УДК 621.311

АНАЛИЗ И СПОСОБЫ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЦЕХОВЫХ СЕТЯХ

Е.И. Грачева[1], Р.Э. Абдуллазянов[1,2], А.Н. Алимова[1]

[1]Казанский государственный энергетический университет, г.Казань, Россия
[2]ГУП РТ «Электрические сети», г.Казань, Россия
grachieva.i@bk.ru

Резюме: *В статье рассматривается сравнение алгоритмов некоторых наиболее распространенных методов расчета потерь электроэнергии в низковольтных цеховых сетях с учетом основных параметров электрооборудования. При этом учитываются основные факторы, определяющие уровень потерь электроэнергии: нагрев проводников, сопротивление контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов, установленных на линиях цеховых сетей, так как линии сети при своей малой протяженности имеют значительное число коммутационных аппаратов и, при этом, сопротивление коммутационных аппаратов оказывается соизмеримым с сопротивлением линии. Исследуется величина эквивалентного сопротивления и потерь активной мощности в радиальных и магистральных схемах цеховых сетей с определением погрешностей вычислений относительно эталонных значений. Построены номограммы для определения эквивалентного сопротивления цеховых сетей с различными параметрами оборудования, обладающие достаточной точностью и пригодные для практического применения.*

Ключевые слова: *активная мощность, электроэнергия, потери, электрические сети, системы электроснабжения, коммутационные аппараты, эквивалентное сопротивление.*

RELIABILITY AND COMPONENT OF LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION DEVICES INSIDE ELECTRICAL SUPPLY

Elena I. Gracheva[1], Rustem E. Abdullazyanov[1,2], Alsu N. Alimova[1]

[1]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
[2]Electrical grid, Kazan, Russia
grachieva.i@bk.ru

Abstract: *In the article comparison of algorithms of several methods of calculation of losses of the electric power in low-voltage shop networks considering key parameters of electric equipment is considered. At the same time the major factors defining the electric power wastage rate are considered: heating of conductors, resistance of contact connections of the low-voltage switching devices installed on lines of shop networks as network lines at the small extent have considerable switching equipment and at the same time resistance of switching devices is commensurable with a line resistance. The size of equivalent resistance and losses of active power in radial and main schemes of shop networks with determination of errors of calculations of rather reference values is investigated. The nomograms for determination of equivalent resistance of shop networks of different parameters of the equipment having sufficient accuracy and suitable for practical application are constructed.*

Keywords: *active power, electric power, losses, electrical networks, systems of power supply, switching devices, the equivalent resistance.*

Введение

На настоящее время в России одной из основных задач развития современных промышленных комплексов, наряду с увеличением абсолютных объемов производства электроэнергии (ЭЭ), является усиление контроля за более рациональным ее использованием. Экономия ЭЭ и снижение расхода на ее передачу по электрическим сетям имеет большое значение для энергетики [1, 2].

По своей физической сущности с точки зрения производства, передачи и потребления, потери ЭЭ ничем не отличаются от ЭЭ, полезно отпущенной потребителям. Поэтому оценка потерь в электрических сетях основывается на тех же экономических принципах, что и оценка ЭЭ, полезно отпущенной потребителям.

Потери ЭЭ оказывают существенное влияние на технико-экономические показатели сети, так как стоимость потерь включается в расчетную стоимость (приведенные затраты) и себестоимость (годовые эксплуатационные расходы) передачи ЭЭ. Составляющая стоимости потерь в стоимости передачи ЭЭ имеет большой удельный вес (30–40%). Задача рационального построения и развития электрификации в области электроснабжения заключается в поддержании оптимального соотношения между стоимостью ЭЭ и потерями ее в системах электроснабжения.

Теория вопроса

На данном этапе развития энергетики выдвинуты новые требования к системе учета потерь, определяемые, в основном, сложившимися трудностями по выявлению параметрической и режимной информации о параметрах схем сетей.

