

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ УДЕЛЬНЫХ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ УСТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ В ЦЕХЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

С. А. Михайлов, В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова

### *Введение*

Более двух третей вырабатываемой в нашей стране электроэнергии распределяется и потребляется в цеховых электросетях (ЦЭС). При существующих на сегодняшний день требованиях по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, определенных ФЗ № 261, этот факт требует рассмотрения эффективности ЦЭС. Во многом эффективность определяется структурой сети. Типичная ЦЭС имеет иерархичную структуру. На нижнем уровне располагаются электроприемники (ЭП), а на верхнем уровне этой структуры располагаются цеховые трансформаторные подстанции (ЦТП). Расположение подстанций оказывает большое значение на структуру ЦЭС и в конечном счете определяет ее эффективность. От правильного выбора места установки подстанции зависит величина потерь электроэнергии в линиях электропередач, а так же качество напряжения, подводимого к потребителям.

### *Задача определения мест расположения ЦТП*

На сегодняшний день сформулированы основные методики определения мест расположения ЦТП [1–4]. Этому вопросу были посвящены работы А. А. Федорова. В его работах определено, что за оптимальное место расположения ЦТП по условию минимального расхода проводникового материала может приниматься центр электрических нагрузок (ЦЭН), определенный следующим образом:

$$\xi_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i x_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad \text{и} \quad \eta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_i y_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (1)$$

где  $\xi_0$ ,  $\eta_0$  – это координаты ЦЭН;  $x_i$ ,  $y_i$  – координаты  $i$ -й нагрузки;  $P_i$  – мощность  $i$ -й нагрузки [4].

Для удобства назовем этот метод «классическим».

В [5] для отыскания координат ЦЭН предложен метод распределенных удельных мощностей. Достоинства и недостатки данного метода по сравнению с классическим рассмотрены на примере цеха машиностроительного предприятия.

Из оборудования в цехе имеются фрезерные, сверлильные, шлифовальные, токарные станки, кран-балки, вытяжные системы, электропечи и бариевые ванны для обработки металла. В качестве исходных данных в обоих методах используются координаты и мощности ЭП.

Для расчета будем использовать значения мощностей нагрузки, приведенные к длительному режиму  $P_{пр}$ :

$$P_{пр} = P_n \sqrt{ПВ}, \quad (2)$$

где  $P_n$  – номинальная активная мощность потребителя; ПВ – продолжительность включения.

Метод распределенных удельных мощностей основан на рассеянии мощности отдельных ЭП в соответствии с (3):

$$p_{уд}(x, y) = P_{при} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-a)^2 + (y-b)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где  $p_{уд}(x, y)$  – это удельная мощность в точке  $x, y$ , кВт/м<sup>2</sup>;  $P_{при}$  – мощность ЭП, приведенная к длительному режиму;  $(a, b)$  – координаты ЭП;  $\sigma$  – величина, определяющая степень рассеяния и названная «радиус рассеяния» удельной мощности, м.

В соответствии с (3) удельная мощность каждого ЭП рассеивается по колоколообразной поверхности. Объем, заключенный под этой поверхностью, пропорционален мощности ЭП.

На рис. 1 изображено распределение удельных мощностей всех ЭП рассмотренного для примера цеха при значении  $\sigma = 0,2$  м. Поскольку в соответствии с условиями метода радиус рассеяния задается одинаковым для каждого ЭП, мощности их будут характеризоваться высотой поверхностей.

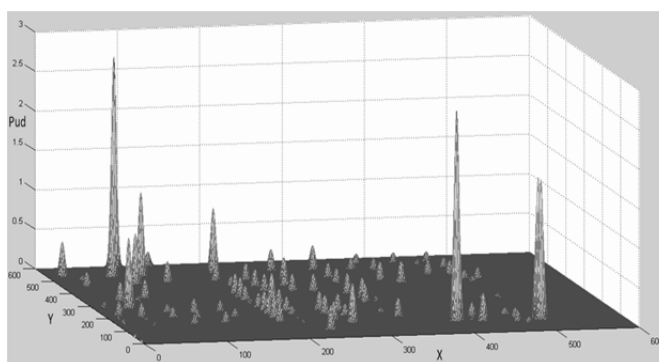


Рис. 1. Поверхность распределенных удельных мощностей потребителей цеха при малом радиусе рассеяния

Для определения координат (ЦЭН) необходимо увеличить значение радиуса рассеяния  $\sigma$  до 15 м. Распределение удельных мощностей при этом значении  $\sigma$  изображено на рис. 2.

