

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Е.И. Грачева, Н.В. Анисимова

Одним из наиболее распространенных методов оценки потерь электроэнергии является регрессионный анализ, который позволяет получить уравнение регрессии, связывающее потери с воздействующими на них обобщенными факторами. В данной статье были рассмотрены регрессионные модели для определения величины эквивалентного сопротивления линий, а также потерь электрической энергии в электрических сетях низкого напряжения. Для решения поставленной задачи были выбраны факторы, которые влияют на значение выходной величины, а также определены границы их изменения. К таким факторам можно отнести: длину линий, загрузку и сечение линий сети, количество линий и температуру окружающей среды. На основании обобщенных параметров согласно приведенным в статье выражениям для определения эквивалентного сопротивления схем электроснабжения были получены регрессионные модели. Такие модели позволяют учитывать динамику изменения цеховой электрической сети. Также были построены номограммы для линий с различным сечением, средней длиной и загрузкой, которые позволяют определить эквивалентное сопротивление цеховых сетей любой конфигурации без трудоемких вычислений.

Ключевые слова: потери электроэнергии, регрессионный анализ, эквивалентное сопротивление линий.

Введение

В состав энергосистемы входит несколько тысяч линий электропередач напряжением до 1000 В. Такие сети являются важнейшим звеном в системе электроснабжения промышленных предприятий. Вследствие их большой разветвленности и протяженности линии низкого напряжения характеризуются довольно высокими потерями электроэнергии. Поэтому при наблюдаемом росте стоимости электрической энергии актуально повышение точности расчетов потерь в этих сетях.

Для более точного определения потерь электроэнергии представляется целесообразным применение специализированных моделей, параметры которых легко находятся отдельно для каждой конкретной цеховой сети. При составлении таких моделей все линии радиальной цеховой сети заменяются одной эквивалентной линией.

Эквивалентные параметры моделей вычисляются на основе вероятностно-статистического подхода и учитывают обобщенные физические характеристики сетей. Таким образом, для определения эквивалентного сопротивления можно получить упрощенные выражения, обеспечивающие необходимую точность и позволяющие сократить объем требуемой исходной информации.

В такой ситуации целесообразно воспользоваться методами регрессионного анализа и теории планирования эксперимента, на основе которых в ряде случаев можно получить вероятностно-статистические модели, реализующие зависимость эквивалентного сопротивления сети от ее обобщенных параметров.

Определение эквивалентного сопротивления и потерь электроэнергии в радиальных сетях

Для решения задачи интерполяции [1], в которой функцией цели выступают потери мощности и эквивалентное сопротивление цеховой сети, в качестве факториальных признаков нами выбраны основные обобщенные параметры радиальной цеховой сети:

x_1 – отношение суммарной длины линий цеховой сети к количеству линий, т. е. средняя длина линий

$$l_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n},$$

где l_i – длина i -й линии цеховой сети, м; n – количество линий;

x_2 – величина, равная количеству линий n ;

x_3 – величина, равная эквивалентному удельному сопротивлению линий сети r_{320} при 20 °С;

$$r_{320} = 31,3 \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n S_i l_i},$$

где S_i – сечение i -й линии, мм²; 31,3/ S_i – сопротивление 1 м алюминиевой линии сечением S_i при 20 °С, Ом/м; в случае, когда часть линий сети выполнена проводами или кабелями с медными жилами, используется величина 18,5/ S_i ;

x_4 – квадрат среднеквадратичного коэффициента загрузки линий сети

$$k_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n k_{3i}^2}{n},$$

где $k_{zi} = I_i / I_{номi}$ – коэффициент загрузки i -й линии; I_i – ток в i -й линии, А; $I_{номi}$ – номинальный ток в линии S_i -го сечения, А.

x_5 – температура окружающей среды θ_0 , °С.

С параметром фактора x_3 имеет прямую связь величина сопротивления коммутационных аппаратов, принятых к установке на линии данного сечения. Определив по значению x_3 номинальный ток линии, можно вычислить сопротивление аппарата, используя аналитические зависимости коммутационных аппаратов от номинального тока [2]. На основании статистических данных считаем, что в среднем на линии цеховой сети установлены 2 коммутационных аппарата.

