовалась практически только для освещения домов и улиц. В настоящее время мощность потребителей возросла в несколько десятков раз. Со временем это привело к реконструкции систем электроснабжения. Развитие сельскохозяйственного производства привело к необходимости строительства предприятий частных предпринимателей, электрическая мощность оборудования которых иногда превосходит мощность подстанций населенных пунктов в несколько раз. В ряде случаев подобные предприятия имеют собственные электрогенерирующие установки. Все это приводит к реконструкции и модернизации районных систем электроснабжения. Первым этапом использования метода при проектировании новых систем электроснабжения или проверки существующих на «оптимальность» является необходимость привязки потребителей к местности. Для этого выбирается географическая нулевая точка отсчета. Направление оси  $x$  желательно указать с запада на восток, а ось  $y$  – с юга на север. Размер площади рекомендуется выбрать минимальным с расчетом на размещение всех потребителей. При современных технологиях привязать объекты к местности в декартовой системе координат довольно просто.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию системы электроснабжения условного населенного пункта Уварово, имеющего 73 домовладения, потребляющего в часы максимальной нагрузки от 1 до 8 кВт. Максимальная суммарная мощность потребителей 462 кВт. Кроме этого, на окраине населенного пункта расположено предприятие, состоящее из трех цехов с суммарной потребляемой мощностью 1400 кВт. Электроснабжение предприятия осуществляется от индивидуальной подстанции.

Проанализируем систему электроснабжения указанного населенного пункта. Для анализа системы была составлена программа для построения поверхности удельной мощности населенного пункта Уварово без учета потребителей предприятия.

На рис. 2 представлен график распределения удельных мощностей при малом радиусе рассеивания, равном 10 м. По осям  $x$  и  $y$  имеются деления в десятках метров. Поселок расположен на площади 1500×1400 м. На рис. 2 просматривается расположение отдельных потребителей – домовладений.

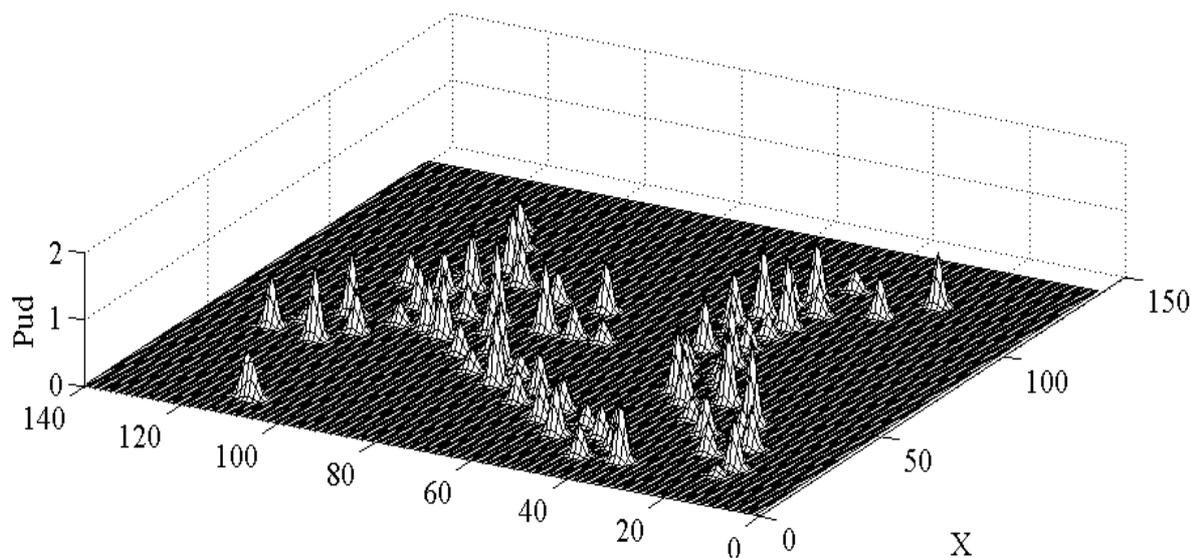


Рис. 2. График распределения удельных мощностей при малом радиусе рассеивания

Координаты оптимального места расположения подстанции электроснабжения поселка Уварово определяются следующим образом.

Задается радиус рассеивания удельных мощностей потребителей, равный 400 м. В результате получаем поверхность (рис. 3) распределения удельных мощностей, имеющую вершину с координатами  $x = 530$  и  $y = 620$  м. Эти координаты и являются координатами оптимального места расположения подстанции населенного пункта по критерию минимальных потерь на передачу электрической энергии.

