



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЦЕХОВЫХ СЕТЯХ

Е.И. Грачева¹, Р.Р. Садыков², Р.Р. Хуснутдинов¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Приволжские электрические сети, Филиал ОАО «Сетевая компания», Россия

khrr@yandex.ru

Резюме: В статье проведен анализ некоторых методов расчёта потерь активной мощности в низковольтных промышленных сетях с учетом основных влияющих параметров. Определено эквивалентное сопротивление и потери активной мощности в радиальных и магистральных схемах. Вычислены погрешности эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности схем относительно эталонных значений. Разработаны графические зависимости эквивалентного сопротивления радиальных и магистральных схем цеховых сетей с учетом коммутационных аппаратов на линиях в функциях таких параметров, как суммарное сечение линий, средние значения длины, сечения линий и температуры окружающей среды, а также при изменении коэффициента загрузки линий. Предлагаемые номограммы обладают высокой точностью и могут применяться в практических расчетах.

Ключевые слова: цеховые сети, потери активной мощности, эквивалентное сопротивление, коэффициент загрузки, коммутационные аппараты, температура окружающей среды.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-13-24

Для цитирования: Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р. Сравнительный анализ методов и погрешностей расчета потерь активной мощности в низковольтных цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 13-24. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-13-24.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF CALCULATION AND ERRORS OF ACTIVE POWER LOSSES IN LOW VOLTAGE COMMERCIAL NETWORKS

E.I.Gracheva¹, R.R.Sadykov², R.R.Khusnutdinov¹

¹Kazan state power university, Kazan, Russia

²Privolzhsky electrical networks, Branch of JSC "Grid Company".

khrr@yandex.ru

Abstract: The article analyzes some methods for calculating the loss of active power in low-voltage industrial networks, taking into account the main influencing parameters. Equivalent resistance and losses of active power in radial and trunk circuits are determined. The errors of the equivalent resistance and the loss of the active power of the circuits relative to the reference values are calculated. Graphic dependencies of the equivalent resistance of the radial and trunk circuits of the industrial networks are taken into account, taking into account switching devices

on the lines in the functions of such parameters as the total cross-section of lines, average lengths, cross-sections of lines and ambient temperature, and with a change in the line load factor. The proposed nomograms are highly accurate and can be used in practical calculations.

Keywords: industrial network, loss of active power, equivalent resistance, load factor, switching devices, ambient temperature.

For citation: E.I. Gracheva, R.R. Sadykov, R.R. Khusnutdinov Comparative analysis of methods of calculation and errors of active power losses in low voltage commercial networks // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 13-24. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-13-24.

Введение

Отсутствие достоверной информации о параметрах элементов цеховых сетей низкого напряжения и неучет факторов, определяющих эти параметры, ведет к погрешностям до 70 % при вычислении потерь электроэнергии (ЭЭ) [1–4]. Как показали исследования, при расчётном способе определения потерь ЭЭ в линиях цеховых сетей необходимо иметь информацию о следующих величинах [5–9]:

- точном значении длин линий цеховых сетей;
- перегреве проводников, обусловленном токовой нагрузкой провода и температурой окружающей среды;
- сопротивлениях контактных соединений коммутационных аппаратов и их числе, так как линии цеховых сетей при небольшой протяженности имеют большое количество последовательных узлов с коммутационной аппаратурой, и при этом сопротивление аппаратов оказывается соизмеримым с сопротивлением линии;
- данных о графиках нагрузки.

Как известно, цеховые сети напряжением до 1000 В внутризаводских систем электроснабжения, из-за их большой протяженности и разветвленности, характеризуются довольно высоким потерями ЭЭ. Вследствие этого повышение точности расчётов потерь в сетях низкого напряжения является, на сегодняшний день, весьма актуальной задачей [10–13]. Для исследования возможных погрешностей вычисления потерь определим эквивалентные сопротивления отдельно для радиальной и магистральной схем цеховой электрической сети тремя следующими способами:

- поэлементного расчета;
- по расчётному выражению;
- по номограммам.

Исследование методов и погрешностей расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности в цеховых сетях

Наиболее точный способ определения потерь ЭЭ – расчетный по отдельным элементам, который широко применяется на практике.

Потери активной мощности в линиях трехфазного тока при симметричной нагрузке определяются по выражению

$$P = 3I^2R, \quad (1)$$

где I – расчётный ток в линии; R – активное сопротивление линии. Тогда потери электроэнергии

$$\Delta W = \Delta P \cdot T, \quad (2)$$

где T – расчетный период времени, за который рассчитываются потери.