Первоначальные диапазоны варьирования факторов охватывают сети со средней площадью цехов, средняя длина линий сети заключена в пределах от 10 до 100 м при количестве линий от 10 до 20; номинальная мощность цеховых трансформаторов – 250–1600 кВ·А, чему соответствует предел изменения средней величины сечения линий от 16 до 120 мм² (рис. 1). При этом допустимый суммарный ток линий – 380–2400 А (при полной их загрузке). Диапазон изменения коэффициента загрузки линий находится в пределах от 0,3 (что соответствует малонагруженной сети) до 1 (что соответствует полностью загруженной сети). Для температуры окружающей среды приняты пределы, соответствующие крайним значениям температуры помещений цехов +5...+35 °С.

Первоначальные границы изменения факторов представлены в таблице, где $\Delta X_i = \frac{X_{imax} - X_{imin}}{2}$.

Первоначальные границы изменения факторов

Фактор	X_{imin}	X_{icp}	X_{imax}	ΔX_i
$x_1 \rightarrow l_{cp}$, м	10	55	100	45
$x_2 \rightarrow n$	10	15	20	5
$x_3 \rightarrow r_{\Sigma 20}$, Ом/м	1,956	1,108	0,261	0,848
$x_4 \rightarrow k_3^2$	0,09	0,545	1,00	0,455
$x_5 \rightarrow \theta_0$, °С	5	20	35	15

Таким образом, эквивалентное сопротивление радиальных сетей вычисляем по выражению

$$R = \left\{ r_{\Sigma 20} \cdot l \left[1 + 0,004(\theta_{ж} - 20) \right] + \sum r_k \right\} \cdot \frac{1}{n}, \quad (1)$$

$$\theta_{ж} = k_3^2 (80 - \theta_0) + \theta_0, \quad (2)$$

где l – длина проводника, м; $\theta_{ж}$ – температура жилы кабеля, 80 – допустимая температура нагрева жилы кабеля; $\sum r_k$ – сумма сопротивлений автоматических выключателей, установленных на линии.

Для многофакторной корреляционной модели рассматривается следующая форма связи результирующего показателя с факториальными:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{15} x_1 x_5 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{25} x_2 x_5 + b_{34} x_3 x_4 + b_{35} x_3 x_5 + b_{45} x_4 x_5. \quad (3)$$

Для разработки математической модели потерь электроэнергии воспользуемся дробным факторным экспериментом (ДФЭ) типа 2^{5-1} с генери-