Выявление непроизводительных расходов ЭЭ затрудняется тем, что имеют место две группы мероприятий, одна из которых способствует уменьшению объема расходуемой ЭЭ, а другая – ее увеличению. Первую группу представляют собой мероприятия по усилению учета и контроля за электропотреблением, внедрению энергосберегающих технологий и т.д., которые приводят к снижению уровня потребления ЭЭ. Во вторую группу входят мероприятия по механизации и автоматизации производственных процессов, замене в технологическом процессе топлива и пара на ЭЭ и т.д., приводящие к увеличению электропотребления. В этих условиях задача отыскания резервов экономии на основе анализа расхода ЭЭ становится особенно важной тем более, что резервы экономии значительны [3,4].

По данным специалистов можно выделить три этапа экономии энергоресурсов, в том числе экономии и ЭЭ. Первые 10% экономии представляют собой прямую экономию в результате борьбы с нерациональным ее расходом. Для ее осуществления почти не требуется специальных затрат или они очень невелики. Следующие 10% экономии даются с помощью технических и организационных мероприятий, требующих определенных затрат, но которые окупаются в самые короткие сроки (2-4 года). Дальнейшая экономия требует уже серьезной технологической перестройки и является значительно более капиталоемкой.

В настоящее время решаются, в основном, задачи первого и второго этапа, и для третьего закладываются энергосберегающие схемные решения и разрабатываемые проекты.

Таким образом, осуществляя энергосберегающую политику в промышленном производстве, можно добиться реального снижения уровня электропотребления до 10%, не производя больших капитальных вложений в данные мероприятия. Для промышленных предприятий и их подразделений, работающих в условиях самофинансирования и самоокупаемости, это снижение энергозатрат особенно важно, так как вопрос об уменьшении объемов потребления ЭЭ и максимальной мощности в часы максимума энергосистемы для них прямо связан с экономическими показателями работы.

В связи с большими затратами финансовых средств на развитие электроэнергетики, вследствие неуклонного роста потребления ЭЭ, все более интенсивным ее внедрением в различные производственные процессы, особое значение имеет рациональное проектирование и эксплуатация цеховых сетей промышленных предприятий.

Методика проведения эксперимента

Решение задачи повышения эффективности, расходуемой ЭЭ на промышленном предприятии, производится с использованием данных о реальном потреблении и о величине потерь ЭЭ в отдельных производственных подразделениях и цехах. Эта информация является первоосновой любого анализа электропотребления и определяет характер мероприятий, проводимых с целью снижения уровня потерь в сетях промышленного предприятия.

Для получения данных о величине потерь ЭЭ разработаны различные способы и методики. Как показывает имеющийся опыт, эти методики, при их применении для расчетов в сложных цеховых электрических сетях, обладают недостаточной точностью и отличаются большой трудоемкостью.

Поэтому возникает задача попытаться выявить основные закономерности влияния параметров элементов системы цехового электроснабжения в процессе ее функционирования на величину потерь ЭЭ и достаточно просто с приемлемой достоверностью результатов оценить величину потерь ЭЭ в низковольтных цеховых сетях [5].

В состав энергосистемы входит несколько тысяч линий электропередач напряжением до 1000 В. На промышленных предприятиях сети низкого напряжения-наиболее разветвленные и протяженные. Это, в основном, четырехпроводные сети при напряжении 660/380 и 380/220 В. Такие сети являются важнейшим звеном в системе электроснабжения предприятий, осуществляя распределение ЭЭ внутри цехов и непосредственное питание большинства электроприемников, преобразующих ЭЭ в другие виды энергии.

Если принять во внимание, что в сетях расход проводникового материала, потребного для передачи одной и той же мощности, быстро растет с понижением номинального напряжения, то становится очевидным большой удельный вес сетей напряжением до 1000 В в потреблении цветных проводниковых металлов в электрических сетях.

