

Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях

А. Р. Петров*, Е. И. Грачева, Н. К. Мифтахова

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;
e-mail: petroval13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
19.08.2024;

принята
к публикации
29.08.2024

Ключевые слова:

низковольтная сеть,
потери электроэнергии,
сопротивление
контактов, нагрев
проводников,
загрузка линий

Для повышения достоверности расчетов потерь электроэнергии в низковольтных электрических сетях необходимо учитывать влияние основных параметров электрооборудования. В ходе исследования предложены структурная схема и алгоритм определения эквивалентного сопротивления участка цеховой сети; выявлены основные факторы, определяющие эквивалентное сопротивление схемы (сопротивления низковольтных коммутационных аппаратов, температура нагрева проводников, температура окружающей среды, коэффициент загрузки оборудования); показаны графические зависимости изменения эквивалентного сопротивления радиального и магистрального участков схемы от среднеквадратического коэффициента загрузки оборудования и температуры нагрева проводников. Общая погрешность оценки эквивалентного сопротивления при расчете без учета основных исследуемых параметров оборудования для радиальных, магистральных и смешанных схем составляет 40 % и более. Погрешность результатов вычислений без учета сопротивлений контактных соединений коммутационных аппаратов может достигать 80 %. Полученные зависимости эквивалентного сопротивления от основных параметров оборудования рекомендуются к использованию для повышения достоверности оценки потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях.

Для цитирования

Петров А. Р. и др. Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.

Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids

Almaz R. Petrov*, Elena I. Gracheva, Naila K. Miftakhova

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;
e-mail: petroval13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>

Article info

Received
19.08.2024;

accepted
29.08.2024

Key words:

low-voltage network,
power losses,
contact resistance,
conductor heating,
line loading

Abstract

To improve the reliability of calculations of electric power losses in low-voltage electric networks, it is necessary to take into account the influence of the main parameters of electrical equipment. In the course of the study, a structural diagram and an algorithm for determining the equivalent resistance of the section of the shop network have been proposed; the main factors determining the equivalent resistance of the circuit (resistance of low-voltage switching devices, heating temperature of conductors, ambient temperature, equipment load factor) have been identified; graphical dependencies of the change in the equivalent resistance of the radial and trunk sections of the circuit on the mean square equipment load factor and the heating temperature of conductors have been shown. The total error in estimating the equivalent resistance when calculating without taking into account the main studied parameters of equipment for radial, trunk and mixed circuits is 40 % or more. The error in the results of calculations without taking into account the resistance of contact connections of switching devices can reach 80 %. The obtained dependencies of the equivalent resistance on the main parameters of the equipment are recommended for use to improve the reliability of estimating electric power losses in intra-plant electric networks.

For citation

Petrov, A. R. et al. 2024. Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids. *Vestnik of MSTU*, 27(4), pp. 511–520. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.

Введение

Современные темпы развития технологий промышленной отрасли и рост потребления электроэнергии (ЭЭ) обуславливают необходимость повышения качества учета потерь ЭЭ в низковольтных сетях промышленных систем электроснабжения (Grigoras et al., 2018). В условиях экономических санкций актуализируется проблема разработки эффективных методов энергосбережения в электроэнергетике и промышленности РФ (Jizhou et al., 2021; Петрова и др., 2023; Рахимов и др., 2021; Абдуллазянов и др., 2021).

Оценка эффективности функционирования систем электроснабжения производится на основе анализа их схемных и режимных параметров. Определение потерь ЭЭ в низковольтных цеховых сетях является более сложной задачей по сравнению с расчетом потерь в сетях высоких напряжений, что объясняется особенностями электрических сетей напряжением до 1 кВ:

- большим объемом схемной и режимной информации с низкой достоверностью;
- большой протяженностью линий и разветвленностью схем сетей электроснабжения;
- различным исполнением участков (двух/трех/четырёх/пятипроводные участки);
- неравномерностью загрузки участков сети и пр.

Перечисленные особенности необходимо учитывать при оценке и моделировании потерь активной мощности в низковольтных электрических сетях (Грачева и др., 2018; Ivanov et al., 2019; Наумов и др., 2023). Реализуемые современные модели эффективны и при асимметричной нагрузке с применением балансировки нагрузки по фазам в низковольтной электрической сети (Atanasov et al., 2022; Oramas-Piero et al., 2018).

