

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

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ В ЦЕХЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

*S. A. Mihailov, V. Ya. Gorjachev, T. Yu. Brostilova, S. A. Brostilov, Yu. A. Shatova*

## APPLICATION OF THE METHOD OF DISTRIBUTED POWER DENSITY TO OPTIMIZE THE LOCATIONS OF THE SUBSTATIONS IN THE PLANT ENGINEERING

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Объектом исследования являются системы электроснабжения цехов машиностроительных предприятий. Предметом исследования являются цеховые потребители и источники электроэнергии. Целью работы является задача определения оптимального размещения цеховых подстанций для снижения энергопотерь и металлоемкости линий энергоснабжения. **Материалы и методы.** В работе применен метод распределенных удельных мощностей. Критериями оптимизации являются величины потерь электроэнергии, связанные с ее передачей, а также металлоемкость системы энергоснабжения. **Результаты.** Предложен метод, основанный на том, что все нагрузки, распределенные на поверхности, представлены фигурами в виде тел вращения. Поверхность, ограничивающая эти тела, образована и определяется произведением базовой функции на величину мощности нагрузки. Анализ результатов проводится путем замены группы потребителей электроэнергии на эквивалентный потребитель с определением радиуса рассеяния. **Выводы.** Предлагаемый метод позволяет проектировать системы электроснабжения, обладающие лучшими параметрами и характеристиками по признаку минимальных потерь электроэнергии при ее передаче, а также с минимальной металлоемкостью. Метод обладает универсальностью и может быть использован как для определения оптимального размещения объектов системы электроснабжения населенных пунктов, так и для оптимального размещения компенсаторов реактивной мощности. При установке компенсаторов, кроме того, появляется дополнительное снижение потерь в энергосети, повышается качество электроэнергии, подводимой потребителю.

**A b s t r a c t. Background.** The object of the study is the power supply system of machine-building enterprises. The subject of the study are shop consumers and sources of electricity. The aim of the work is to determine the optimal placement of shop substations to reduce energy losses and metal consumption of power supply lines. **Materials and methods.** The method of the distributed specific capacities is applied in the work. The optimization criteria are the amount of energy losses associated with its transmission, as well as the metal content of the power supply system. **Results.** The method based on the fact that all loads distributed on the surface are represented by figures in the form of rotation bodies is proposed. The surface limiting these bodies is formed and determined by the product of the basic function on the amount of load power. The analysis of the results is carried out by replacing the group of electricity con-

sumers with an equivalent consumer with the determination of the scattering radius. **Conclusions.** The proposed method allows to design power supply systems with the best parameters and characteristics on the basis of minimum power losses during its transmission, as well as with minimum metal content. The method has versatility and can be used to determine the optimal location of the objects of the power supply system of settlements, and for the optimal placement of reactive power compensators. When installing compensators, in addition, there is an additional reduction in losses in the power grid, increases the quality of electricity supplied to the consumer.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, оптимизация, электроподстанция, потребитель электроэнергии, металлоемкость, ненаправленный граф.

**Key words:** power system, optimization, substation, consumer of electricity, metal, undirected graph.

### *Введение*

Проектирование систем электроснабжения машиностроительных предприятий является сложной задачей, потому что проектировщики этих систем, как правило, имеют дело с большим количеством исходной информации, объем которой на каждом этапе проектирования увеличивается и одновременно меняется сам характер данных. Происходит это, как правило, из-за увеличения количества потребителей электроэнергии.

Обработка и анализ больших массивов информации и высокая динамика их параметров привели к широкому применению вычислительной техники и, как следствие, к необходимости разработки новых подходов и методов проектирования систем электроснабжения. Особая потребность имеется в специальном подходе, позволяющем проводить анализ и описание структуры распределения нагрузок с учетом их взаимного геометрического расположения источников и потребителей.

О том, как распределяется нагрузка на промышленной территории, судят по картограммам нагрузок, которыми называют специальный план, визуализирующий распределение нагрузок потребителей электроэнергии.

Построение картограммы производят и на планах размещения потребителей энергии в каждом цехе и на генеральном плане предприятия. Анализ картограмм проводят на основе различных методов.

### *Метод центра масс*

К наиболее простому из них относят метод, изображающий степень интенсивности распределения нагрузок потребителей в виде равновысоких цилиндров [1–3]. Для центров цилиндров координатами служат координаты мест размещения потребителей электроэнергии, а величина радиуса сечения цилиндра характеризует расчетную мощность потребителя электроэнергии. Оптимальное размещение подстанций зависит от координат центра масс полученного «тела».