Внутренние сети промышленных предприятий представляют собой совокупность распределительных устройств, защитных и пусковых аппаратов и собственно электрических сетей. Основным требованием к внутрицеховым сетям является необходимость обеспечения требуемой степени надежности электроснабжения технологического оборудования [6–9].

В цеховых сетях закладывается огромное количество проводникового материала и электрического аппаратуры, поэтому выбор схемы питания определяет не только качество и особенности работы электрооборудования, но и технико-экономические показатели системы электроснабжения.

Факторы, которые могут оказать влияние на выбор типа линий радиальных или магистральных – участка цеховой сети, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели группы потребителей, питаемых от одного центра питания

Показатель	Ориентировочные критерии наибольшей целесообразности	
	Радиальные линии	Магистральные линии
1. Число потребителей	Менее 10	Более 3
2. Расчетные токи отдельных потребителей	Более 10 А	Менее 10 А
3. Отношение результирующей расчетной нагрузки к сумме расчетных мощностей потребителей	Более 0,7	Менее 0,8
4. Диапазон расчетных мощностей отдельных потребителей	Любой	3:1
5. Отношение $r_ц/\Delta r$ ($r_ц$ – расстояние центра нагрузок от центра питания; Δr- расстояние между крайними потребителями в направлении r)	Менее 1,0	Более 0,5

Отсутствие достоверной информации о параметрах элементов цеховых сетей низкого напряжения и неучет факторов, определяющих эти параметры, ведет к погрешностям до 70% при вычислении потерь ЭЭ. Как показали исследования [10], при расчетном способе определения потерь ЭЭ в линиях цеховых сетей, необходимо иметь информацию о следующих величинах:

– точном значении длин линий цеховых сетей;

– перегреве проводников, обусловленном токовой нагрузкой провода и температурой окружающей среды;

– сопротивлении 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.

Цеховые сети напряжением до 1000 В внутризаводских систем электроснабжения вследствие их большой протяженности и разветвленности характеризуются довольно высокими потерями ЭЭ. Вследствие чего, повышение точности расчетов потерь в сетях низкого напряжения является весьма актуальной задачей на сегодняшний день [11,12].

Определим эквивалентные сопротивления линий отдельно для радиальной и магистральной схем цеховой электрической сети следующими тремя способами:

1) поэлементного расчета;

2) по расчетному выражению;

3) по номограммам.

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

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

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R \qquad (1)$$

где I – расчетный ток в линии, R – активное сопротивление линии.

Тогда потери электроэнергии:

$$\Delta W = \Delta P \cdot T \qquad (2)$$

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

Сопротивление линии 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 $l_{ср}$ равна 20 м. Количество линий n = 3. При этом расчетный ток в линиях равен: 55, 70, 85 А для линий сечением от 16, 25, 35 мм² соответственно. Температура окружающей среды принята +20 °С. Схема радиальной цеховой электрической сети представлена на рис. 1.

При расчете сопротивления R участка сети учитывается сопротивление контактных соединений коммутационных аппаратов [1]:

$$R = \{r_{20} \cdot L \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_ж - 20)] + \sum r_k\} \cdot \frac{1}{n} \quad (3)$$

$$\theta_ж = k_з^2 \left(80 - \theta_0\right) + \theta_0 \quad (4)$$

где r_{20} – сопротивление 1м 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 – температура окружающей среды; L – длина линии; $\sum r_k$ – сумма сопротивлений автоматических выключателей, установленных на линии, n – количество отходящих линий, 80 – допустимая температура нагрева кабеля или провода.

Аналитические зависимости сопротивлений коммутационных аппаратов от их номинальных токов, полученных в результате экспериментальных исследований, представлены в табл. 2. За основу принята гиперболическая зависимость $R = A / I_н$, где $I_н$ – номинальный ток коммутационного аппарата. На основании метода наименьших квадратов определены коэффициенты А для различных типов аппаратов. Погрешность вычисления коэффициентов при этом составила ±5 % [13].