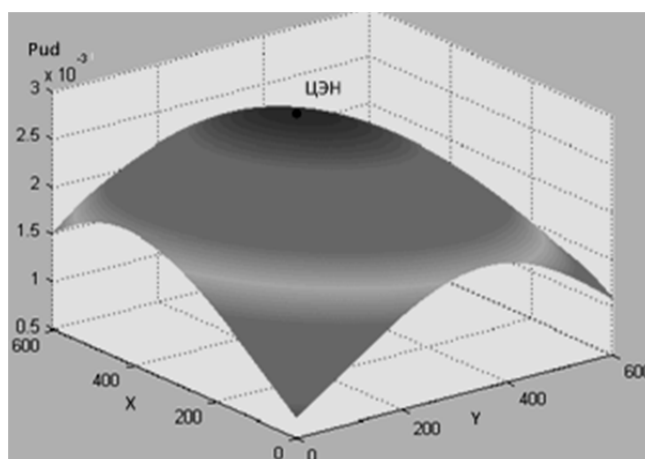


Рис. 2. Распределение удельных мощностей при  $\sigma = 15$  м

Вершина результирующей поверхности проецируется в ЦЭН в соответствии с описанием метода [5]. Объем под результирующей поверхностью равен сумме объемов, заключенных под поверхностями, изображенными на рис. 1. Определенный таким образом ЦЭН имеет координаты  $x = 32$  м,  $y = 25$  м. Следует отметить, что координаты ЦЭН, полученные классическим методом совпадают с координатами, приведенными выше. Это дает основание говорить о справедливости метода распределенных удельных мощностей для определения места расположения одной ЦТП.

Распределения удельных мощностей в соответствии с рис. 1 и 2 являются крайними случаями распределения. Распределения при значениях  $\sigma$  между 0,2 и 15 м определяют координаты узлов ненаправленного графа схемы ЦЭС.

### *Решение задачи выбора критериев*

В качестве критериев сравнения методов определения ЦЭН приняты [6]:

- величина потерь электрической энергии в ЦЭС;
- металлоемкость ЦЭС.

Для оценки величины потерь электроэнергии на передачу при установке одной подстанции в ЦЭН предположим, что каждая нагрузка подключается к источнику отдельной радиальной линией. Такой режим на практике не встречается, однако он подходит для оценочного сравнения величины потерь.

Длина радиальных линий определится следующей зависимостью:

$$l = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (4)$$

где  $(x_i; y_i)$  – координаты ЭП;  $(x_0; y_0)$  – координаты ЦЭН.

Зная длины линий, можно определить и величины потерь на передачу электрической энергии. Суммарные потери мощности будут определяться

$$\Delta P = \sum_{n=1}^i I_{\partial i}^2 \cdot R_i, \quad (5)$$

где  $I_{\partial i}$  – эффективный ток, протекающий по проводнику к  $i$ -му приемнику;  $R_i$  – сопротивление  $i$ -го проводника.

Помимо оценки величины потерь мощности на передачу, необходимо оценивать величину капитальных вложений в систему электроснабжения цеха. Эта величина будет характеризоваться металлоемкостью прокладываемых линий электропередач, т.е. затратой металла проводников питающих нагрузки электрических сетей. Металлоемкость определится произведением длины провода на его сечение, поскольку эти параметры и характеризуют стоимость линии электропередач. Обозначим металлоемкость  $C_m$ , сечение провода  $s$ :

$$C_m = \sum_{n=1}^i l_i s_i, \quad (6)$$

где  $l_i$  – длина  $i$ -го участка сети;  $s_i$  – сечение  $i$ -го участка сети. Сечение выбрано из условия длительно допустимого тока по нагреву проводника.

Рассчитав значения металлоемкости и потерь мощности, можно получить достаточную информацию об эффективности проектируемой системы электроснабжения. Поскольку координаты ЦЭН, определенные классическим методом и методом распределенных удельных мощностей, совпадают, то и полученные значения потерь мощности и металлоемкости будут одинаковыми.

Для выбранного примера из рис. 1 видно, что наиболее мощные ЭП (их поверхности выше) расположены по диагоналям цеха. Это дает основания полагать, что при каком-то значении  $\sigma$  распределение удельных мощностей образует двухвершинную поверхность. Это соответствует двум ЦЭН. Получить такое решение классическим методом нельзя.

Для получения двухвершинной поверхности зададим радиус рассеяния равным  $\sigma = 6$  м. Результат распределения удельных мощностей представлен на рис. 3.