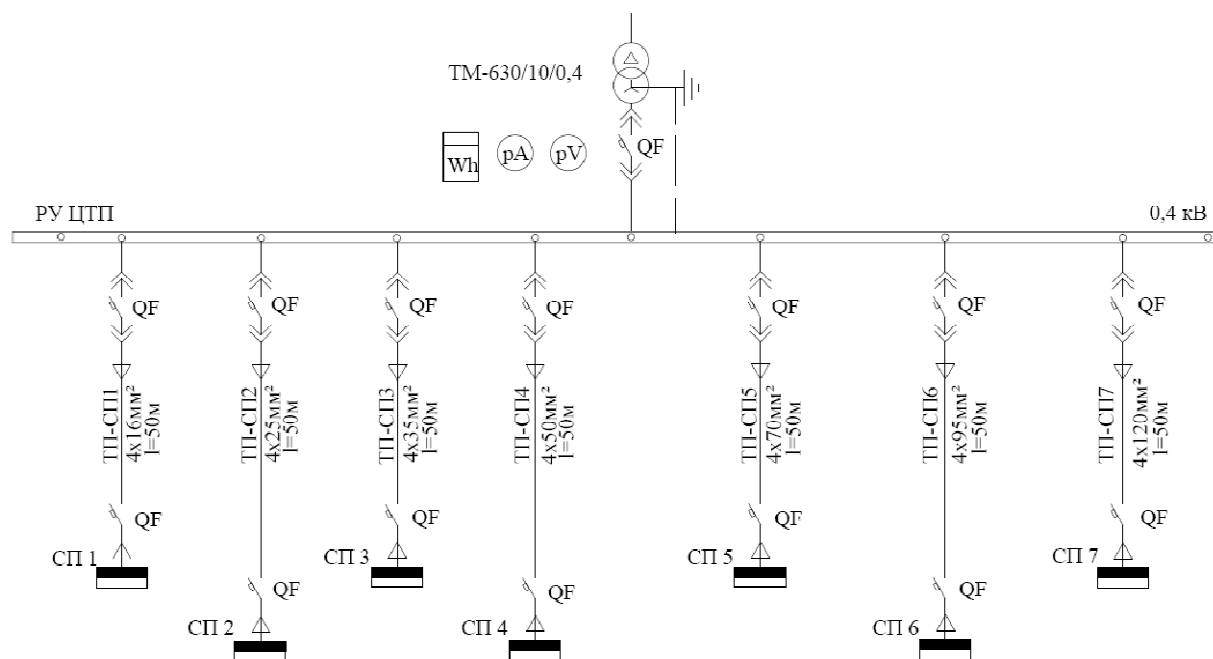


Рис. 1. Радиальная схема цеховой электрической сети

рующим соотношением $x_5 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$ [3]. Этот план позволяет отдельно оценить линейные эффекты и парные взаимодействия. Тройными и выше взаимодействиями пренебрегаем. Значения функции цели при различных диапазонах варьирования факторов вычисляем, используя выражение (1)–(2) применительно к радиальной сети.

В уравнении (3) коэффициенты $b_0 \dots b_{45}$ – искомые коэффициенты уравнения регрессии, вычисляемые по методу наименьших квадратов [4]:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{iu}}{N}; b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N y_u \cdot x_{iu} \cdot x_{ju}}{N},$$

где i, j – номера факторов; x_i, x_j – кодированные значения факторов (+1 или -1); y_u – значение выходной величины (потерь мощности и эквивалентного сопротивления); u – номер опыта; N – число опытов (в нашем случае $N = 16$).

После вычисления значений коэффициентов b_i и b_{ij} полином (3) примет вид регрессионных зависимостей R_3 – эквивалентного сопротивления цеховой сети и ΔP – потерь мощности

$$R_3 = 5,4 + 4,2x_1 - 1,7x_2 - 3,9x_3 + 0,53x_4 + 0,23x_5 - 1,3x_1x_2 - 3,19x_1x_3 + 0,44x_1x_4 + 0,22x_1x_5 + 1,22x_2x_3 - 0,24x_2x_4 - 0,35x_2x_5 - 0,4x_3x_4 - 0,23x_3x_5 + 0,95x_4x_5; \quad (4)$$

$$\Delta P = 48 + 36,4x_1 - 16x_2 - 11,2x_3 + 41,5x_4 + 3,34x_5 - 12x_1x_2 - 11x_1x_3 + 31,4x_1x_4 - 11,05x_1x_5 + 3,62x_2x_3 - 13,9x_2x_4 - 9,6x_2x_5 - 9,8x_3x_4 - 10,5x_3x_5 + 3,53x_4x_5. \quad (5)$$

При исследовании полученного уравнения необходимо отбросить члены с незначимыми коэффициентами. Поэтому в рассматриваемой задаче проводились расчеты в ряде дополнительных точек факторного пространства и полученные в них разности $|R_3 - \hat{R}|$ и $|\Delta P - \hat{\Delta P}|$ (значком \wedge обо-

значены значения, предсказанные аппроксимирующим выражением) использовались в качестве основы для формальной процедуры исключения незначимых коэффициентов, выбрасывание которых лишь весьма слабо влияло на величину указанных разностей.