Формирование системы электроснабжения предполагает также и определение мест размещения компенсаторов, и, как следствие, предполагает построение двух картограмм: отдельно для активных нагрузок и отдельно для реактивных.

### *Метод эквипотенциальных контуров*

Применение этого метода предполагает проведение аналогии между значениями мощности потребителей и величинами потенциалов в тех же точках. Каждому месту (или точке) размещения потребителя присваивают потенциалы, которые равны значениям мощности потребителей. При перемещении в другую точку значения их потенциалов уменьшаются и в некоторых особо удаленных от мест размещения потребителей приближаются к нулю. Таким образом, образуется поверхность, имеющая линии равного потенциала, которые характеризуются значениями функции, определяемой суммой величин потенциалов всех источников энергии [1, 4–6].

Для построения результирующей поверхности, как правило, применяется показательная форма потенциальной функции

$$\Pi(x, y) = \sum_{i=1}^n P_i e^{-\alpha[(x-x_i)^2+(y-y_i)^2]},$$

где  $\alpha$  – параметр, характеризующий контрастность рельефа графика потенциальной функции, заранее задаваемый проектировщиком.

Описанные выше методы не обладают свойством универсальности и используются только для вычисления координат оптимального размещения одной подстанции, снабжающей электроэнергией заданных потребителей. Метод распределенных удельных мощностей, с одной стороны, имеет более широкую область применения, а с другой – предлагаемый метод обладает большей универсальностью.

### *Метод распределенных удельных мощностей*

В основе дальнейшего анализа нагрузок использован метод распределенных удельных мощностей, суть которого заключается в следующем. В качестве базовой в этом методе используется функция следующего вида [2]:

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

График функции представляет собой колоколообразную поверхность.

На плане цеха, населенного пункта или района каждый потребитель представляется поверхностью, описываемой уравнением

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

где  $s_{уд}(x, y)$  – это удельная мощность в точке  $x, y$ , кВА/м<sup>2</sup>;  $S_{при}$  – мощность электрического приемника, приведенная к длительному режиму;  $(a, b)$  – координаты места подключения потребителя;  $\sigma$  – величина, определяющая степень рассеяния и названная «радиусом рассеяния» удельной мощности, м.

Пример поверхности представлен на рис. 1.

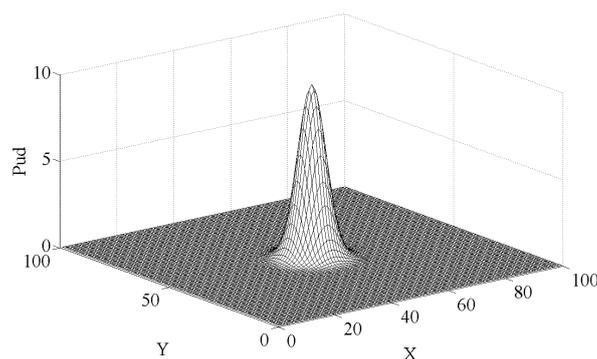


Рис. 1. Пример поверхности

Удельная мощность каждого ЭП распределяется по поверхности. Однако при изменении радиуса рассеяния  $\sigma$  объем фигуры, ограниченный этой поверхностью и плоскостью  $x, y$ , будет оставаться равным величине мощности энергопотребителя.

### *Технология метода удельных мощностей*

При вычислении координат рекомендуемого места размещения цеховых подстанций на основе метода удельных мощностей исходными данными являются:

- система координат, привязанная к плану цеха;
- координаты мест размещения потребителей;
- величина полной мощности потребителя;
- значение коэффициента мощности потребителя (или значение активной и реактивной мощности потребителя);
- категория потребителя;
- так называемый суточный график нагрузки потребителя.

Применение метода позволяет производить:

- вычисление координат оптимальных мест размещения подстанций по критерию минимальных потерь при передаче электроэнергии, т.е. потерь в линиях электропередач;
- вычисление наиболее эффективных мест размещения компенсаторов для увеличения КПД систем электроснабжения;
- исследование и анализ системы электроснабжения проводится в среде MatLAB.