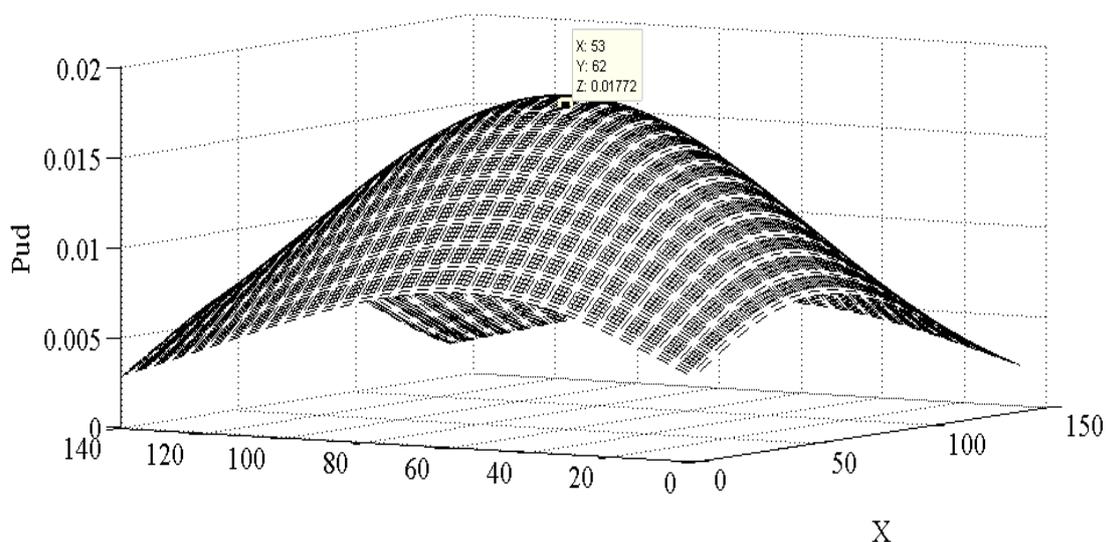


Рис. 3. Поверхность распределения удельных мощностей с вершиной ( $x = 530$  м,  $y = 620$  м)

В пределах населенного пункта имеется предприятие с тремя потребителями электрической энергии с общей мощностью 1400 кВт.

График распределения удельных мощностей этих потребителей по той же поверхности при малом радиусе рассеивания изображен на рис. 4. По этому графику можно определить места расположения цехов предприятия. Рекомендуемое место расположения подстанции предприятия определяется путем построения поверхности удельной мощности при увеличенном радиусе рассеивания. На рис. 5 изображена поверхность удельной мощности при радиусе рассеивания в 100 м с учетом взаимного расположения цехов предприятия. Координаты вершины поверхности соответствуют координатам рекомендуемого места расположения подстанции предприятия. Для наглядности все графики построены в одинаковой системе координат. Ре-

комендуемое место расположения подстанции предприятия имеет координаты  $x=1200$  и  $y=600$  м.