После исключения незначимых коэффициентов $b_{15} = 0,22; b_{25} = -0,35; b_{35} = -0,23$ в полиноме (4) и $b_{15} = -11,05; b_{25} = -9,6; b_{45} = 3,53$ в полиноме (5) они примут следующий вид:

$$R_3 = 5,4 + 4,2x_1 - 1,7x_2 - 3,9x_3 + 0,53x_4 + 0,23x_5 - 1,3x_1x_2 - 3,19x_1x_3 + 0,44x_1x_4 + 1,22x_2x_3 - 0,24x_2x_4 - 0,4x_3x_4 + 0,95x_4x_5; \quad (6)$$

$$\Delta P = 48 + 36,4x_1 - 16x_2 - 11,2x_3 + 41,5x_4 + 3,34x_5 - 12x_1x_2 - 11x_1x_3 + 31,4x_1x_4 + 3,62x_2x_3 - 13,9x_2x_4 - 9,8x_3x_4 - 10,5x_3x_5. \quad (7)$$

По полиномиальной модели (6) строятся номограммы для определения эквивалентного сопротивления. На рис. 2–3 представлены некоторые из них. Номограммы построены для линий с различным сечением, различных значений средней длины линий и загрузки.

Для определения эквивалентного сопротивления по оси абсцисс требуется отложить значение суммарной величины сечения линий ($s \cdot n$) и по кривой соответствующего коэффициента загрузки линий на оси ординат найти искомое значение.

Получив значения коэффициентов для кодированных факторов, можно перейти к записи полиномов в натуральных величинах. Для преобразования воспользуемся выражением

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i},$$

где \tilde{x}_i – кодированное значение фактора; x_i – действительное значение фактора; x_{i0} – нулевой уровень фактора; Δx_i – шаг варьирования фактора.

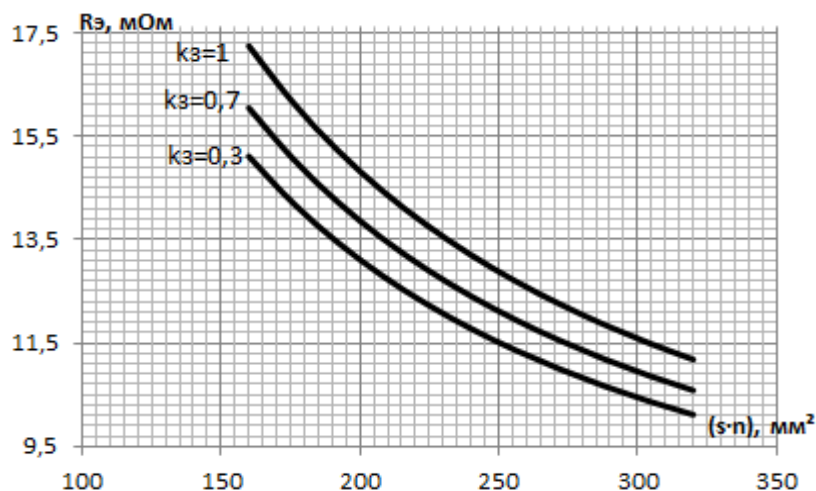


Рис. 2. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 16 мм², средней длины линий 50 м и температуры окружающей среды 20 °С

После подстановки значений кодированных факторов в уравнение регрессии и преобразований получим полиномы в натуральном масштабе, которые будут иметь вид:

$$\begin{aligned}
 R_3 &= 2,5 + 1,3 \cdot l_{cp} - 0,01 \cdot n + 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot s + \\
 &+ 0,16 \cdot k_3^2 + 0,002\theta_0 - 6,5 \cdot 10^{-4} \cdot l_{cp} \cdot n + \\
 &+ 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot l_{cp} \cdot s + 0,003 \cdot l_{cp} \cdot k_3^2 - \\
 &- 4,03 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot s - 0,007 \cdot n \cdot k_3^2 - \\
 &- 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot s \cdot k_3^2 - 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot k_3^2 \cdot \theta_0; \\
 \Delta P &= 5,47 - 0,1 \cdot l_{cp} + 0,3 \cdot n + 0,1 \cdot s + 15,9 \cdot k_3^2 - \\
 &- 0,9 \cdot \theta_0 - 0,01 \cdot l_{cp} \cdot n + 0,002 \cdot l_{cp} \cdot s + 0,3 \cdot l_{cp} \cdot k_3^2 - \\
 &- 0,01 \cdot n \cdot s - 1,5 \cdot n \cdot k_3^2 + 0,3 \cdot s \cdot k_3^2 - 0,003 \cdot s \cdot \theta_0,
 \end{aligned}$$