Основные этапы расчета:

- сбор информации о потребителях;
- подготовка mat – файла потребителей уровня напряжений 380 и 660 В для определения координат подстанций 6, 10, 20 кВ;
- вычисление координат вершин поверхности при различных значениях радиуса рассеяния;
- определение границ «зоны действия» для каждой подстанции;
- уточнение мест оптимального размещения подстанций;
- вычисление значения мощности подстанции;
- определение категории подстанций;
- выбор рекомендуемого типа трансформаторов.

Сравним метод удельных мощностей и метод центра масс. С целью упрощения и сокращения вычислений будем считать, что три нагрузки, мощностью по 1 кВт каждая, расположены на равном расстоянии в 10 м от центра плоскости, имеющей размеры 100×100 м на равном расстоянии друг от друга по окружности радиусом, равным 10 м.

Сумма удельных мощностей дает результирующую поверхность

$$P_{ud}(x, y) = P_{ud1}(x, y) + P_{ud2}(x, y) + P_{ud3}(x, y),$$

где  $P_{ud}$  – результирующая удельная мощность в точке с координатами  $x, y$ ;  $P_{ud1}, P_{ud2}, P_{ud3}$  – составляющие удельной мощности от первого, второго и третьего потребителя.

Рассмотрим динамику изменения поверхности при изменении радиуса рассеяния.

График, представленный на рис. 2, соответствует распределению удельной мощности по поверхности при  $\sigma = 3$ .

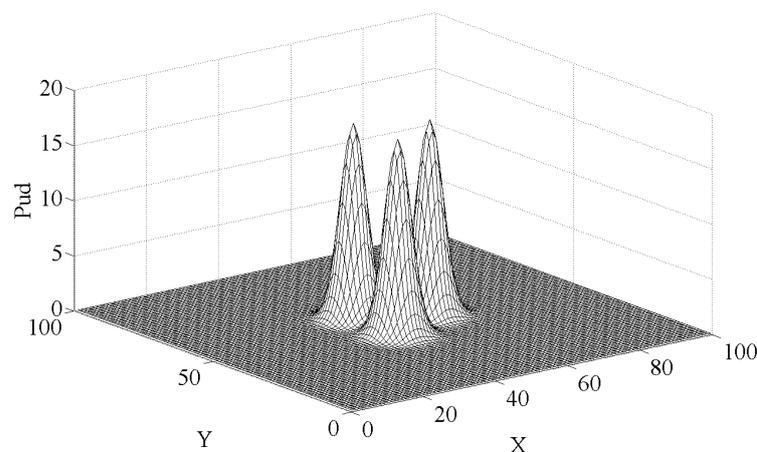


Рис. 2. Распределение удельной мощности по поверхности

Координаты вершин были равными

$$y_1 = 42, y_2 = 50, y_3 = 58, x_1 = 45, x_2 = 60, x_3 = 45.$$

При изменении радиуса рассеивания суммарный объем фигуры не изменяется. При увеличении коэффициента растекания до 15 получаем результирующую поверхность с формой, представленной на рис. 3, похожей на одиночную нагрузку.

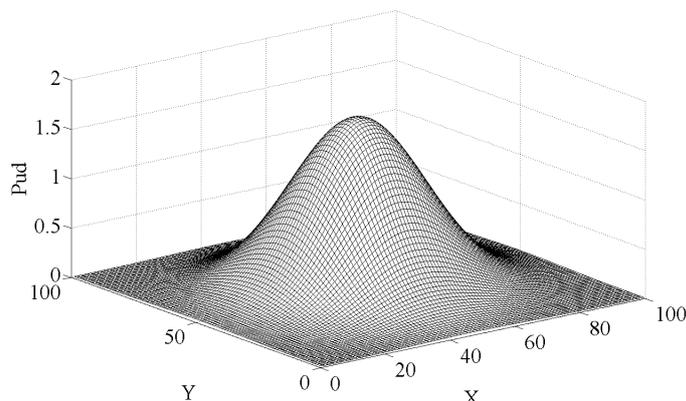


Рис. 3. Поверхность при увеличении коэффициента растекания до 15

Объем, ограниченный сверху поверхностью, не изменился и остался равным 3000 единицам, высота вершины составила  $1,7 \text{ Вт/м}^2$ . Вершина имеет координаты  $x = 50$ ,  $y = 50$ .

Итак, найден центр масс трех нагрузок, равных по величине. Это доказывает справедливость метода удельных мощностей.