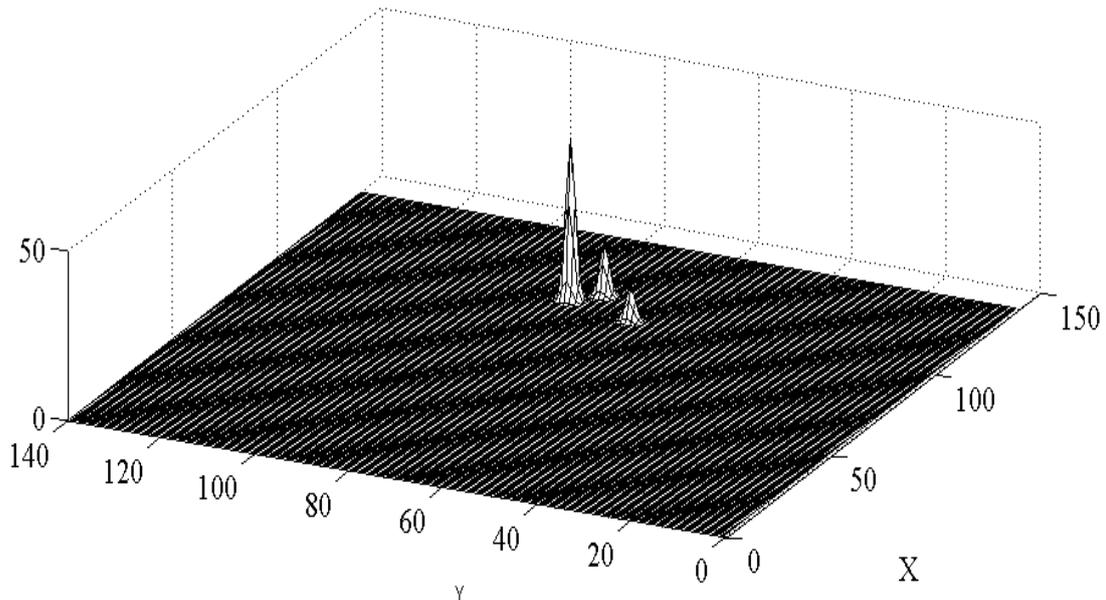


Рис. 4. График распределения удельных мощностей предприятия с тремя потребителями

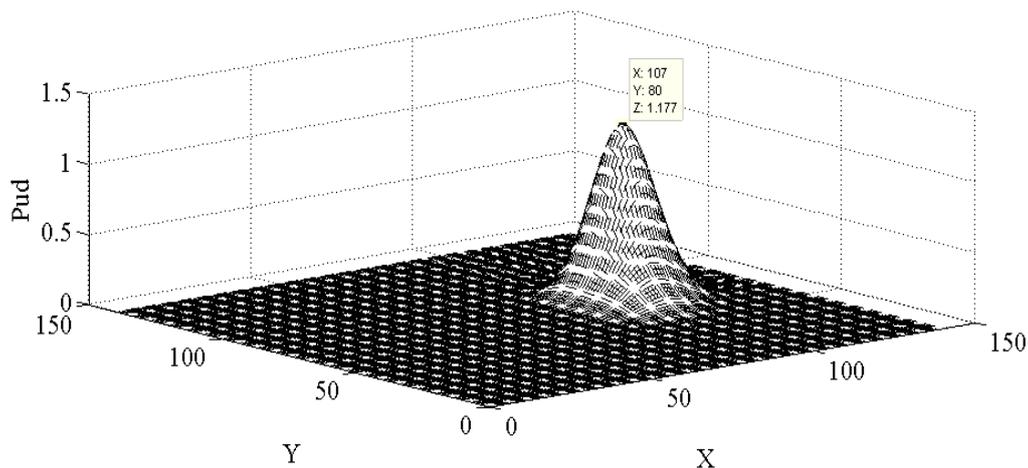


Рис. 5. Поверхность удельной мощности при радиусе рассеивания в 100 м

Расположение двух подстанций в пределах одного населенного пункта не предполагает прокладку двух линий электропередачи напряжением 10 кВ от районной подстанции 110(35)/10 кВ. Линия должна быть одной, но она должна обеспечить передачу энергии суммарной мощностью двух подстанций 1862 кВт.

Если в пределах населенного пункта располагается предприятие с небольшой мощностью потребления, то рекомендуется проектировать одну подстанцию 10(6)/0,4 кВ, оптимальное место расположения которой вычисляется обычным способом.

#### ***Определение оптимального места расположения подстанций 110(35)/10 кВ сельскохозяйственных районов***

В настоящее время расположение подстанций 110(35)/10 кВ привязывают к местам расположения административных центров или крупных населенных пунктов. С социальной точки зрения и чаще всего с технической стороны этот подход к решению вопроса может быть оправданным. Именно в районных центрах обычно расположены потребители электроэнергии большой мощности. Однако всегда ли этот выбор является оптимальным? Где лучше всего расположить районную подстанцию?