где входящие в полиномы величины имеют следующие размерности: R_3 – [МОм]; ΔP – [кВт];

l_{cp} – [м]; r_{320} – [МОм/м]; θ_0 – [°С].

Определение эквивалентного сопротивления и потерь электроэнергии в магистральных сетях

Линии магистральных сетей (рис. 4), как правило, представляют собой шинопроводы с распределенной электрической нагрузкой. В качестве параметров, определяющих потери электроэнергии и эквивалентное сопротивление, выступают такие величины, как длина шинопровода, количество приемников, подключенных к шинопроводу и т. д.

Потери мощности в магистральных сетях определяются по выражению

$$\Delta P_{ш} = 3I_s^2 R_{эш}, \quad (8)$$

где $R_{эш}$ – эквивалентное сопротивление шинопровода, вычисляемое из уравнения

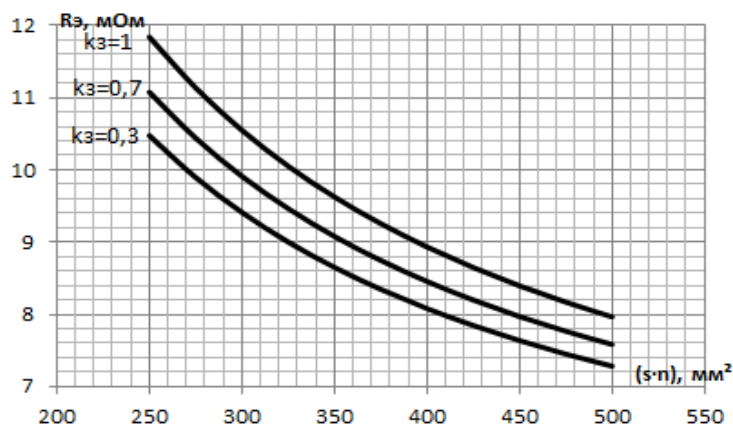


Рис. 3. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 25 мм², средней длины линий 50 м и температуры окружающей среды 20 °С