Сопротивление участка сети зависит от марки, сечения и длины провода, температуры его токопроводящей жилы, являющейся функцией температуры окружающей среды и нагрузки провода.

В качестве исходных данных для определения эквивалентного сопротивления линий радиальной сети примем следующие значения: средняя длина линий l_{cp} равна 20 м; количество линий $n = 3$. При этом расчетный ток в линиях равен 55; 70; 85 А для линий сечением от 16 до 35 мм² соответственно. Коэффициент загрузки линий равен 0,7. Температура окружающей среды +20 °С. Схема радиальной сети показана на рис. 1.

При расчете сопротивления R участка сети должно быть учтено влияние токопроводящих жил и сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов [1]:

$$R = \left\{ r_{20} \cdot l \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_{ж} - 20)] + \sum r_k \right\} \cdot \frac{1}{n}, \quad (3)$$

$$\theta_{ж} = k_3^2 (80 - \theta_0) + \theta_0, \quad (4)$$

где r_{20} – сопротивление 1 м жилы провода при температуре 20 °С; α – температурный коэффициент сопротивления, равный для меди и алюминия приблизительно 0,004 °С⁻¹; $\theta_{ж}$ – температура жилы кабеля или провода; θ_0 – допустимая температура нагрева жилы кабеля; l – длина линии; $\sum r_k$ – сумма сопротивлений автоматических выключателей, установленных на линии; n – количество отходящих линий.

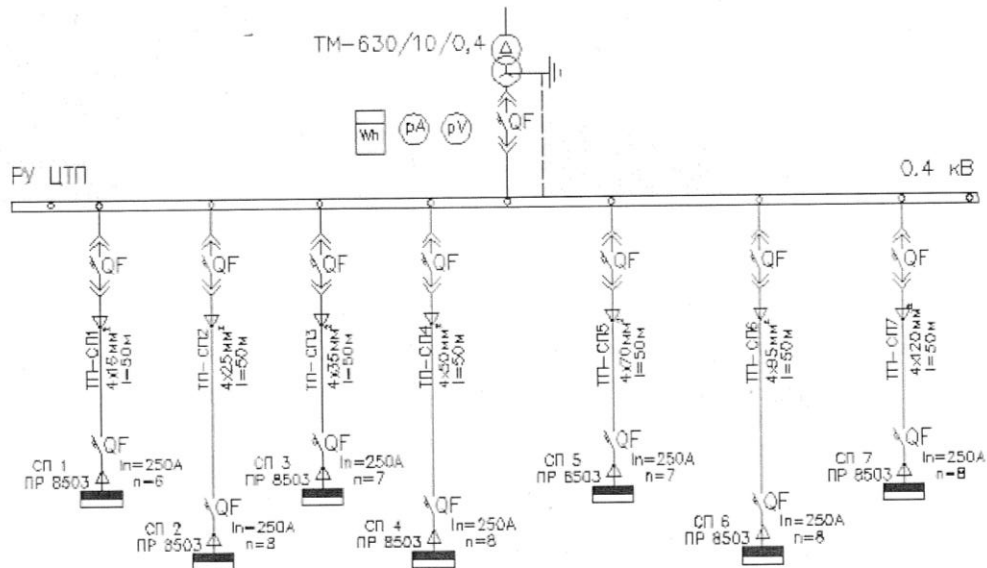


Рис. 1. Радиальная схема цеховой электрической сети

Аналитические зависимости сопротивлений коммутационных аппаратов от их номинальных токов, полученные в результате экспериментальных исследований, представлены в табл. 1. За основу принята гиперболическая зависимость $R = A/I_n$, где I_n – номинальный ток коммутационного аппарата. На основании метода наименьших квадратов определены коэффициенты A для различных типов аппаратов. Погрешность вычисления составила при этом $\pm 5\%$.

Результаты исследований погрешностей расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности в радиальных сетях

Приведем пример расчета для линии ТП – СП1:

По исходным данным для данной линии $I_{p1} = 55A$, $I_D = 60A$, что соответствует сечению 16 мм². Сопротивление автоматических выключателей r_k , установленных на

линии, вычисляем, используя зависимости табл. 1.

$$\text{Следовательно } r_k = \frac{307}{I_n} = \frac{307}{60} = 5,12 \text{ Ом} .$$

Таблица 1

Аналитические зависимости сопротивлений низковольтных коммутационных аппаратов от номинального тока

Аппараты	Номинальный ток I_n , А	Аналитическая зависимость сопротивления от номинального тока
Автоматические выключатели и контакторы	< 70	$R = 825/I_n$
	≥ 70	$R = 760/I_n$
Магнитные пускатели	< 60	$R = 349/I_n$
	≥ 60	$R = 307/I_n$
Предохранители	< 200	$R = 210/I_n$
	≥ 200	$R = 125/I_n$
Рубильники и пакетные выключатели	Любое значение	$R = 68/I_n$