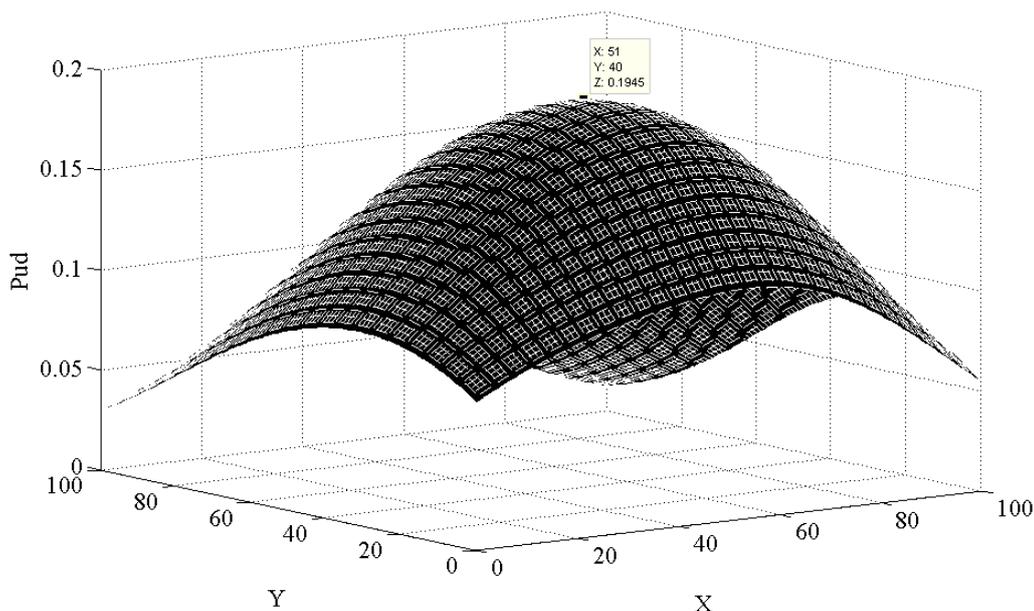


Рис. 7. Поверхность удельной мощности всего района, соответствующая радиусу рассеивания  $\sigma = 3000$  м

На рис. 7 представлена поверхность удельной мощности всего района, соответствующая радиусу рассеивания  $\sigma = 3000$  м. Явно выраженная вершина имеет координаты  $x = 5100$  м и  $y = 4000$  м. Эти координаты являются координатами оптимального места расположения районной подстанции.

#### Заключение

Предложенный метод определения мест расположения подстанций, как показано выше, достаточно универсален. Он может использоваться при проектировании систем электроснабжения или для определения оптимальности существующих систем перед их реконструкцией.

Эффективность метода при проектировании систем электроснабжения предприятий показана в опубликованных материалах.

#### Библиографический список

1. Каменева, В. В. Область рассеяния центра электрических нагрузок / В. В. Каменева. – Москва : МЭИ, 1971.
2. Каменева, В. В. К вопросу определения местоположения главных понизительных или распределительных подстанций промышленных предприятий / В. В. Каменева, Э. А. Киреева // Электричество. – 1972. – № 3. – 83–84 с.
3. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – Москва : Энергоатомиздат, 2009. – 592 с.
4. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – Москва : Энергоатомиздат, 1984 – 466 с.
5. Горячев, В. Я. Математические методы определения центра распределенных по поверхности нагрузок / В. Я. Горячев, С. А. Михайлов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4. – 276 с.

#### References

1. Kameneva V. V. *Oblast' rasseyaniya tsentra elektricheskikh nagruzok* [The scattering region of the center of electrical loads]. Moscow: MEI, 1971. [In Russian]
2. Kameneva V. V., Kireeva E. A. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1972, no. 3, pp. 83–84. [In Russian]
3. Idel'chik V. I. *Elektricheskije sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Energoatomizdat, 2009, 592 p. [In Russian]

В любом случае для анализа системы электроснабжения места расположения потребителей или подстанций 10(6)/0,4 кВ необходимо привязать к местности способом, описанным ранее.

Координаты рекомендуемого места расположения районной подстанции 110(35)/10(6) кВ можно найти двумя способами. В первом случае необходимо использовать мощности и координаты подстанций 10(6)/0,4 кВ. Эти параметры необходимо ввести в программу построения поверхности удельных мощностей. Изменяя радиус рассеяния от минимального значения, необходимо получить явно выраженную вершину. Координаты этой вершины являются координатами рекомендуемого места расположения подстанции. Этот подход к выбору места не обладает достаточной точностью, так как на этапе выбора мест расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ могут быть допущены ошибки. Однако в пользу этого подхода к решению проблемы является сокращение времени вычислений в несколько десятков и сотен раз. С другой стороны, реальные места расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ не соответствуют местам, координаты которых получены расчетным путем, так как расположение подстанций зависит от расположения других объектов.

Второй способ основан на использовании первичной информации о местах расположения и мощностей всех потребителей района. Использование этого способа позволяет одновременно уточнить рекомендуемые места расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ и вычислить координаты рекомендуемого места расположения районной подстанции. Подробную информацию обо всех потребителях района необходимо ввести в программу, в основу которой положена приведенная ранее формула вычисления удельной распределенной мощности. При определенном радиусе рассеивания получим поверхность, подобную поверхности, изображенной на рис. 6. В качестве примера рассматривается район, в состав которого входят четыре населенных пункта под условными названиями Уварово, Сады, Петровка и Обрыв. Количество населенных пунктов района сокращено до четырех с целью упрощения анализа. Площадь района составляет 10×10 км. По осям  $x, y$  на рисунке нанесены деления в сотнях метров. На рисунке изображена поверхность удельной мощности, соответствующая радиусу рассеивания  $\sigma = 300$  м. Координаты вершин «холмов» соответствуют оптимальным местам расположения подстанций 10(6)/0,4 кВ района. Получение оптимальных мест расположения одновременно нескольких подстанций является особенностью метода. Последнее утверждение указывает на то, что в случае отсутствия необходимости индивидуального анализа системы электроснабжения отдельных населенных пунктов места расположения всех подстанций можно вычислить путем анализа системы электроснабжения всего района. Индивидуальный анализ электроснабжения поселка Уварово приведен выше.