Таблица 2

Аналитические зависимости сопротивлений низковольтных коммутационных аппаратов от номинального тока

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

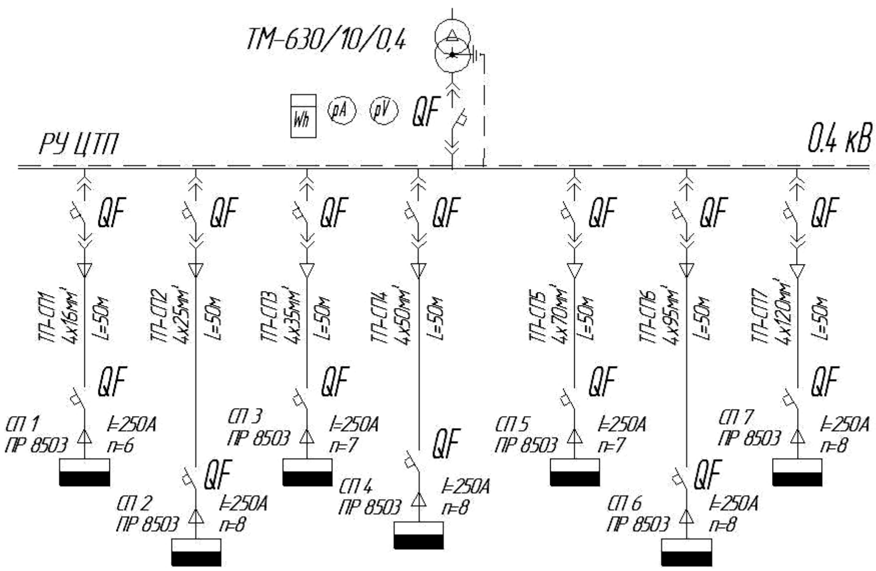

Рис.1. Радиальная схема цеховой электрической сети

Приведем пример расчета для линии от трансформаторной подстанции ТП до силового пункта СП1:

По исходным данным, для данной линии $I_{\text{р1}}$ = 55 А, $I_{\text{д}}$ = 60А. Что соответствует сечению 16 мм².

Сопротивления автоматических выключателей r_{k}, установленных на линиях, вычисляем, используя зависимости табл.2.

Следовательно, $r_k = \dfrac{307}{I_{\text{н}}} = \dfrac{307}{60} = 5{,}12$ мОм.

Температура жилы кабеля или провода вычисляется по формуле:

$$\theta_{\text{ж}} = k_{\text{з}}^2 \cdot (80 - \theta_0) + \theta_0 = 0{,}92^2 \cdot (80 - 20) + 20 = 71\ {}^\circ\text{C}$$

$$R_{\text{л}} = r_{20} \cdot L \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_{\text{ж}} - 20)] + \sum r_k =$$

$$= 1{,}956 \cdot 20 \cdot [1 + 0{,}004 \cdot (71 - 20)] + 5{,}12 = 53{,}9 \text{ мОм.}$$

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

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{л}} = 3 \cdot 55^2 \cdot 53{,}9 \cdot 10^{-3} = 489 \text{ Вт}$$

Аналогично произведем поэлементный расчет потерь мощности для линий сечением 25 и 35 мм². При этом потери для каждой рассматриваемой линии определяем отдельно, и в результате их суммирования ΔP_Σ по формуле (5) определим общее эквивалентное сопротивление $R_{\text{Э}}$ радиальной сети,

$$R_{\text{Э}} = \frac{\Delta P_\Sigma}{3 I_{\text{эр}}^2}, \tag{5}$$

где $I_{\text{эр}}$ – эквивалентный расчетный ток схемы электрической сети. Полученные результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Определение эквивалентного сопротивления радиальной цеховой сети поэлементным расчетом