Температура жилы кабеля или провода вычисляется по формуле

$$\theta_{ж} = k_3^2 (80 - \theta_0) + \theta_0 = 0,7^2 \cdot (80 - 20) + 20 = 49,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$R = \left\{ r_{20} \cdot 1 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_{ж} - 20)] + \sum r_k \right\} \cdot \frac{1}{n} =$$

$$1,956 \cdot 20 \cdot [1 + 0,004 \cdot (49,4 - 20)] + 5,12 = 48,84 \text{ мОм}.$$

Далее по выражению (1) определим потери активной мощности в рассматриваемой линии, где R – эквивалентное сопротивление одной линии:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 55^2 \cdot 48,84 = 443,20 \text{ Вт} .$$

Аналогично произведем поэлементный расчет потерь мощности для линий сечением 25 и 35 мм². При этом потери для каждой рассматриваемой линии определим отдельно, и в результате их суммирования по формуле (1) определим общее эквивалентное сопротивление радиальной сети, где I – эквивалентный расчетный ток схемы электрической цепи. Полученные результаты расчетов даны в табл. 2.

Таблица 2

Определение эквивалентного сопротивления радиальной цеховой сети поэлементным расчетом

Поэлементно для трех линий											
Сечение S , мм ²	l_{cp} , м	n , шт.	r_{320} , мОм/м	k_3^2 ,	θ_0 , °C	$\theta_{ж}$, °C	I_p , А	I_d , А	R , мОм	R_n , мОм	ΔP , Вт
16	20	1	1,956	0,49	20	49,4	55	60	5,12	48,84	443,20
25	20	1	1,25	0,49	20	49,4	70	75	4,09	32,03	4470,89
35	20	1	0,894	0,49	20	49,4	85	80	3,41	23,39	507,06

Суммарный ток для трех линий $I_p = 55 + 70 + 85 = 210 \text{ А} .$

Суммарное значение потерь активной мощности в линиях

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 55^2 \cdot 48,84 = 443,20 \text{ Вт} .$$

В итоге получаем эквивалентное сопротивление радиальной цеховой электрической сети $R_3 = \frac{\Delta P}{3 \cdot I_p^2} = 10,74 \text{ мОм}$.

Для приведенных выше исходных данных определим эквивалентное сопротивление сети по формуле (3). Для этого определим среднее значение сечений для данных линий:

$$S_{\text{ср}} = \frac{16 + 25 + 35}{3} = 25 \text{ мм}^2.$$

Результаты расчета эквивалентного сопротивления и потерь мощности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Определение эквивалентного сопротивления радиальной цеховой сети по расчетному выражению

По формуле для трех линий											
Сечение S , мм ²	$l_{\text{ср}}$, м	n , шт.	r_{320} , мОм/м	k_3^2	θ_0 , °C	$\theta_{\text{ж}}$, °C	I_p , А	I_d , А	R , мОм	R_n , мОм	ΔP , Вт
25	20	3	1,25	0,49	20	49,4	70	75	4,09	13,41	1773,7

В результате получаем эквивалентное сопротивление радиальной цеховой электрической сети $R_3 = 13,41 \text{ мОм}$, потери активной мощности в линии $\Delta P = 1773,7 \text{ Вт}$.

Также эквивалентное сопротивление линий можно определить, используя номограммы. Номограммы для определения эквивалентного сопротивления – это графическое представление функции R_3 от нескольких переменных ($l_{\text{ср}}$, n , s , k^2 , θ_0), позволяющее с помощью простых геометрических операций исследовать функциональную зависимость без трудоемких вычислений. Приведенные ниже номограммы (рис. 2–5) построены для линий с различным сечением, средним значением длины и загрузки.

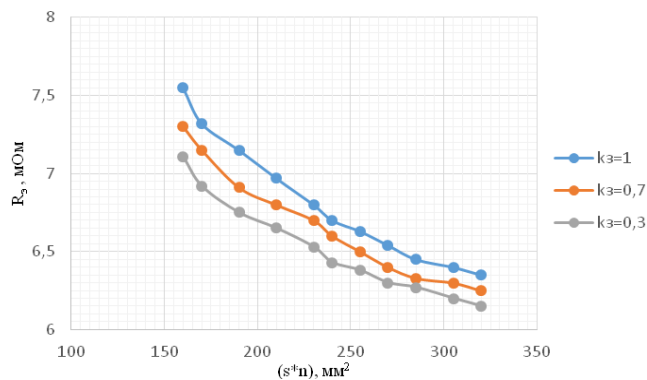


Рис. 2. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 16 мм², средней длины 10 м и температуры окружающей среды 20 °C

Эквивалентное сопротивление, определенное по данным номограммам для трех линий со средним сечением 25 мм², принимает значение $R_3 = 13,4 \text{ мОм}$.