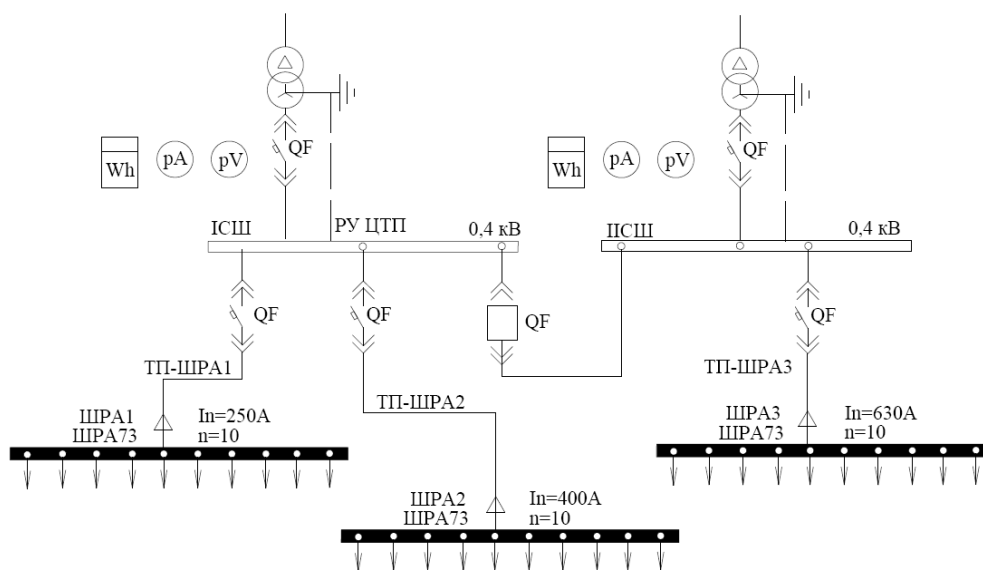


Рис. 4. Магистральная схема цеховой электрической сети

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{320} \cdot l \cdot \frac{1}{6 \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(2 + \frac{1}{n}\right)} + \frac{r_n}{n} \right] \times \left[1 + \alpha (\theta - \theta_0) \right] + \frac{r_k}{n} \quad (9)$$

Здесь r_{20} – сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С, мОм; l – длина шинпровода, м; n – количество приемников, присоединенных к шинпроводу; r_n – сопротивление провода ответвления от шинпровода, мОм; I_3 – эффективный ток, А; r_k – сопротивление коммутационного аппарата ответвления, мОм; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления, 1/°С; θ – температура шинпровода, °С; θ_0 – температура окружающей среды, °С.

Регрессионные модели для определения эквивалентного сопротивления и потерь электроэнергии в шинпроводе определяются согласно алгоритму, приведенному выше для радиальных сетей. По полиномиальной модели для магистральной сети были построены номограммы. Некоторые из них представлены на рис. 5–6. Эквивалентное со-

противление является функцией значения $(s \cdot n)$, где s – сечение шинпровода, n – количество присоединенных приемников.

Определение эквивалентного сопротивления смешанных схем цеховых сетей

Для электроснабжения цеховых потребителей очень редко применяются радиальные или магистральные схемы в чистом виде. Наибольшее распространение обычно находят так называемые смешанные схемы электрических сетей, сочетающие в себе элементы радиальных и магистральных схем.

Для определения эквивалентного сопротивления смешанных схем требуется выделить радиальные и магистральные участки сети. Затем при помощи соответствующих номограмм найти эквивалентные сопротивления выделенных радиальных и магистральных участков – $R_{\text{э(р)}}$ и $R_{\text{э(м)}}$. Эквивалентное сопротивление смешанной схемы сети при параллельном соединении радиального и магистрального участков определяется как

$$R_{\text{э(см)}} = \frac{R_{\text{э(р)}} R_{\text{э(м)}}}{R_{\text{э(р)}} + R_{\text{э(м)}}$$

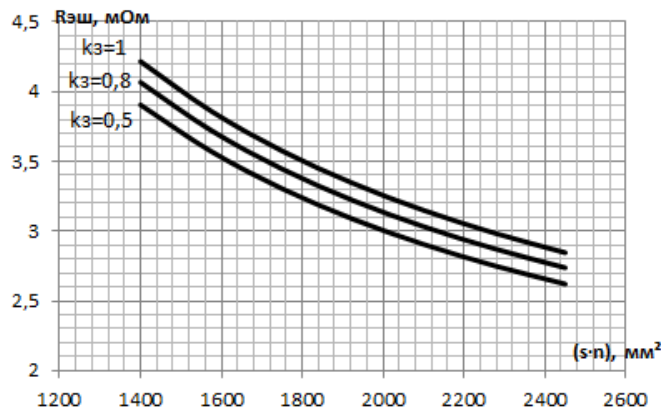


Рис. 5. Номограммы эквивалентного сопротивления шинпровода $I_n = 250 \text{ А}, l_{\text{ср}} = 50 \text{ м}, \theta_0 = 35 \text{ °С}$