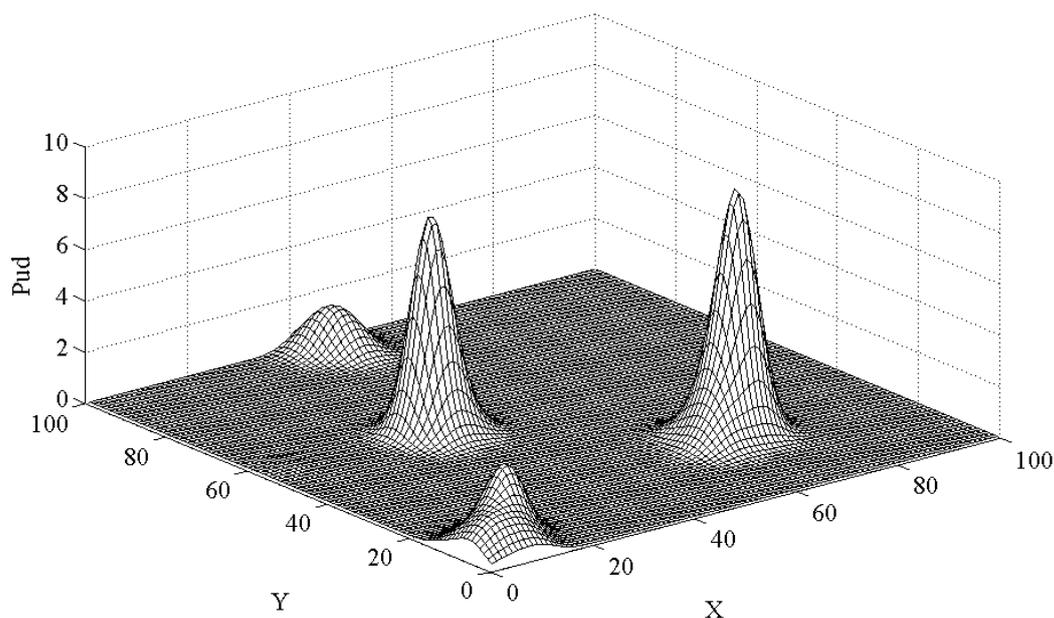


Рис. 6. Полученная поверхность

4. Fedorov A. A., Kameneva V. V. *Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [Fundamentals of power supply of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 466 p. [In Russian]
5. Goryachev V. Ya., Mikhaylov S. A. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental study]. 2013, no. 4, 276 p. [In Russian]

**Горячев Владимир Яковлевич**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра электроэнергетики и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: gorvlad1@yandex.ru

**Goryachev Vladimir Yakovlevich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of power engineering  
and electrical engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Бростилова Татьяна Юрьевна**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра электроэнергетики и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tat-krupkina@yandex.ru

**Brostilova Tat'yana Yur'evna**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of power engineering  
and electrical engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Михайлов Сергей Алексеевич**

главный специалист,  
Московский узел связи энергетики  
(Россия, г. Москва, ул. Академика Челомея, 5а)  
E-mail: mihailov989@gmail.com

**Mikhaylov Sergey Alekseevich**

main specialist,  
Moscow communication node energy  
(5a Akademika Chelomeya street, Moscow, Russia)

**Тихомирова Анна Алексеевна**

старший преподаватель,  
кафедра электроэнергетики и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: an.tihomirova2013@yandex.ru

**Tikhomirova Anna Alekseevna**

senior lecturer,  
sub-department of power engineering  
and electrical engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Бростилов Сергей Александрович**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: brostilov@yandex.ru

**Brostilov Sergey Aleksandrovich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of radio equipment design  
and production,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Образец цитирования:**

Проблемы оптимизации систем электроснабжения / В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова, С. А. Михайлов, А. А. Тихомирова, С. А. Бростилов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 13–21. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-2.