Потери активной мощности для данного эквивалентного сопротивления

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 210^2 \cdot 14,4 = 1772,82 \text{ Вт}.$$

Проведем сравнительный анализ приведенных выше расчетов. Примем поэлементный расчет за эталонный метод и определим относительную погрешность для

каждого метода. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления и потерь мощности цеховой сети приведены в табл. 4.

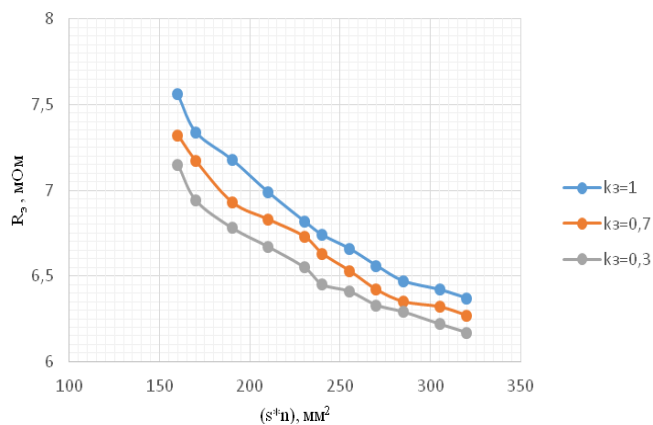


Рис. 3. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 16 мм², средней длины 20 м и температуры окружающей среды 20 °С

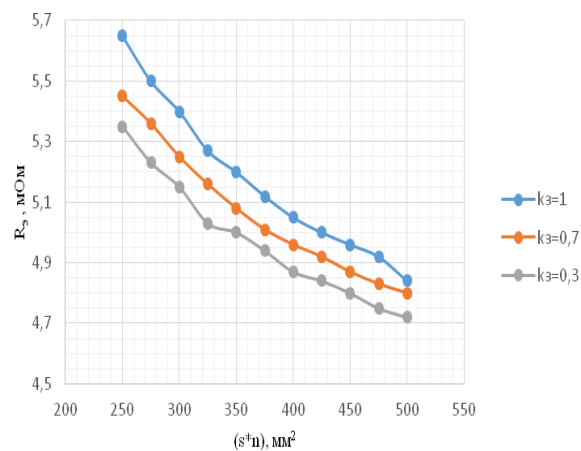


Рис. 4. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 25 мм², средней длины 10 м и температуры окружающей среды 20 °С

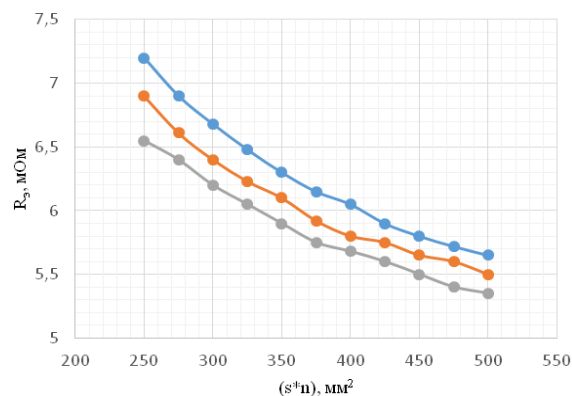


Рис. 5. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 25 мм², средней длины 20 м и температуры окружающей среды 20 °С

Погрешности результатов расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности радиальной цеховой сети

Метод расчета	Эквивалентное сопротивление R_{Σ} , мОм	Потери активной мощности ΔP , Вт	Погрешность расчета, %
Поэлементный (точный)	10,74	1421,15	0
По формуле для среднего значения	13,41	1773,70	+20
По номограммам	13,4	1772,82	+19,9

Таким образом, определение эквивалентного сопротивления по формуле и по номограммам имеют примерно одинаковую погрешность по отношению к поэлементному методу расчета, который является эталонным. Данные погрешности связаны с усреднением расчетных величин.

Исследование погрешностей расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности в магистральных сетях

Линии магистральных сетей (рис. 6), как правило, представляют собой шинопроводы с распределенной электрической нагрузкой. В качестве параметров, определяющих потери ЭЭ и эквивалентное сопротивление, выступают такие величины, как длина шинопровода, количество приемников, подключенных к шинопроводу и т.д.