#### ***Применение метода удельных мощностей для определения оптимальных мест расположения нескольких подстанций***

Исследуем эффективность нового метода на примере частично симметричных девяти нагрузок. Значения мощностей для каждой нагрузки и координаты их размещения на поверхности размером  $200 \times 200 \text{ м}$  представлены на рис. 4.

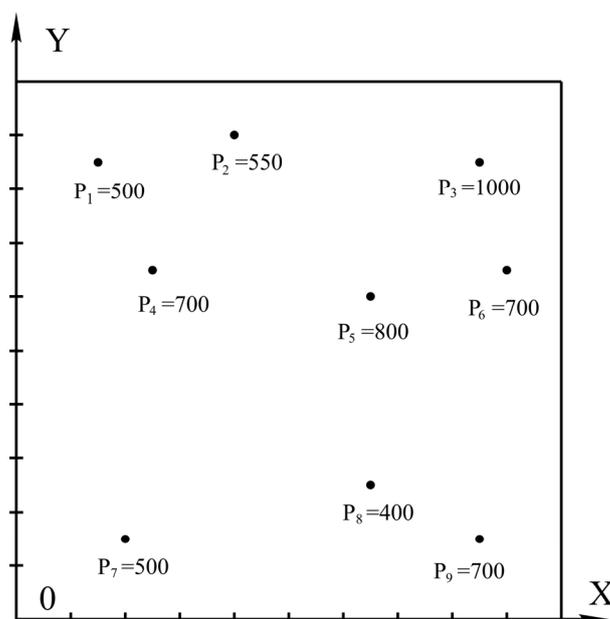


Рис. 4. Значения мощностей для каждой нагрузки и координаты их размещения

Параметры потребителей:

$$P_1 = 500, \quad x_1 = 30, \quad y_1 = 170,$$

$$P_2 = 550, \quad x_2 = 80, \quad y_2 = 180,$$

$$P_3 = 1000, \quad x_3 = 170, \quad y_1 = 170,$$

$$P_4 = 700, \quad x_4 = 50, \quad y_4 = 130,$$

$$P_5 = 800, \quad x_5 = 130, \quad y_5 = 120,$$

$$P_6 = 700, \quad x_6 = 180, \quad y_6 = 130,$$

$$P_7 = 500, \quad x_7 = 40, \quad y_7 = 30,$$

$$P_8 = 400, \quad x_8 = 130, \quad y_8 = 50,$$

$$P_9 = 700, \quad x_9 = 170, \quad y_9 = 30.$$

При значении радиуса рассеяния равным  $\sigma = 6$  получаем значения координат центров нагрузок, совпадающие с координатами нагрузок.

График распределения удельных мощностей при данном значении радиуса рассеяния показан на рис. 5.

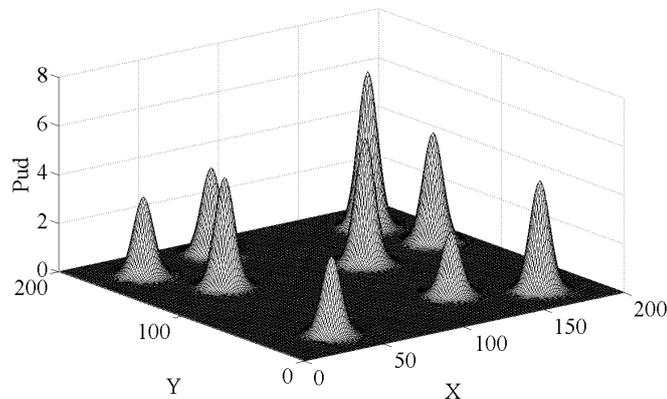


Рис. 5. График распределения удельных мощностей

Если значение радиуса рассеяния равно 25, количество характерных вершин, а следовательно, и мест размещения подстанций становится равным четырем (рис. 6).

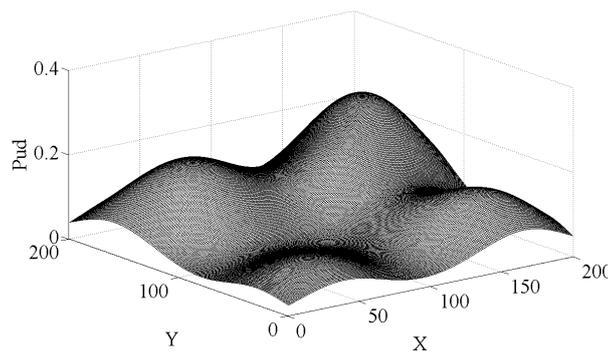


Рис. 6. Количество вершин и мест размещения подстанций

Изменив значение радиуса рассеяния, получаем три центра масс, соответствующие расчетным значениям соответствующих групп. Центры нагрузок, определяющие места размещения подстанций для питания трех групп потребителей, будут иметь координаты  $P_{11}(40,100)$ ,  $P_{12}(130,150)$  и  $P_{13}(130,48)$ .