При выборе параметров линий цеховых сетей необходимо учитывать основные характеристики эксплуатации – условия окружающей среды, загрузку линий и т. д. Компоновка оборудования цеховых сетей определяется следующими техническими факторами:

- 1) числом, плотностью, характером размещения и мощностью приемников ЭЭ;
- 2) числом участков цеховой сети и длиной линий схемы;
- 3) температурой окружающей среды;
- 4) подвижностью приемников при применении троллейных токопроводов или гибких проводов и кабелей.

Точное определение величины потерь ЭЭ при проектировании важно для оптимизации структуры схемы сети, выбора мест и количества распределительных устройств, а также определения сечений кабелей и проводов. Статистические данные показывают, что потери ЭЭ в низковольтных распределительных сетях составляют примерно от 4 до 20 % от общего электропотребления (Armas et al., 2019; Абдуллазянов и др., 2021; Грачева и др., 2018).

На основе расчетных данных величины потерь ЭЭ сотрудники отделов эксплуатации проводят анализ имеющихся "очагов наибольших потерь" для эффективного внедрения мероприятий по экономии ЭЭ (Shengyan et al., 2011). Для эффективного снижения потерь в системе электроснабжения и повышения эффективности эксплуатации оборудования в настоящее время используются нейронные сети на основе алгоритма кластеризации графов (Chen et al., 2023). Возможно уточнение топологии низковольтных сетей при использовании программного обеспечения для расчета потерь в кабельных линиях (Wang et al., 2023; Hasan et al., 2020).

Для повышения достоверности величины потерь ЭЭ в сетях 0,4 кВ следует определять потери в низковольтных коммутационных аппаратах (НКА). Техническое состояние НКА в значительной степени определяет надежность системы электроснабжения (Петров и др., 2023). Для уменьшения финансовых расходов на эксплуатацию электрооборудования необходимо построение рациональных схем цеховых сетей низкого напряжения (Kerckhove et al., 2023).

Целью настоящего исследования является определение эквивалентного сопротивления цеховой сети с учетом влияния основных параметров электрооборудования: загрузки линий; температуры окружающей среды; температуры нагрева проводников и сопротивлений НКА.

Материалы и методы

Величина потерь мощности или ЭЭ в электрической сети определяется произведением квадрата среднеквадратичного тока головного участка сети и эквивалентного сопротивления R_{ekv} схемы. Погрешность расчета R_{ekv} может быть сопоставима с погрешностью определения величины среднеквадратичного тока.

Объектом исследования является участок цеховой сети системы электроснабжения промышленного предприятия.

Схема участка цеховой сети для установления эквивалентного сопротивления R_{ekv} схемы без учета основных параметров электрооборудования показана на рис. 1, где использованы следующие обозначения: Т – трансформатор; АВ – автоматический выключатель; ПМ – пускатель магнитный; К – контактор; Д – электродвигатель.