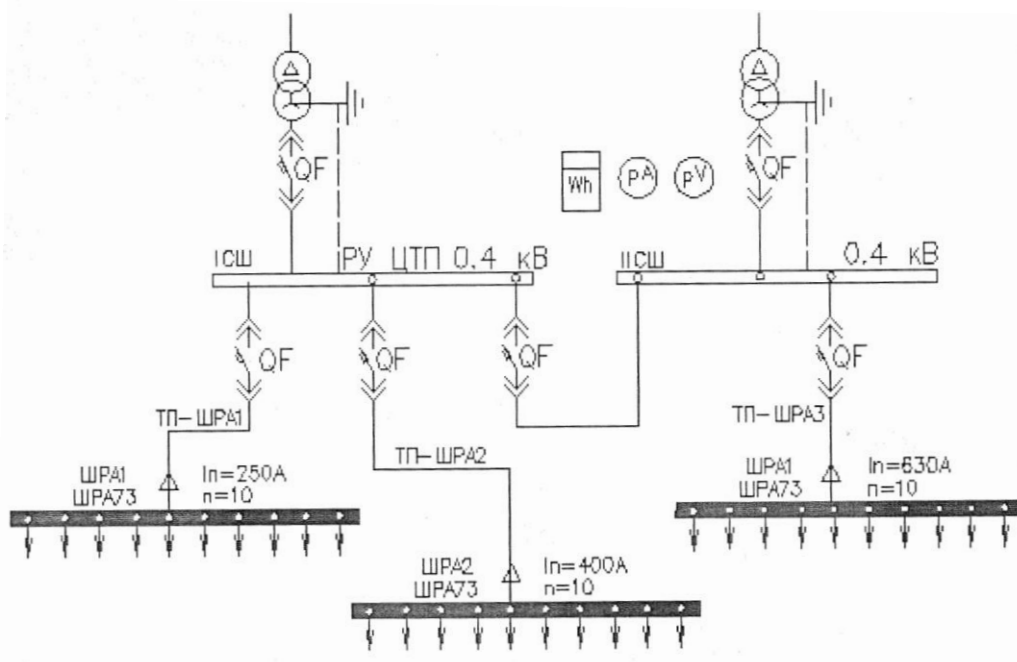


Рис.6. Магистральная схема цеховой электрической сети

Для магистральной схемы электроснабжения приведем аналогичный расчет эквивалентного сопротивления тремя вышеизложенными способами.

В качестве исходных данных примем следующие значения: средняя длина шинопровода 20 м; количество электроприемников, присоединенных к шинопроводу, $n=10$. Рассмотрим распределительный шинопровод типа ШРА-73 на номинальный ток 250 А.

Расчетный ток равен 180 А. Коэффициент загрузки шинпровода 0,8. Температура окружающей среды +35 °С.

Потери “активной мощности в магистральных сетях определяются по выражению

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3 \cdot I_{\text{э}}^2 \cdot R_{\text{эш}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{эш}}$ – эквивалентное сопротивление шинпровода, вычисляемое из уравнения

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{\text{э}20} \cdot l \cdot \frac{1}{6 \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{n}\right)} + \frac{r_{\text{п}}}{n} \right] \cdot \left[1 + \alpha(\theta - \theta_0) \right] + \frac{r_{\text{к}}}{n}, \quad (6)$$

где $r_{\text{э}20}$ – сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С, мОм; l – длина шинпровода, м; n – количество приемников, присоединенных к шинпроводу; $r_{\text{п}}$ – сопротивление провода ответвления от шинпровода, мОм; $I_{\text{э}}$ – эффективный ток, А; $r_{\text{к}}$ – сопротивление коммутационного аппарата ответвления, мОм; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления, 1/°С; θ – температура шинпровода, °С; θ_0 – температура окружающей среды, °С.

Приведем пример расчета для шинпровода ШРА 1.

Исходные данные для данной линии: $I_{\text{рш}} = 180$ А, $I_{\text{нш}} = 250$ А.

Удельное сопротивление шинпровода $r_{\text{э}20}$ представляет собой сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С и определяется как $r_{\text{э}20} = 52/I_{\text{н}}$.

Таким образом, $r_{\text{э}20} = 52/I_{\text{н}} = 52/250 = 0,2$ мОм/м.

Размер шины на фазу для шинпровода марки ШРА-73 на номинальный ток 250 А равен 35x5 мм².