Вершина 1 имеет координаты  $x_1 = 53$   $y_1 = 11$ , вершина 2 –  $x = 10$ ,  $y = 44$ . Поскольку установка дополнительной ЦТП в цехе – весьма затратное мероприятие и эти расходы могут поглотить всю экономию, полученную от сокращения суммарной длины линий внутрицеховой сети, предлагается такой вариант не использовать. Пусть мощность трансформаторов в ЦТП выбирается из суммарной мощности ЭП всего цеха. ЦТП устанавливается в первом ЦЭН, тогда во втором ЦЭН необходимо установить распределительный пункт (РП), запитанный от ЦТП. Такой вариант повлечет удорожание только на стоимость РП.

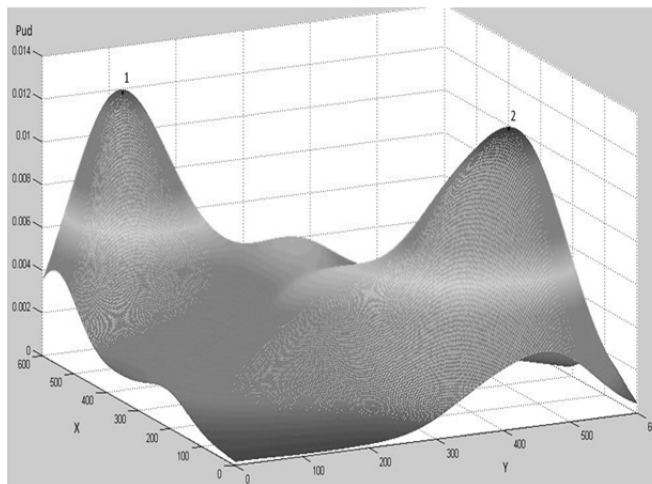


Рис. 3. Распределение удельных мощностей по площади цеха при радиусе рассеяния  $\sigma = 6$  м

После определения мест установки подстанций следует решить вопрос о распределении ЭП между источниками питания (ЦТП и РП). На сегодняшний день такую задачу принято решать методом кластерного анализа [7–9]. Метод распределенных удельных мощностей позволяет решить и эту проблему. Граница зон подключения потребителей будет определена линией минимальных значений удельных мощностей при том же значении радиуса рассеяния  $\sigma$ . Граница, полученная таким образом, изображена на рис. 4.

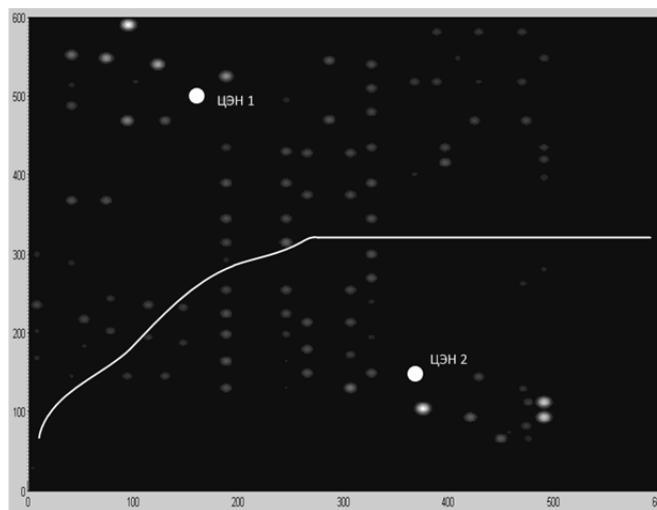


Рис. 4. Границы подключения потребителей к подстанциям

Будем считать, что длины кабелей, соединяющих потребителей с подстанциями, равны расстоянию от потребителей до ЦТП и РП.

Длины кабелей потребителей ЦТП

$$l_{1i} = \sqrt{(x_{1i} - x_1)^2 + (y_{1i} - y_1)^2}. \quad (7)$$

Длины кабелей потребителей РП

$$l_{2i} = \sqrt{(x_{2i} - x_2)^2 + (y_{2i} - y_2)^2}, \quad (8)$$

где  $(x_{1i}, y_{1i})$  и  $(x_{2i}, y_{2i})$  – координаты потребителей, относящихся к первой и второй группе соответственно;  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$  – это координаты ЦТП и РП соответственно.

Металлоемкость системы с двумя ЦЭН пропорциональна суммарной длине проводников, так как сечения кабелей, питающих потребителей, не изменились.

Это заключение справедливо только для принятого допущения, что потребители подключены к ЦТП и РП радиальными линиями.Metalлоемкость сети электроснабжения при наличии двух ЦЭН в цехе определяется суммой

$$C_m' = C_{m1} + C_{m2}, \quad (9)$$

где  $C_m'$  – суммарная металлоемкость сети при использовании двух ЦЭН;  $C_{m1}$  – металлоемкость кабелей от ЦТП;  $C_{m2}$  – металлоемкость кабелей от РП.