Поэлементно для трех линий:											
Сечение S, мм²	$l_{ср}$, м	n, шт	$r_{э20}$, мОм/м	$k_з^2$	θ_0, °С	$\theta_ж$, °С	$I_р$, А	$I_д$, А	R, мОм	$R_л$, мОм	ΔP, Вт
16	20	1	1,956	0,84	20	71	55	60	5,12	53,9	489
25	20	1	1,25	0,87	20	72	70	75	4,09	34,2	503
35	20	1	0,894	1,13	20	88	85	80	3,41	26,15	567

Суммарный ток для трех линий:

$$I_P = 55 + 70 + 85 = 210 \text{ А}.$$

Суммарное значение потерь активной мощности в линиях:

$$\Delta P_\Sigma = 489 + 503 + 567 = 1559 \text{ Вт}.$$

В итоге получаем эквивалентное сопротивление радиальной цеховой электрической сети $R_э = \dfrac{\Delta P_\Sigma}{3 \cdot I_{ЭР}^2} = 11,78$ мОм.

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

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

Результаты расчета эквивалентного сопротивления и потерь мощности приведены в табл. 4.

Таблица 4

Определение эквивалентного сопротивления радиальной цеховой сети по расчетному выражению

По формуле для трех линий:										
Сечение S, мм²	$l_{ср}$, м	n, шт	$r_{э20}$, мОм/м	$k_з^2$	θ_0, °С	$\theta_ж$, °С	$I_р$, А	$I_д$, А	R, мОм	$R_л$, мОм
25	20	3	1,25	0,95	20	77	70	75	4,09	11,6

Также эквивалентное сопротивление линий можно определить, используя номограммы.

Номограммы для определения $R_э$ представляют собой графическое представление функции $R_э$ от нескольких переменных ($L_{ср}$, n, s, $k_з^2$, θ_0), позволяющие с помощью простых геометрических операций исследовать функциональную зависимость без трудоемких вычислений (рис. 2).

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

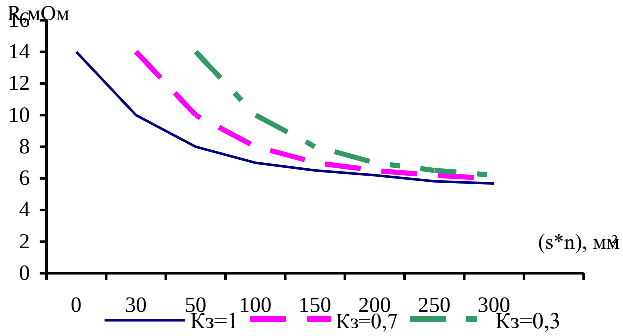

Рис.2. Номограммы эквивалентного сопротивления для линий сечением 16 мм², средней длины линий 20 м и температуры окружающей среды 20 ºС

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.5.

Таблица 5

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

Метод расчета	Эквивалентное сопротивление $R_э$, мОм	Потери активной мощности ΔP, Вт	Погрешность расчета, %
Поэлементный (точный)	11,78	1559	0
По формуле для среднего значения	11,6	1705	+9
По номограммам	13	1911	+19

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.

Линии магистральных сетей (рис.3), 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.

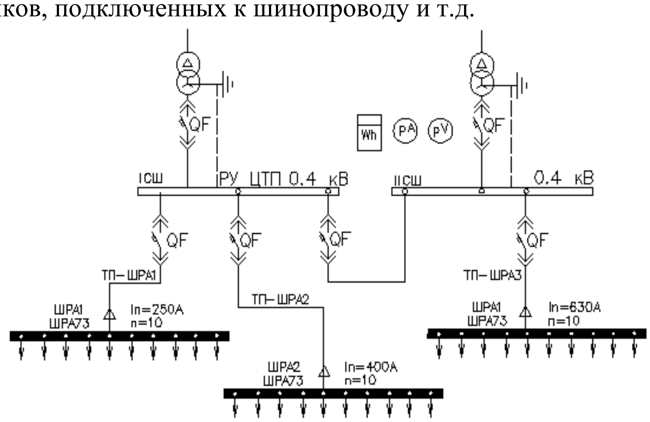

Рис.3. Магистральная схема цеховой электрической сети

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 шинопровода 0,72.