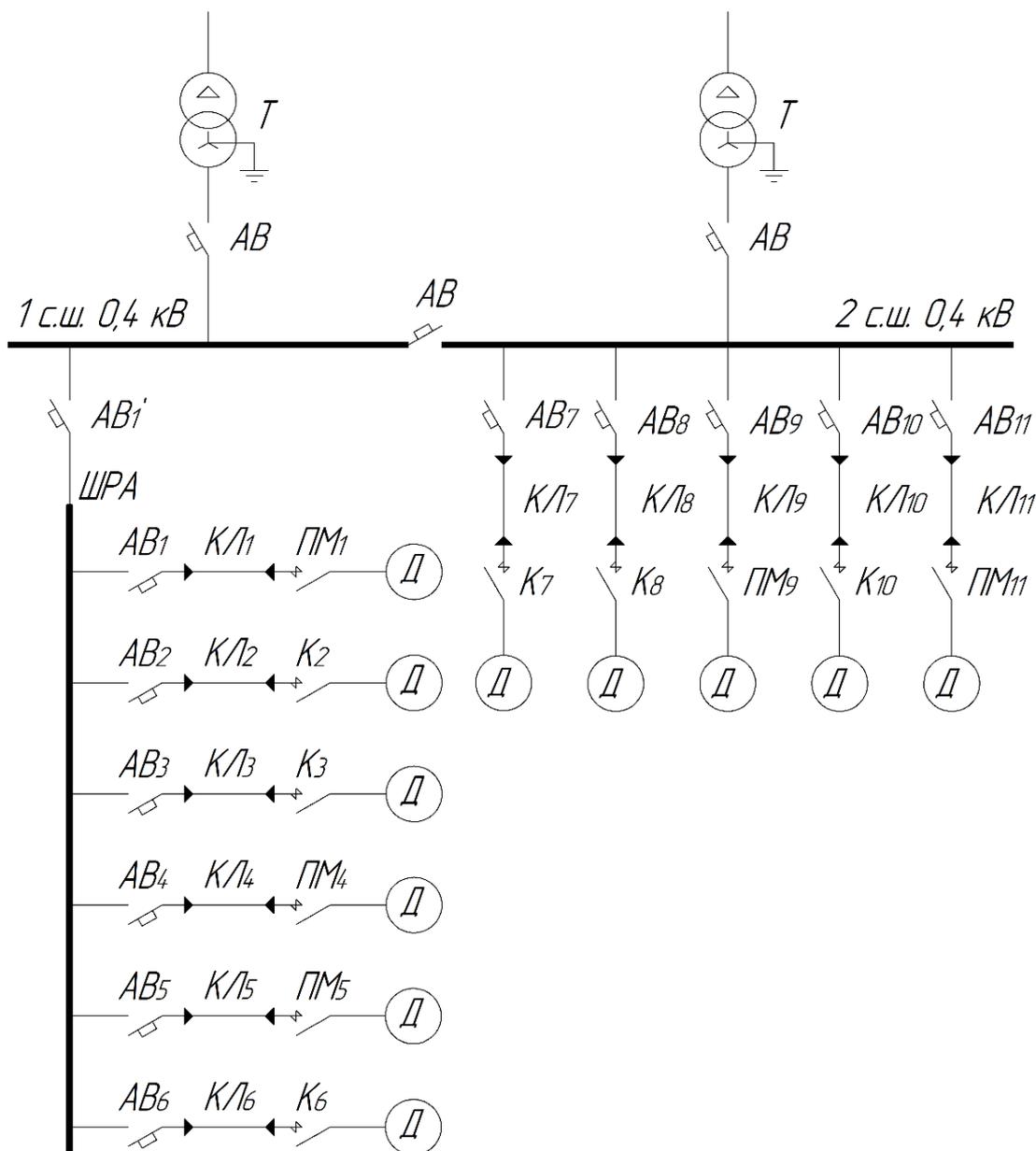


Рис. 1. Схема электроснабжения участка цеховой сети
 Fig. 1. Electricity supply scheme of the workshop network section

Значения основных параметров электрооборудования участка цеховой сети приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры электрооборудования участка цеховой сети
 Table 1. Main parameters of electrical equipment of the workshop network section

Номер	Кабельная линия		K_c^*	Электродвигатель	$P_{н}^{**}$, кВт	Автоматический выключатель	Магнитный пускатель	Контактор
	Тип	Длина l , м						
1'	–	–	–	–	–	ВА57-31-80А	–	–
1	АВВГ 3х10	20	0,75	АИР160М2	18,5	ВА57-31-40А	ПМЛ-3100-40А	–
2	АВВГ 3х6	18	0,45	АИР132М2	11,0	ВА57-31-25А	–	КМ-22510-25А
3	АВВГ 3х4	12	0,55	АИР112М2	7,5	ВА57-31-16А	–	ПМ12-016150-16А
4	АВВГ 3х2,5	10	0,7	АИР100S2	4,0	А63-М-10А	ПМЛ-1100-10А	–
5	АВВГ 3х2,5	10	0,75	АИР100S2	4,0	А63-М-10А	ПМЛ-1100-10А	–
6	АВВГ 3х4	12	0,6	АИР112М2	7,5	ВА57-31-16А	–	ПМ12-016150-16А

7	АВВГ 3x25	18	0,5	АИР200М2	37	ВА57-31-80А	–	КМ-48012-80А
8	АВВГ 3x10	15	0,75	АИР160М2	18,5	ВА57-31-40А	–	ПМ12-040150-40А
9	АВВГ 3x25	12	0,65	АИР180М2	30,0	ВА57-31-63А	ПМЛ-4100-63А	–
10	АВВГ 3x16	23	0,85	АИР180S2	22,0	ВА57-31-50А	–	КМ-35012-50А
11	АВВГ 3x10	15	0,75	АИР160М2	18,5	ВА57-31-40А	ПМЛ-3100-40А	–

Примечания: * K_z – коэффициент загрузки оборудования; ** P_n – номинальная мощность электродвигателя.