При известных величинах номинального тока шинпровода, коэффициента загрузки шинпровода, известном количестве присоединенных приемников можно определить ток, потребляемый одним приемником, по выражению

$$I_{\text{л}} = \frac{I_{\text{нш}}}{n} = \frac{250}{10} = 25 \text{ А.}$$

В соответствии с током приемника определяется сопротивление коммутационного аппарата ответвления по табл. 1.

$$\text{Следовательно, } r_{\text{к}} = \frac{307}{I_{\text{л}}} = \frac{349}{32} = 10,91 \text{ мОм.}$$

Далее определяем соответствующий допустимый длительный ток:

$$I_{\text{д}} = 32 \text{ А, что соответствует сечению } 4 \text{ мм}^2.$$

Эквивалентное удельное сопротивление провода ответвления от шинпровода сечением 4 мм² равно $r_{\text{э}20} = 7,81$ мОм/м.

Сопротивление провода ответвления от шинпровода к приемнику (длина ответвительного провода принимается равной, в среднем, 2 м):

$$r_{\text{п}} = 2 \cdot 7,81 = 15,62 \text{ мОм/м.}$$

Определим эквивалентное сопротивление шинпровода по формуле (6):

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{\text{э}20} \cdot l \cdot \frac{1}{6 \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{n}\right)} + \frac{r_{\text{п}}}{n} \right] \cdot \left[1 + \alpha(\theta - \theta_0) \right] + \frac{r_{\text{к}}}{n} =$$

$$= \left[0,2 \cdot 30 \cdot \frac{1}{6 \cdot \left(1 + \frac{1}{10}\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{10}\right)} + \frac{15,62}{10} \right] \cdot \left[1 + 0,004(63,8 - 35) \right] + \frac{10,91}{10} = 3,32 \text{ мОм.}$$

Далее по выражению (5) определим потери активной мощности:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3 \cdot I_3^2 \cdot R_{\text{эш}} = 3 \cdot 180^2 \cdot 3,32 \cdot 10^{-3} = 322,25 \text{ Вт}$$

Полученные результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Определение эквивалентного сопротивления магистральной цеховой сети

По формуле														
$I_{\text{эш}}$, А	$I_{\text{нш}}$, А	Сеч. S, мм ²	r_{20} мОм/м	k_3^2	θ_0 °С	$\theta_{\text{ж}}$ °С	$l_{\text{ср}}$ м	n	$I_{\text{н}}$, А	I_3 , А	r_3 мОм	$r_{\text{к}}$ мОм	$R_{\text{эш}}$ мОм	ΔP Вт
180	250	35x5	0,2	0,64	35	63,8	20	10	25	32	7,81	10,91	3,32	322,25

Таким образом, для нашего случая эквивалентное сопротивление шинпровода $R_{\text{эш}} = 3,32$ мОм. Потери активной мощности $\Delta P = 322,25$ Вт.

Эквивалентное сопротивление и потери активной мощности магистральной схемы можно определить, используя номограммы. Для определения эквивалентного сопротивления по номограммам по оси абсцисс требуется отложить значение суммарной величины сечения шинпровода ($s \cdot n$), и по кривой соответствующего коэффициента загрузки линии по оси ординат найти искомое значение.

Номограммы для определения эквивалентного сопротивления магистральных сетей показаны на рис.7–8.

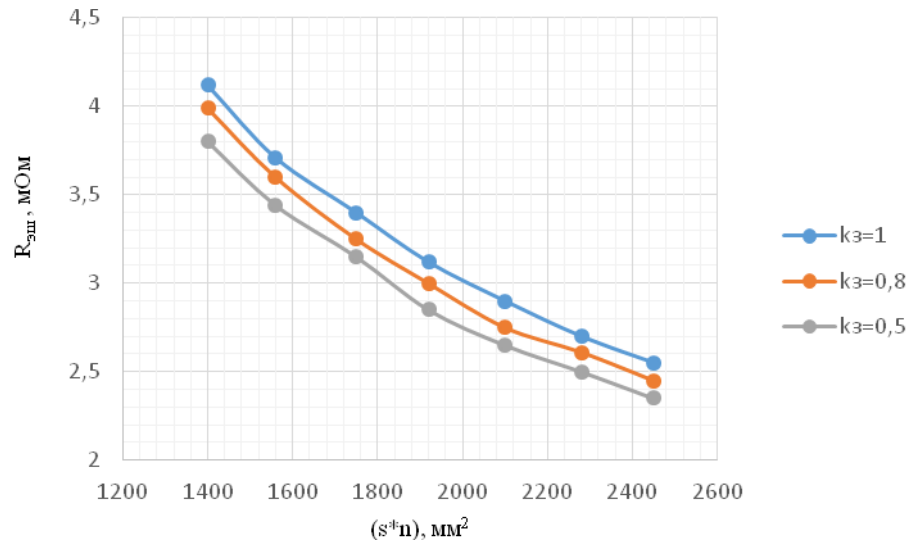


Рис. 7. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода ШРА-73 на номинальный ток 250А, со средней длиной 20 м и температурой окружающей среды 35 °С