Температура окружающей среды +20 °С.

Потери активной мощности в магистральных сетях определяются по выражению:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3 \cdot I_{\text{Э}}^2 \cdot R_{\text{эш}} \qquad (6)$$

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

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{\text{э}20} \cdot L \cdot \frac{1}{6\left(1+\frac{1}{n}\right)\cdot\left(2+\frac{1}{n}\right)} + \frac{r_n}{n} \right] \cdot \left[1+\alpha\left(\theta-\theta_0\right)\right] + \frac{r_k}{n}, \qquad (7)$$

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

Приведем пример расчета для шинопровода ШРА 1:

Исходные данные для ШРА-1: $I_{\text{рш}1}$ = 180 А, $I_{\text{нш}1}$ = 250 А.

Удельное сопротивление шинопровода r_{20} представляет собой сопротивление 1м ШРА при 20 ºС и определяется как $r_{20} = 52/I_{\text{н}}$, где $I_{\text{н}}$ – номинальный ток ШРА, А.

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

Размер шины на фазу для шинопровода марки ШРА – 73 на номинальный ток 250 А равен 35х5 мм².

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

$$I_n = \frac{k_{\text{з}} \cdot I_{\text{н}}}{n} = \frac{0,72 \cdot 250}{10} = 18 \text{ А.}$$

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

Следовательно, $r_k = \frac{349}{I_{\text{н}}} = \frac{349}{32} = 10,91$ мОм.

Далее определяем соответствующий допустимый длительный ток.

$I_{\text{д}}$ = 32А, что соответствует сечению 4 мм².

Эквивалентное удельное сопротивление провода ответвления от шинопровода сечением 4 мм² равно r_{20} = 7,81 мОм/м.

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

$r_n = 2 \cdot 7,81 = 15,62$ мОм.

Определим эквивалентное сопротивление шинопровода по формуле (7) имеет значение:

$$R_{\text{эш}} = \left[r_{\text{э}20} \cdot l \cdot \frac{1}{6\cdot\left(1+\frac{1}{n}\right)\cdot\left(2+\frac{1}{n}\right)} + \frac{r_n}{n} \right] \cdot \left[1+\alpha\left(\theta_{\text{ж}}-\theta_0\right)\right] + \frac{r_k}{n} = 3,32 \text{ мОм.}$$

Далее по выражению (6) определим потери активной мощности:

$$\Delta P_{\text{ш}} = 3 \cdot I_{Э}^2 \cdot R_{\text{эш}} = 322{,}25 \text{ Вт}.$$

Полученные результаты расчетов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Определение эквивалентного сопротивления магистральной цеховой сети

По формуле															
$I_{\text{рш}}$, А	$I_{\text{нш}}$, А	Сеч. S, мм²	θ_0, °С	$k_з^2$	$\theta_ж$, °С	r_{20}, мОм/м	$L_{\text{ср}}$, м	$n_{\text{эл}}$	I_n, А	$I_д$, А	r_n, мОм	$r_к$, мОм	$R_{\text{эш}}$, мОм	ΔP, Вт
180	250	35х5	35	0,64	63,8	0,2	20	10	25	32	7,81	10,91	3,32	322,25

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 шинопровода ($s*n$) и по кривой соответствующего коэффициента загрузки линий на оси ординат найти искомое значение.

Номограммы для определения эквивалентного сопротивления магистральных сетей приведены на рис. 4 и 5.