Структурная схема для определения эквивалентного сопротивления участка сети с учетом основных параметров электрооборудования представлена на рис. 2: t_{os} – температура окружающей среды, °С; t – температура нагрева проводников, °С; K_z – коэффициент загрузки оборудования; R_{nka} – сопротивление контактных соединений НКА, мОм; R_{ekvr} – эквивалентное сопротивление радиального участка схемы, мОм; R_{ekvsh} – эквивалентное сопротивление магистрального участка схемы, мОм; R_{ekv} – эквивалентное сопротивление смешанной схемы, мОм.

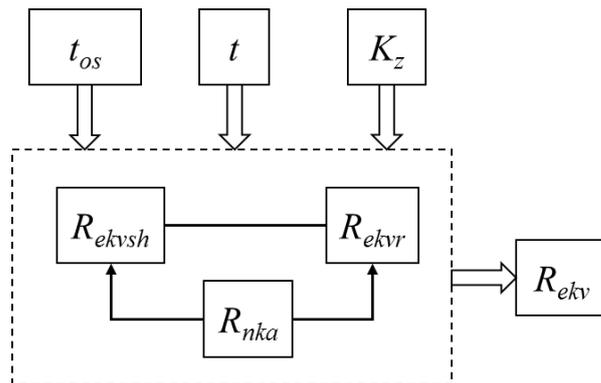


Рис. 2. Структурная схема для определения эквивалентного сопротивления участка сети R_{ekv}
 Fig. 2. Structure diagram for determining the equivalent resistance of the network section R_{ekv}

Результаты и обсуждение

Расчет эквивалентного сопротивления распределительного шинпровода

Средняя длина линий ответвлений от распределительного шинпровода (ШРА), м, вычисляется по формуле

$$l_s = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} = \frac{(20 + \dots + 12)}{6} = 13,67. \quad (1)$$

Величина, равная эквивалентному удельному сопротивлению линий ответвлений от шинпровода, мОм/м, при 20 °С равна

$$r_{e20} = 18,5 \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n S_i l_i}, \quad (2)$$

где S_i – сечение i -й линии ответвления, мм²; величина $18,5/S_i$ представляет собой сопротивление 1 м медной линии сечением S_i при 20 °С, мОм/м; если часть линии сети выполнена проводами/кабелями с алюминиевыми жилами, то используется величина $31,3/S_i$:

$$r_{e20} = 31,3 \cdot \frac{(20 + \dots + 12)}{(20 \cdot 10 + \dots + 12 \cdot 4)} = 5,65.$$

Квадрат среднеквадратического коэффициента загрузки ответвлений от шинпровода

$$K_z^2 = \frac{\sum_{i=1}^n K_{zi}^2}{n} = \frac{0,75^2 + \dots + 0,6^2}{6} = 0,413. \quad (3)$$

Температура нагрева шинпровода, °С, определяется по выражению

$$t = K_z^2 (t_d - t_{os}) + t_{os} = 0,413 \cdot (95 - 20) + 20 = 51, \quad (4)$$

где t_d – допустимая температура нагрева проводника, °С; t_{os} – температура окружающей среды, °С.

Сопротивление коммутационных аппаратов R_{nka} зависит от типа и тока коммутационного аппарата. Для автоматических выключателей и контакторов при $I_{ном} < 60$ А сопротивление контактных соединений

определяется соотношением $R_{nka} = \frac{350}{I_n}$, при $I_{nom} \geq 60$ А – соотношением $R_{nka} = \frac{310}{I_n}$. Для магнитных пускателей при $I_{nom} < 70$ А сопротивление контактов определяется соотношением $R_{nka} = \frac{825}{I_n}$, при $I_{nom} \geq 70$ А – соотношением $R_{nka} = \frac{760}{I_n}$.