Очевидно то, что предлагаемый метод определения мест размещения подстанций упрощает вычислительные процедуры на основе применения вычислительной техники, особенно, если имеется произвольное количество потребителей.

**Определение зон подключения потребителей к подстанциям,  
расположенным в центрах электрических нагрузок**

Определение центров электрических нагрузок не решает полностью проблем проектирования схемы электроснабжения района, так как нет ясности в том, к какой из подстанций, расположенных в центрах нагрузок, подключить потребитель электроэнергии. Для этого предлагается использовать линии «водораздела» поверхности удельных мощностей. Именно эти линии соответствуют минимальным удельным мощностям.

При значении радиуса рассеяния равном 5 м график распределения удельной мощности по площади представлен на рис. 5.

Для заданного радиуса рассеяния границами зон подключения потребителей, очевидно, будут границы между потребителями. В программной среде MatLAB получена картина размещения разделительных стен, представленная на рис. 7.

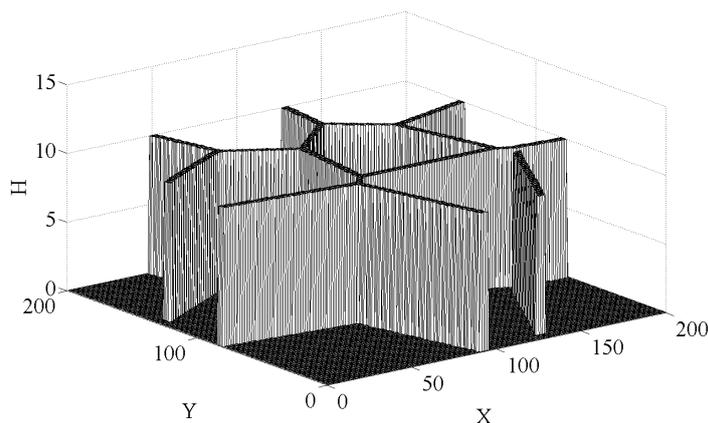


Рис. 7. Разделительные стены

Разделительные стены разделили поверхность на девять зон, которые соответствуют девяти потребителям. Более наглядным является рис. 8, на котором представлены зоны питания с местами размещения потребителей.

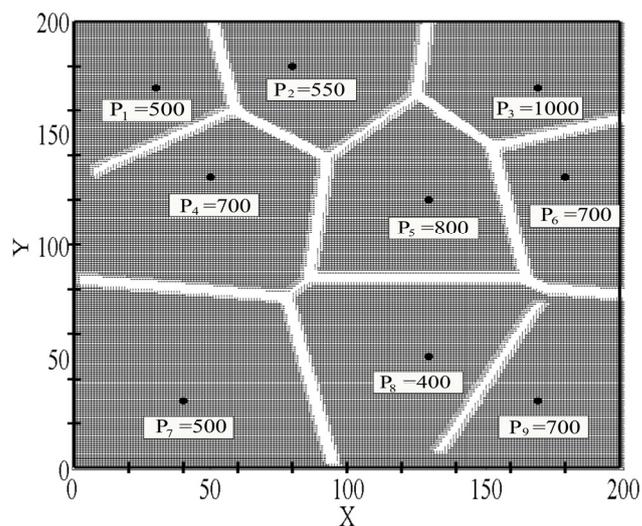


Рис. 8. Разделение поверхности на девять зон

На рисунке светлые полосы являются границами раздела зон. При увеличении радиуса рассеяния распределение удельных мощностей по поверхности в значительной степени изменяется.

При значении радиуса рассеяния равным 25 количество характерных вершин, а следовательно, и мест размещения подстанций становится равным четырем (см. рис. 6).

При данном значении радиуса рассеяния на поверхности четко выражены четыре зоны. Разделительные стены, представленные на рис. 9, четко выделяют зоны действия каждой из возможных подстанций.