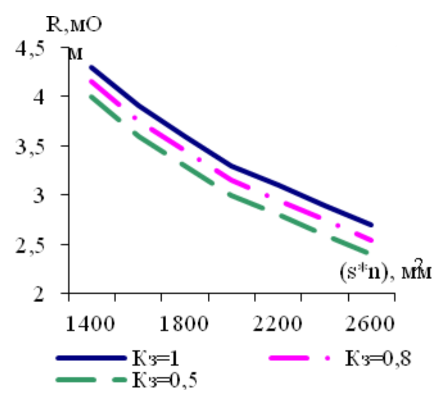

Рис. 4. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинопровода ШРА-73 с $I_{\text{ном}} = 250\ A$, средней длиной 20 м и температурой окружающей среды 20 ºС

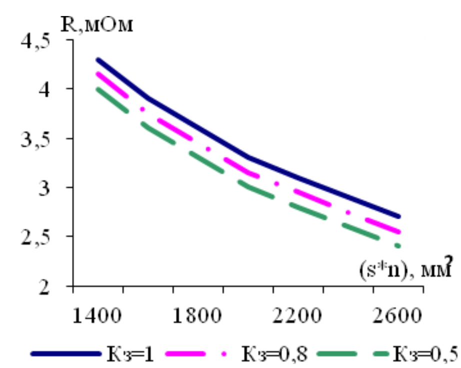

Рис. 5. Номограммы эквивалентного сопротивления для шинопровода ШРА-73 с $I_{\text{ном}} = 250\ A$, средней длиной 30 м и температурой окружающей среды 20 ºС.

Эквивалентное сопротивление, определенное по данным номограммам для приведенных исходных данных магистральных цеховых сетей, принимает значение $R_{\text{эш}}$ = 3,27 мОм.

Потери активной мощности для данного эквивалентного сопротивления:

$$\Delta P = 3 \cdot I_{\text{р}}^2 \cdot R_{э} = 3 \cdot 180^2 \cdot\ 3{,}27 = 317{,}84 \text{ Вт}.$$

Проведем сравнительный анализ приведенных выше расчетов для магистральной сети. Примем расчет по выражению (6) за эталонный метод и определим относительную погрешность. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления и потерь мощности цеховой сети приведены в табл. 7.

Таблица 7

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:

$$R_{Э(СМ)} = \frac{R_{Э(Р)} \cdot R_{Э(М)}}{R_{Э(Р)} + R_{Э(М)}} \ . \qquad (8)$$

Заключение

Результаты исследований показали, что применение номограмм приемлемо для определения эквивалентного сопротивления цеховых радиальных и магистральных сетей с учетом таких параметров как средняя длина, загрузка 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 использования с учетом изменения структуры схемы.

Литература

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Уточнение величины эквивалентного сопротивления цеховых сетей // Надежность и безопасность энергетики. 2015. №3. С. 34–36.

2. Грачева Е.И., Сафин А.Р., Шагидуллин А.В., Хаерова А.Н. Моделирование законов изменения функциональных параметров низковольтных аппаратов // Надежность и безопасность энергетики. 2014. №3. С. 66–69.

3. 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.

4. Валиев Р.Т., Обоскалов В.П., Гусев С.А. Сравнительная эффективность методов расчета показателей балансовой надежности энергосистем // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 9–10. С.119–125.

5. Богданофф Дж. Козин Ф.М. Вероятностные модели накопления повреждений. М.: Мир, 1989. 344 с, ил.

6. Мамонтов А.Н., Рычков А.В., Астанин С.С. Тепловизионный контроль трансформаторов тока и трансформаторов напряжения // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2016. №4. С. 9–18.

7. Ершов А.М., Валеев Г.С., Валеев Р.Г. Исследование на компьютерной модели режимов работы радиальной воздушной линии напряжением 380 В при обрывах фазных и нулевого проводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 9–10. С.16–24.

8. Yu-Long C., Hong L., Jing-Gin W. Simulation and reliability analysis of shunt active power theory // Journal of Zhejiang University Science. 2007. №3. P. 416–421.

9. Шпиганович А.А. Анализ влияния вероятностных параметров электрооборудования на

эффективность функционирования систем электроснабжения // Вести вузов Черноземья. 2013. №2. с.25–32.