Суммарное сопротивление, мОм, коммутационных аппаратов, установленных на линиях ответвлений и отходящих от ШРА, вычисляется так:

$$R_{nka} = \frac{350}{40} + \frac{825}{40} + \dots + 2 \cdot \frac{350}{16} = 379,8.$$

Общее сопротивление, мОм, ответвлений от шинпровода

$$R_n = r_{e20} l_s [1 + 0,004(t - 20)] + R_{nka} = 5,65 \cdot 13,67 \cdot [1 + 0,004(51 - 20)] + 379,8 = 466,72. \quad (5)$$

Эквивалентное сопротивление ШРА находится по формуле

$$R_{ekvsh} = \left[r_{20} l \cdot \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) + \frac{R_n}{n} \right] [1 + \alpha(t - t_{os})] + \frac{R_{nka}}{n}, \quad (6)$$

где r_{20} – сопротивление 1 м шинпровода при 20 °С, мОм; l – длина шинпровода, м; n – количество приемников, присоединенных к шинпроводу; α – температурный коэффициент увеличения сопротивления, 1/°С.

Эквивалентное сопротивление ШРА, мОм, с учетом автоматического выключателя АВ'1 рассчитывается следующим образом:

$$R_{ekvsh} = \left[0,016 \cdot 9 \cdot \frac{1}{6} \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \right) \cdot \left(2 + \frac{1}{6} \right) + \frac{466,72}{6} \right] \cdot [1 + 0,004 \cdot (51 - 20)] + \frac{379,8}{6} + 3,875 = 154,69,$$

где сопротивление 1 м шинпровода ШРА, мОм, при 20 °С равно

$$r_{20} = 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{5 \cdot 35 \cdot 10^{-6}} = 0,016.$$

Расчет эквивалентного сопротивления, мОм, радиального участка схемы второй секции шин (2 с. ш., 0,4 кВ) производится по формуле

$$R_{ekvr} = \left(r_{e20} l_s [1 + 0,004(t_r - 20)] + R_{nka} \right) \frac{1}{n} = \left(0,504 \cdot 16,6 \cdot [1 + 0,004(45,2 - 20)] + 86,64 \right) \cdot \frac{1}{5} = 24,02. \quad (7)$$

Эквивалентная температура нагрева проводника t_r , °С, определяется среднеквадратическим значением коэффициента загрузки:

$$t_r = K_z^2 (t_{kl} - t_{os}) + t_{os}, \quad (8)$$

где t_{kl} – допустимая температура нагрева кабельной линии (для АВВГ принимается равной 70 °С).

Эквивалентное сопротивление смешанной схемы

Определим R_{ekv} , мОм, смешанной схемы сети:

$$R_{ekv} = \frac{R_{ekvr} R_{ekvsh}}{R_{ekvr} + R_{ekvsh}} = \frac{24,02 \cdot 154,69}{24,02 + 154,69} = 20,79. \quad (9)$$

По формуле (6) рассчитаем эквивалентное сопротивление радиального участка схемы при изменении среднеквадратического значения коэффициента загрузки линий от 0 до 2,0. По выражению (7) определим эквивалентное сопротивление ШРА магистрального участка схемы при изменении среднеквадратического коэффициента загрузки ШРА от 0 до 2,0. Зависимости эквивалентного сопротивления ШРА магистрального и радиального участков схемы от среднеквадратического коэффициента загрузки представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления радиального и магистрального участков сети от среднеквадратического коэффициента загрузки

Table 2. Results of calculating equivalent resistance of the radial and main network sections based on the root-mean-square load factor

Участок сети	Эквивалентное сопротивление, мОм, с учетом коэффициента загрузки K_z				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0
Радиальный участок схемы R_{ekvr}	23,41	23,71	24,63	26,15	28,28
Магистральный участок схемы R_{ekvsh}	143,44	150,19	171,33	209,47	268,93

Графические зависимости (рис. 3) показывают, что изменение среднеквадратической загрузки линий радиального участка от номинального до двукратного значения приводит к повышению R_{ekvr} на 14,8 %, изменение среднеквадратической загрузки ШРА магистрального участка от номинального значения до двукратного превышения приводит к увеличению R_{ekvsh} на 56,9 %.