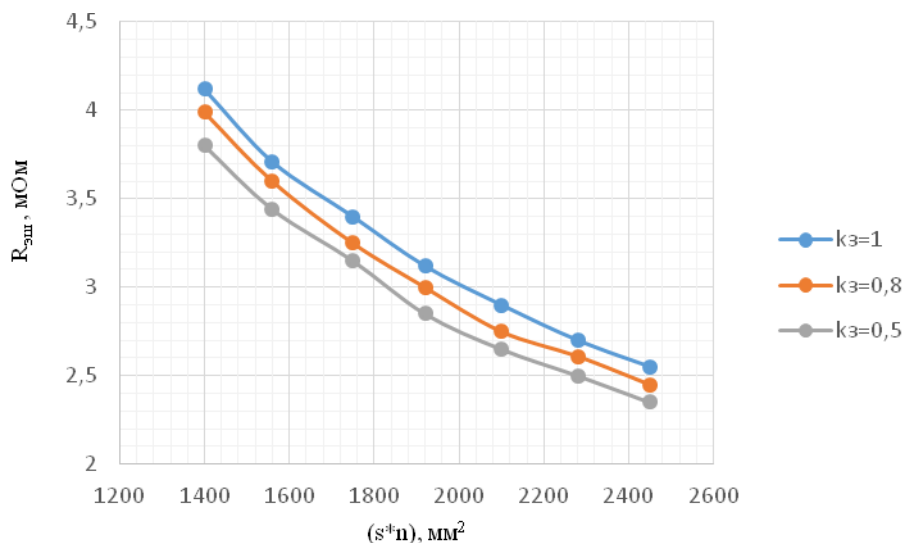


Рис. 8. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинпровода ШРА-73 на номинальный ток 250А, со средней длиной 30 м и температурой окружающей среды 35 °С

Эквивалентное сопротивление, определенное по данным номограмм для приведенных исходных данных магистральных цеховых сетей, принимает значение $R_{эМ} = 3,27$ МОм.

Потери активной мощности для данного эквивалентного сопротивления:

$$\Delta P_{ш} = 3 \cdot I_3^2 \cdot R_{эМ} = 3 \cdot 180^2 \cdot 3,27 \cdot 10^{-3} = 317,84 \text{ Вт.}$$

Проведем сравнительный анализ приведенных выше расчетов для магистральной сети. Примем расчет по формуле (5) за эталонный метод и определим относительную погрешность. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления и потерь мощности цеховой сети приведены в табл. 6.

Таблица 6

Погрешности результатов расчета эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности магистральной цеховой сети

Метод расчета	Эквивалентное сопротивление $R_э$, МОм	Потери активной мощности ΔP , Вт	Погрешность расчета, %
По формуле	3,32	322,25	0
По номограммам	3,27	317,84	-1,5

В случае применения смешанных схем цеховых сетей требуется выделить радиальные и магистральные участки, определить эквивалентные сопротивления для радиального ($R_{эР}$) и магистрального ($R_{эМ}$) участков и рассчитать эквивалентное сопротивление смешанной схемы:

$$R_{э(см)} = \frac{R_{эР} \cdot R_{эМ}}{R_{эР} + R_{эМ}}. \tag{7}$$

Заключение

Таким образом, результаты расчетов по представленному алгоритму подтвердили приемлемость применения номограмм для определения эквивалентного сопротивления

цеховых радиальных и магистральных сетей в функции таких параметров, как средняя длина, нагрузка и сечение линий сети, число коммутационных аппаратов на линии и температура окружающей среды.

Определение эквивалентного сопротивления цеховых сетей по разработанному алгоритму позволяет без снижения точности расчетов и трудоёмких вычислений оценивать величину потерь активной мощности и ЭЭ в низковольтных сетях любой топологии. При этом возможно, при изменении конфигурации схемы, корректировать вид зависимостей разработанных номограмм. Поэтому полученные результаты применимы для многократного практического применения с учетом изменения динамики схемы низковольтной цеховой промышленной сети.