10. Marinopoulos A. G., Alexiadis M. C., Dokopoulos P. S. Energy losses in a distribution line with distributed generation based on stochastic power flow. Electric Power Systems Research. 2011. №5 P. 86–94.

11. Петушков М.Ю., Сарваров А.С., Федоров О.В. Оценка ресурсосбережения электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015. №3. с. 24–28.

12. Wang Feng, Qi Yanpeng, Fu Zhengcai, et al. Reliability Evaluation of Distribution System Based on Modified Failure Mode and Effect Analysis Method. Low Voltage Apparatus, 2013. №1. P. 37–42.

13. Mohamed Imran, M. Kowsalya, D. P. Kothari «A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution network» // Electric Power Energy System, 2014. № 63. P. 461–472.

Авторы публикации

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

Абдуллазянов Рустем Эдвардович – к.т.н., генеральный директор ГУП РТ «Электрические сети», доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» Казанского государственного энергетического университета.

Алимова Алсу Нюрхайдаровна – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Gracheva E.I., Naumov O.V. Specification of size of equivalent resistance of shop networks // Reliability and safety of power. 2015. No. 3. P. 34–36.

2. Gracheva E.I., Safin A.R., Shagidullin A.V., Hayerova A.N. Modeling of laws of change of functional parameters of low-voltage devices // Reliability and safety of power. 2014. No. 3. P. 66–69.

3. Sadykov R.R. Influence of regime and circuit parameters of electric equipment on the equivalent resistance of shop networks // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2015. № 7-8. P. 92–97.

4. Valiyev R.T., Oboskalov V. P., Gusev S.A. Comparative efficiency of methods of calculation of indicators of balance reliability of power supply systems // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2016. № 9-10. P. 119–125.

5. Bogdanoff J., Kozin F.M. Probabilistic models of accumulation of damages. M.: World, 1989. p. 344.

6. Mamontov A.N., Rychkov A.V., Astanin S.S. Thermovision control of transformers of current and transformers of tension // Messages of higher educational institutions of the Black Earth. 2016. No. 4. P.9–18.

7. Yershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. A research on computer model of operating modes of a radial air-line of 380 V at breaks phase and zero wires // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2016. № 9-10. P. 16–24.

8. Yu-Long C., Hong L., Jing-Gin W. Simulation and reliability analysis of shunt active power theory // Journal of Zhejiang University Science. 2007. №3. P. 416–421.

9. Shpiganovich A.A. Analysis of influence of probabilistic parameters of electric equipment on efficiency of functioning of systems of power supply // Vestie of higher education institutions of the

Black Earth. 2013. №2. P.25–32.

10. Marinopoulos A. G., Alexiadis M. C., Dokopoulos P. S. Energy losses in a distribution line with distributed generation based on stochastic power flow. Electric Power Systems Research. 2011. №5 P. 86–94.

11. Cockerels M.Yu., Sarvarov A. S., Fedorov of O.V. Otsenk of resource-saving of electric equipment // Electric equipment: operation and repair. 2015. No. 3. P. 24–28.

12. Wang Feng, Qi Yanpeng, Fu Zhengcai, et al. Reliability Evaluation of Distribution System Based on Modified Failure Mode and Effect Analysis Method. Low Voltage Apparatus, 2013. №1. P. 37–42.

13. Mohamed Imran, M. Kowsalya, D. P. Kothari «A novel integration technique for optimal network reconfiguration and distributed generation placement in power distribution network» // Electric Power Energy System, 2014. № 63. P. 461–472.

Authors of the publication

Elena I. Gracheva – Kazan state power engineering University, Kazan, Russia. Email: grachieva.i@bk.ru.

Rustem E. Abdullazyanov – Electrical grid, Kazan, Russia; Kazan state power engineering University, Kazan, Russia.

Alsu N. Alimova – Kazan state power engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию ***29 ноября 2018г.***