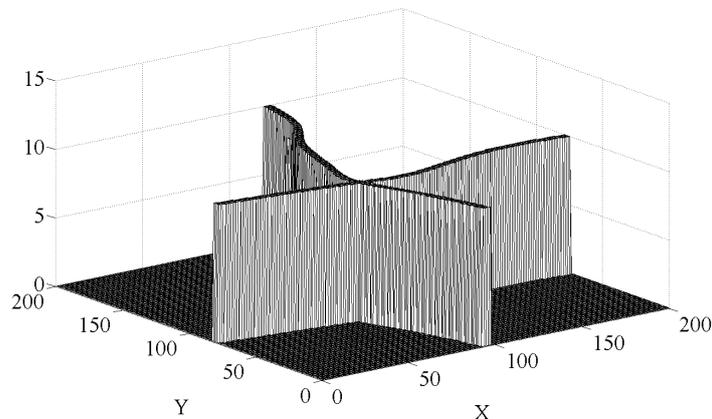


Рис. 9. Зоны действия четырех подстанций

Распределение потребителей по зонам подключения представлено на рис. 10.

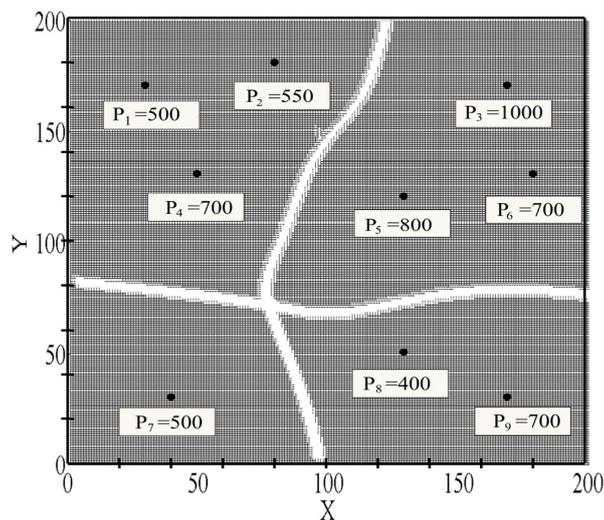


Рис. 10. Распределение потребителей по зонам подключения

Координаты вершин или координаты центров электрических нагрузок при радиусе рассеяния равном 25 м имеют следующие значения:

$G_1$  имеет координаты  $x_{g1} = 48$  и  $y_{g1} = 150$ ;  $G_2$  имеет координаты  $x_{g2} = 169$  и  $y_{g2} = 152$ ;  $G_3$  имеет координаты  $x_{g3} = 40$  и  $y_{g3} = 30$ ;  $G_4$  имеет координаты  $x_{g4} = 162$  и  $y_{g4} = 34$ .

Программа определения зон подключения нагрузок рекомендует подключить к первой подстанции первый, второй и четвертый потребителей. Ко второй подстанции следует подключить третьего, шестого и пятого потребителя. Седьмой потребитель рекомендуется обеспечивать электрической энергией от индивидуальной подстанции. Восьмой и девятый потребители рекомендуется питать от отдельной подстанции  $G_4$ .

После разбиения всех потребителей по зонам подключения следует проверить значения координат центров электрических нагрузок для каждой зоны без учета влияния потребителей других зон.

На рис. 11 представлен график распределения удельной мощности первой подстанции, расположенной в центре  $G_1$ , при значении радиуса рассеяния равным 25.

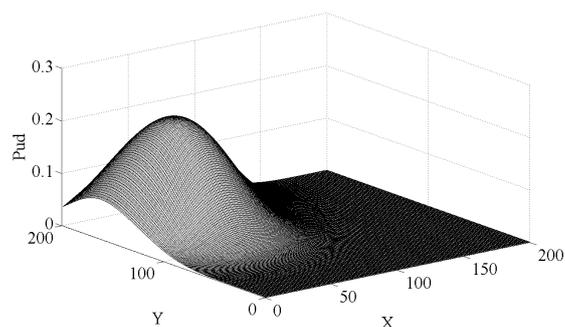


Рис. 11. График распределения удельной мощности первой подстанции

Для третьей зоны значения координат центра электрических нагрузок совпадают со значениями координат размещения самой нагрузки. Вычисления показали для рассматриваемого случая то, что уточненные значения координат центров электрических нагрузок практически совпадают со значениями координат вершин, вычисленных ранее с ошибкой в 1...3 м. Поэтому особой необходимости в уточнении мест размещения подстанций нет.