В свою очередь

$$C_{m1} = \sum_{n=1}^i l_{1i} \cdot s_{1i} \quad (10)$$

и

$$C_{m2} = \sum_{n=1}^i l_{2i} s_{2i}, \quad (11)$$

где  $l_{1i}, l_{2i}$  – длины кабелей от ЦТП и РП соответственно;  $s_{1i}, s_{2i}$  – сечения кабелей, подключаемых к ЦТП и РП соответственно.

Расчеты указывают на то, что экономия металла при двух ЦЭН составляет 31 %.

Величина потерь мощности на передачу электрической энергии будет пропорциональна квадрату тока нагрузки и сопротивлению линий электропередач. Поскольку мощности нагрузок в цехе не изменятся при двух ЦЭН, значения токов останутся неизменными. Сумма потерь на передачу электрической энергии будет пропорциональна металлоемкости системы. Снижение металлоемкости в данном случае сопровождается уменьшением потерь на передачу электрической энергии.

Расчет величин потерь мощности на передачу и сравнение этих величин для двух рассматриваемых случаев показывают, что при установке ЦТП и РП в двух ЦЭН в цехе потери мощности на передачу также снижаются на 31 %.

### *Заключение*

Анализ систем электроснабжения предприятий указывает на то, что использование «центра масс» для определения мест расположения подстанций не всегда эффективен, так как позволяет определить место расположения одной подстанции для предварительно сгруппированных потребителей. Предварительное разделение на группы проводится произвольно без учета критериев оптимальности. Описанный выше метод распределенных удельных мощностей позволяет спроектировать систему электроснабжения, обладающую лучшими характеристиками по признаку минимальных потерь на передачу электрической энергии с минимальной металлоемкостью. Разработанный метод универсален и может быть использован при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий. В дальнейших публикациях будет подробнее рассмотрено определение координат узлов ненаправленного графа ЦЭС, а также применение метода распределенных удельных мощностей для определения оптимальных мест установки компенсаторов реактивной мощности. Установка последних даст дополнительное снижение потерь в сети, а также повысит качество напряжения, подводимого к ЭП.

### *Список литературы*

1. Каменева, В. В. Область рассеяния центра электрических нагрузок / В. В. Каменева. – М. : 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. – 73 с.
3. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 466 с.
5. Горячев, В. Я. Математические методы определения центра распределенных по поверхности нагрузок / В. Я. Горячев, С. А. Михайлов, Ю. А. Шатова // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 166–169.

6. Основные характеристики электромагнитной системы двухкоординатного датчика / В. Я. Горячев, М. В. Комаров, Ю. К. Чапчиков, Ю. А. Шатова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 82–97.
7. 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 Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 206–209.
8. Юрков, Н. К. Системный подход к организации жизненного цикла сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 27–34.
9. Исследование архиваторов с функцией анализа эффективности сжатия данных / Д. Л. Петрянин, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков, А. Г. Дмитриенко // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 136–138.

**Михайлов Сергей Алексеевич**

главный специалист,  
Самарский филиал  
ОАО «Московский узел связи энергетики»,  
(443080, Россия, г. Самара, ул. Революционная, 70,  
офис 404)  
E-mail: mihailov@gmail.com

**Горячев Владимир Яковлевич**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра электроэнергетики и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: gorvlad1@yandex.ru

**Бростилова Татьяна Юрьевна**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра электроэнергетики и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: tat-krupkina@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются пути оптимизации системы электроснабжения цеха машиностроительного завода на основе разработанного авторами метода распределенных удельных мощностей. В качестве критериев оптимизации использована величина потерь на передачу электрической энергии и металлоемкость системы.

**Ключевые слова:** электроснабжение цеха, подстанция, оптимизация, потребитель электрической энергии, потери электроэнергии, металлоемкость.

УДК 621.311

**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.**

**Mikhaylov Sergey Alekseevich**

chief specialist,  
Samara branch of OJSC «Moscow unit of energy»  
(443080, office 404, 70 Revolyutsionnaya street,  
Samara, Russia)

**Goryachev Vladimir Yakovlevich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of electricity and electronics,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Brostilova Tat'yana Yur'evna**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of electricity and electronics,  
Penza State University  
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Abstract.** In the article considered the ability to install two substation in the workshop. Is offered to use the method of distribution specific power for determine the optimum installation location of substation. The power losses value and metal consumption is compared for options of one or two substations.

**Key words:** electricity, substation, optimization, consumer of electricity, electrical energy losses, metal consumption.