Литература

1. Белашов В.Ю., Иванов В.О., Грачева Е.И. Составление и анализ балансов потребления электрической энергии промышленными предприятиями: учеб. пособие. Казань: КГЭУ, 2003. 148 с.
2. Грачева Е.И., Иванов В.О., Денисова Н.В. Определение потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях промышленных предприятий и пути повышения надежности их работы: учебное пособие. Казань: КГЭУ, 2008. 271 с.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В. Уточнение величины эквивалентного сопротивления цеховых сетей // Надежность и безопасность энергетики. 2015. №3. С. 34–36.
4. Грачева Е.И., Сафин А.Р., Шагидуллин А.В., Хаерова А.Н. 6. Моделирование законов изменения функциональных параметров низковольтных аппаратов // Надежность и безопасность энергетики. 2014. №3. С. 66–69.
5. Федотов А.И., Грачева Е.И., Наумов О.В. Исследование показателей безотказности низковольтных коммутационных аппаратов электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №9-10. С. 73–80.
6. Садыков Р.Р. Влияние режимных и схемных параметров электрооборудования на эквивалентное сопротивление цеховых сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. №7-8. С. 92–97.
7. Волков Н.Г. Надежность электроснабжения: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2003. 140 с.
8. Воропай Н.И. Надежность систем электроснабжения: учебное пособие. Новосибирск: Наука, 2015. 206 с.
9. Киреева Э.А., Орлов В.В., Старкова Л.Е. Электроснабжение цехов промышленных предприятий: учебное пособие. М.: Энергопрогресс, 2003. 119 с.
10. Конохова Е.А., Киреева Э.А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий: производственно-практическое издание. М.: Энергопрогресс, 2001. 92 с.
11. Шлейников В.Б. Электроснабжение цеха промышленного предприятия: учебное пособие. Оренбург: ЭБС АСВ, 2012. 115 с.
12. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters // International Journal of Applied Research. 2015. №24.
13. Богданов Дж., Козин Ф.М. Вероятностные модели накопления повреждений. М.: Мир, 1989.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: grachieva.i@bk.ru.

Садыков Руслан Рустемович – начальник отдела Приволжских электрических сетей филиала ОАО «Сетевая Коспания». E-mail: ru059@mail.ru.

Хуснутдинов Рустем Рауфович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: khrr@yandex.ru.

References

1. Belashov V.Yu., Ivanov V.O., Gracheva E.I. Compilation and analysis of the balances of electric energy industry: Textbooks. Kazan: KSPEU, 2003. 148 p.
2. Gracheva E.I., Ivanov V.O., Denisova N.V. Determination of power losses in low-voltage workshop networks of industrial enterprises and ways to improve the reliability of their work: textbooks. Kazan: KSPEU, 2008. 271 p.
3. Gracheva E.I., Naumov O.V. Specification of the value of the equivalent resistance of shop networks // Safety and Reliability of Power Industry. 2015. №3. Pp. 34–36.
4. Gracheva E.I., Safin A.R., Shagidullin A.V., Haerova A.N. Modeling of the laws of changing the functional parameters of low-voltage devices // Safety and Reliability of Power Industry. 2014. №3. Pp. 66–69.
5. Fedotov A.I., Gracheva E.I., Naumov O.V. Research of indicators of reliability of low-voltage switching devices of electric networks // Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problems. 2013. №9-10. Pp. 73–80.
6. Sadykov R.R. Influence of regime and circuit parameters of electrical equipment on the equivalent resistance of shop networks // Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problems. 2015. №7-8. Pp. 92–97.
7. Volkov N.G. Reliability of power supply: Textbooks. Tomsk: TPU. 2003. 140 p.
8. Voropai N.I. Reliability of power supply: Textbooks. Novosibirsk: Nauka, 2015. 206 p.
9. Kireeva E.A., Orlov V.V., Starkova L.E. Electrical supply of shops of industrial enterprises: Textbook. M.: Energoprogress, 2003. 119 p.
10. Konyhova E.A., Kireeva E.A. Reliability of power supply for industrial enterprises: production and practical publication. M.: Energoprogress, 2001. 92 p.
11. Shlennikov V.B. Electrical supply of shops of industrial enterprises: Textbook. Orenburg: EBS ASV, 2012. 115 p.
12. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters // International Journal of Applied Research. 2015. №24.
13. Bogdanov J., Kozin F.M. Probabilistic models of damage accumulation. M.: Mir, 1989.

Authors of the publication

Elena I Gracheva – Doc. Sci. (Techn.), Prof, department «Power supply of industrial enterprises » (EPP) Kazan state power engineering university (KSPEU).

Ruslan R Sadykov – Head of Department of Privolzhsky electrical networks, Branch of JSC "Grid Company".

Rustem R Khusnutdinov – PhD (physical&mathematical) Sci., Assoc. Prof., department «Power supply of industrial enterprises » (EPP) Kazan state power engineering university (KSPEU).

Поступила в редакцию

20 апреля 2018 г.