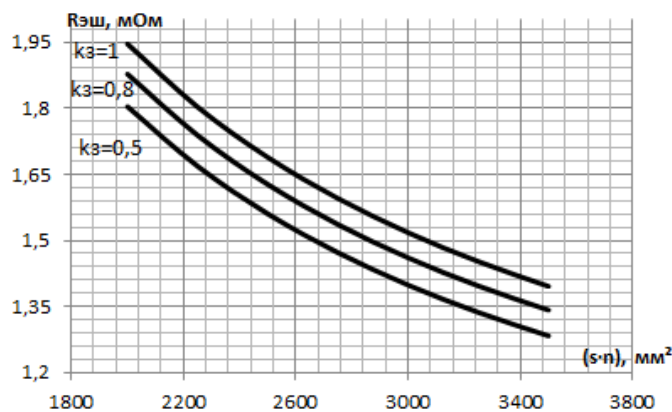


Рис. 6. Номограммы эквивалентного сопротивления шинпровода $I_n = 400 \text{ А}, l_{\text{ср}} = 50 \text{ м}, \theta_0 = 35 \text{ °С}$

Заключение

Таким образом, при определении и прогнозировании потерь электроэнергии целесообразно составлять специализированные модели, параметры которых следует определять в функции обобщенных параметров сети, используя регрессионный анализ. Вероятностно-статистические модели для нахождения эквивалентного сопротивления R_3 и потерь мощности цеховых сетей ΔP позволяют учесть такие параметры как длина, количество, сечение линий сети, температура окружающей среды, число коммутационных аппаратов на линии и количество электроприемников, присоединенных к шинопроводу. Данные модели позволяют достаточно просто учитывать динамику измене-

ния электрических сетей, поэтому пригодны для многократного использования.

Литература

1. Ивоботенко, Б.А. *Планирование эксперимента в электромеханике* / Б.А. Ивоботенко. – М.: Энергия, 1975. – 184 с.
2. Грачева, Е.И. *Потери электроэнергии в низковольтных сетях* / Е.И. Грачева. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. – 87 с.
3. Маркушевич, Н.С. *Регулирование напряжения и экономия электроэнергии* / Н.С. Маркушевич. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 104 с.
4. Иванова, В.М. *Математическая статистика* / В.М. Иванова, В.Н. Калинина, Л.А. Нешумова. – М.: Высш. шк., 1981. – 371 с.

Грачева Елена Ивановна, кандидат технических наук, доцент, кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, тел.: 8-(917) 268-88-91, gracheva.64@mail.ru

Анисимова Наталия Викторовна, магистрант 2-го года обучения, кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, тел.: 8-(987) 268-28-07, natalianis.vik@mail.ru

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2013, vol. 13, no. 2, pp. 19–24**

FORECASTING OF ELECTRIC POWER LOSSES IN LOW VOLTAGE NETWORK BASED ON REGRESSION ANALYSIS

E.I. Gracheva, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation, gracheva.64@mail.ru

N.V. Anisimova, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation, natalianis.vik@mail.ru

Regression analysis is one of the most widespread methods of electric losses evaluation, which allows getting a regression equation relating electric losses to generalized factors affecting them. In this scientific article, regression models have been examined to definition of the equivalent resistance of lines and electric losses in low voltage electric networks. To solve this problem factors have been selected that affect the value of the output quantity and limits of their variation have also been identified. These factors include: line length, the network load and the cross-section of lines, the number of lines and the ambient temperature. Regression models were derived by virtue of the generalized parameters according to expressions given in the article to determine the equivalent resistance of the power supply circuits. Such models allow for the dynamics of change of the guild electric network. Also nomograms were constructed for lines with different cross-section, the average length and loading, that allow to determine the equivalent resistance of any configuration guild network without any time-consuming calculations.

Keywords: electric power losses, regression analysis, the equivalent resistance of the lines.

References

1. Ivobotenko B.A. *Planirovanie Eksperimenta v Elektromekhanike* [Experimental Planning in Electromechanics], Moscow, 1975. 184p.
2. Gracheva Ye.I. *Poteri Elektroenergii v Nizkovoltnykh Setyakh* [Loss of Energy in Low Voltage Network], Kazan, 2004, 87p.
3. Markushevich N.S. *Regulirovaniye Napryazheniya i Ekonomiya Elektroenergii* [Voltage Control and Electric Energy Conservation], Moscow, 1984, 104p.
4. Ivanova V.M. *Matematicheskaya Statistika* [Mathematical Statistics], Moscow, 1981, 371 p.

Поступила в редакцию 10.03.2013 г.