***Пример применения метода распределенных удельных мощностей для определения оптимальных мест размещения подстанций цеха машиностроительного предприятия***

На рис. 12 представлено распределение потребителей цеха. Применение метода определило оптимальные места размещения подстанций с соответствующими координатами вершин поверхности, представленными на рис. 13.

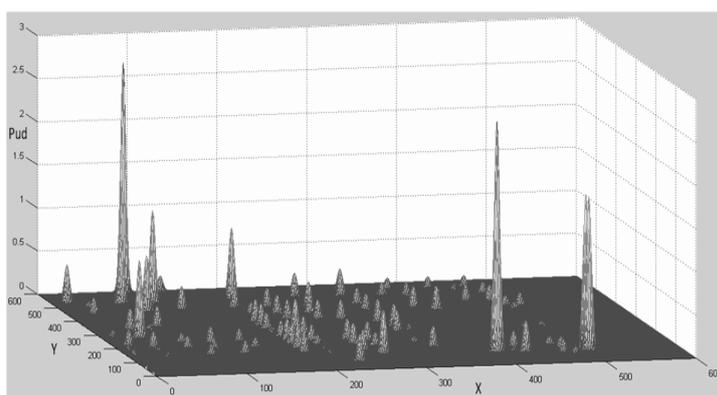


Рис. 12. Распределение потребителей цеха

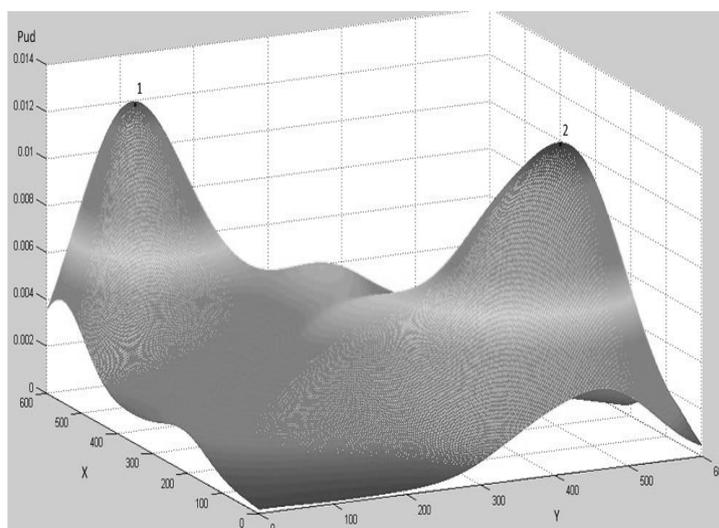


Рис. 13. Места размещения подстанций

В соответствии с рекомендациями использования метода определены зоны действия подстанций. Граница зон действия подстанций представлена на рис. 14 белой линией. Все потребители, расположенные выше границы зон влияния, рекомендуется подключить к подстанции, расположенной в первом центре электрических нагрузок (ЦЭН 1). Все потребители цеха, расположенные ниже границы, рекомендуется подключить к подстанции, расположенной во втором центре электрических нагрузок (ЦЭН 2).

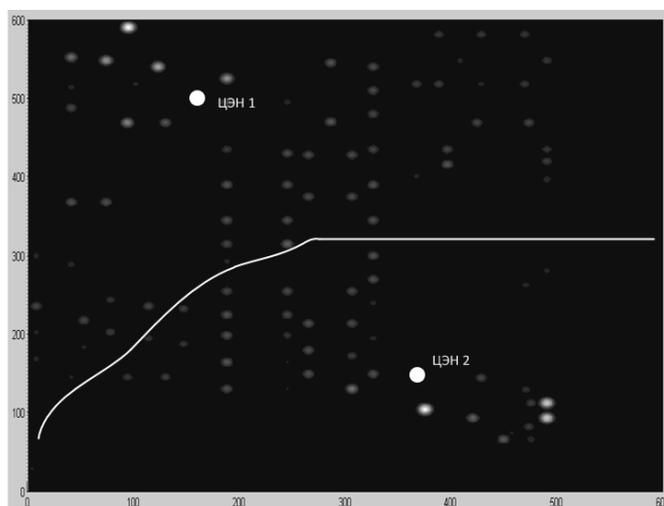


Рис. 14. Граница зон действия подстанций

### Заключение

Применение метода распределенных удельных мощностей наиболее эффективно при определении оптимальных мест размещения цеховых подстанций различных предприятий. Метод обладает универсальностью и может быть использован как для определения оптимального размещения объектов системы электроснабжения населенных пунктов 6, 10 кВ по признаку минимальных потерь при передаче электроэнергии с минимальной металлоемкостью, так и для оптимального размещения компенсаторов реактивной мощности в цехе машиностроительного предприятия.