По формулам (6) и (7) рассчитаем эквивалентное сопротивление радиального и магистрального участков схемы при изменении температуры нагрева проводников. Графические зависимости эквивалентного сопротивления R_{ekvr} радиальной схемы (кривая 1) от эквивалентной температуры нагрева линий t_r и эквивалентного сопротивления ШРА магистральной схемы R_{ekvsh} от температуры нагрева ШРА (кривая 2) представлены на рис. 4 и в табл. 3.

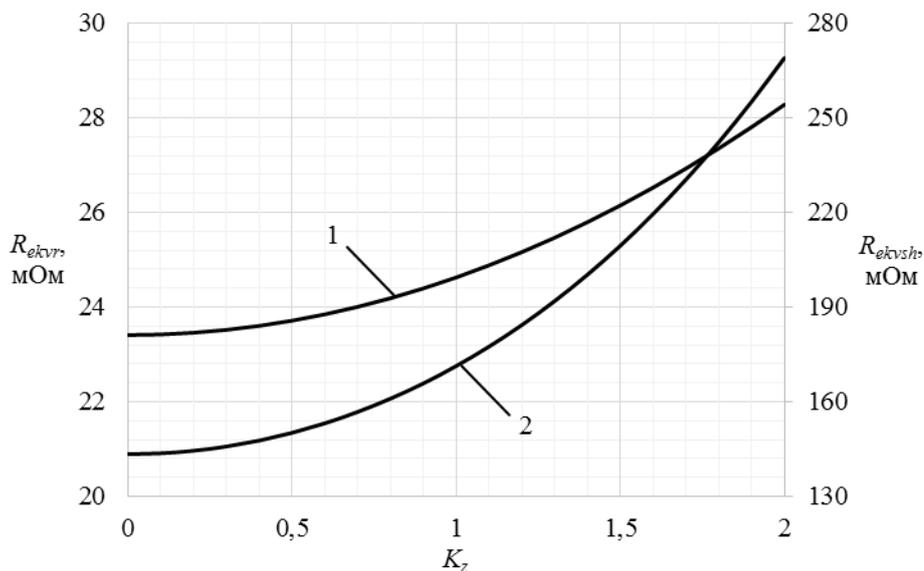


Рис. 3. Графические зависимости эквивалентного сопротивления от среднеквадратического коэффициента загрузки: 1 – радиального участка схемы R_{ekvr} ; 2 – магистрального участка схемы R_{ekvsh}
 Fig. 3. Graphical dependences of the equivalent resistance on the root-mean-square loading factor: 1 – the radial section of the scheme R_{ekvr} ; 2 – the main section of the scheme R_{ekvsh}