### Библиографический список

1. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 466 с.
2. Каменева, В. В. К вопросу определения местоположения главных понизительных или распределительных подстанций промышленных предприятий / В. В. Каменева, Э. А. Киреева. – Электричество, 1972. – 73 с.
3. Generalized structural models of complex distributed objects / M. Yu. Mikheev, T. V. Zhashkova, A. B. Shcherban, A. K. Grishko, I. M. Rybakov // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS) (Yerevan, Armenia, October 14–17, 2016). – Yerevan, 2016. – P. 1–4. – DOI 10.1109/EWDTS.2016.7807742.
4. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
5. Grishko, A. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems / A. Grishko, N. Goryachev, N. Yurkov // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, № 23. – P. 43842–43845.
6. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model / A. Grishko, N. Goryachev, I. Kochegarov, S. Brostilov, N. Yurkov // 13<sup>th</sup> International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET) (Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23–26, 2016). – Lviv-Slavsko, 2016. – P. 214–218. – DOI 10.1109/TCSET.2016.7452017.
7. Горячев, В. Я. Математические методы определения центра распределенных по поверхности нагрузок / В. Я. Горячев, С. А. Михайлов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4-2. – С. 276–280.

8. *Grishko, A.* Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict / A. Grishko // 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) (Novosibirsk, Russia, October 03–06, 2016). – Novosibirsk, 2016. – Vol. 02. – P. 107–111. – DOI 10.1109/APEIE.2016.7806423.
9. *Михайлов, С. А.* Использование метода распределенных удельных мощностей для определения мест установки источников питания в цехе машиностроительного предприятия / С. А. Михайлов, В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 85–90.
10. *Grishko, A.* Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions / A. Grishko, I. Kochegarov, N. Goryachev // XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (Saint Petersburg, Russia, May 24–26, 2017). – Saint Petersburg, 2017. – P. 210–212. – DOI 10.1109/SCM.2017.7970540.
11. Methods of Calculating the Strength of Electric Component of Electromagnetic Field in Difficult Conditions / P. Andreev, N. Yurkov, I. Kochegarov, A. Grishko, A. Yakimov // 12th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE) (Saratov, Russia, September 22–23, 2016). – Saratov, 2016. – Vol. 1. – P. 1–7. – DOI 10.1109/APEDE.2016.7878895.
12. *Бростилов, С. А.* Исследование программных пакетов моделирования влияния электромагнитных воздействий на изделия радиоэлектронных средств / С. А. Бростилов, Т. Ю. Бростилова, Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, А. О. Бекбаулиев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 206–209.
13. *Гришко, А. К.* Многокритериальный выбор оптимального варианта сложной технической системы на основе интервального анализа слабоструктурированной информации / А. К. Гришко, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 97–107.
14. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. Ostreikovskiy, Ye. Shevchenko, N. Yurkov, I. Kochegarov, A. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 944, № 1. – P. 1–10. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085.
15. *Grishko, A.* Reliability Analysis of Complex Systems Based on the Probability Dynamics of Subsystem Failures and Deviation of Parameters / A. Grishko, N. Yurkov, N. Goryachev // 14<sup>th</sup> International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (Polyana, Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, February 21–25, 2017). – Polyana, Svalyava, 2017. – P. 179–182. – DOI 10.1109/CADSM.2017.7916109.
16. *Бростилова, Т. Ю.* Система контроля температуры энергетических объектов на базе волоконно-оптических датчиков / Т. Ю. Бростилова, С. А. Бростилов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 139.

**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 Academician Chelomey street, Moscow, Russia)

**Горячев Владимир Яковлевич**

доктор технических наук, профессор,  
 кафедры 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,  
 кафедры 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)

**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)

**Шатова Юлия Анатольевна**

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

***Shatova Yuliya Anatol'evna***

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

---

УДК 621.311

**Применение метода распределенной удельной мощности для оптимизации размещения подстанций в цехе машиностроительного предприятия / С. А. Михайлов, В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова, С. А. Бростилов, Ю. А. Шатова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 2 (24). – С. 47–58. – DOI 10.21685/2307-5538-2018-2-7.**