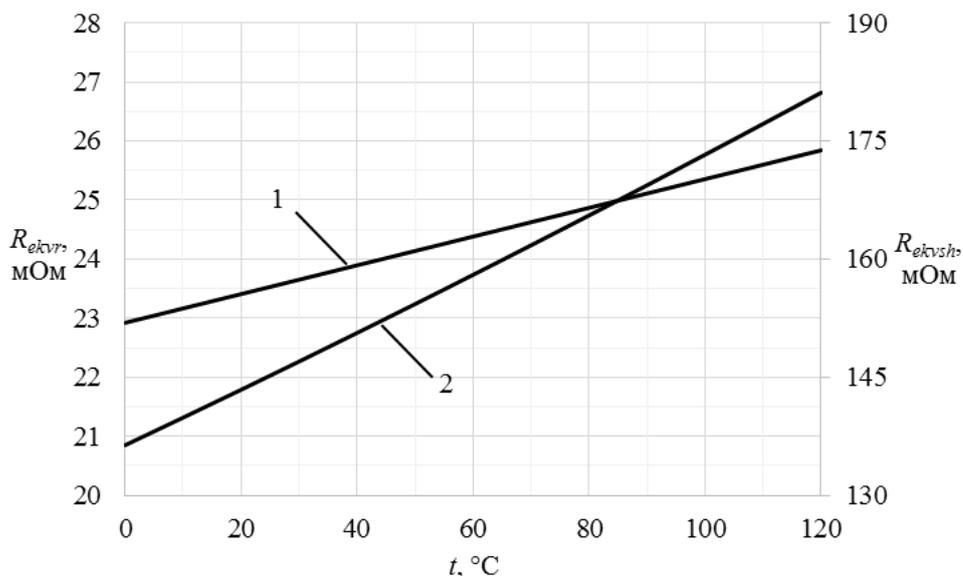


Рис. 4. Зависимости эквивалентного сопротивления от эквивалентной температуры нагрева проводников: 1 – радиального участка схемы R_{ekvr} ; 2 – магистрального участка схемы R_{ekvsh}
 Fig. 4. Dependence of equivalent resistance on equivalent heating temperature of conductors: 1 – the radial section of the scheme R_{ekvr} ; 2 – the main section of the scheme R_{ekvsh}

Таблица 3. Результаты расчетов эквивалентного сопротивления участков цеховой сети от температуры нагрева проводников
Table 3. Results of calculating equivalent resistance of sections of the shop network from the heating temperature of conductors

Участок сети	Эквивалентное сопротивление, мОм, при температуре нагрева проводников t , °С						
	0	20	40	60	80	100	120
Радиальный участок схемы R_{ekvr}	22,92	23,41	23,9	24,38	24,87	25,36	25,84
Магистральный участок схемы R_{ekvsh}	136,39	143,44	150,65	158,03	165,57	173,3	181,15

В соответствии с допустимой температурой нагрева кабеля АВВГ (70 °С) нагрев до температуры перегрузки (90 °С) приводит к повышению R_{ekvr} на 2 %. Увеличение температуры ШРА от допустимого значения (95 °С) до температуры перегрузки (115 °С) ведет к повышению R_{ekvsh} на 4,6 %.

Результаты расчетов представлены в табл. 4, где показаны возможные погрешности определения R_{ekv} без учета таких факторов, как сопротивление НКА, нагрев ШРА и кабельных линий, температура окружающей среды и коэффициент загрузки проводников.

Таблица 4. Возможные погрешности при определении эквивалентного сопротивления радиального и магистрального участков схемы
Table 4. Possible errors in determining the equivalent resistance of the radial and main circuit sections

Расчет	Эквивалентное сопротивление участков, мОм			Погрешность, %		
	R_{ekvr} (от 2 с. ш.)	R_{ekvsh} (от 1 с. ш.)	R_{ekv}	δ_{ekvr}	δ_{ekvsh}	δ_{ekv}
С учетом всех параметров	24,02	154,69	20,79	–	–	–
Без учета:						
– сопротивления НКА R_{nka}	6,70	16,34	4,75	72,1	89,4	77,15
– температуры нагрева проводников t	22,92	136,39	19,63	4,6	11,8	5,6
– температуры окружающей среды t_{os}	24,51	162,16	21,29	2,04	4,83	2,4
– среднеквадратического коэффициента загрузки оборудования K_z	23,41	143,44	20,13	2,54	7,27	3,17

Данные результатов вычислений (табл. 4) показывают, что наибольшая погрешность (72,1 %) при определении эквивалентного сопротивления радиального участка схемы выявляется в ходе расчета без учета сопротивлений НКА, установленных на линии. Наименьшая погрешность для данного участка схемы составила 2,04 % и определена при расчете без учета температуры окружающей среды. Наибольшая погрешность (89,4 %) при определении эквивалентного сопротивления шинпровода магистрального участка схемы возникает при вычислении без учета сопротивлений НКА, а наименьшая погрешность (4,83 %) определяется при расчете без учета температуры окружающей среды.

Определим суммарную погрешность при вычислении эквивалентного сопротивления смешанной схемы с учетом рассмотренных выше составляющих. Расчетный интервал – минимальное и максимальное значения при определении эквивалентного сопротивления – вычисляется по формулам:

$$R_{\min \Sigma} = R_{ekv} (1 - 2\sigma_R), \quad R_{\max \Sigma} = R_{ekv} (1 + 2\sigma_R), \quad (10)$$

$$R_{\min \Sigma} = 20,79 \cdot (1 - 2 \cdot 0,19) = 12,74 \text{ мОм}, \quad R_{\max \Sigma} = 20,79 \cdot (1 + 2 \cdot 0,19) = 28,84 \text{ мОм},$$

где σ_R – среднеквадратическое отклонение эквивалентного сопротивления, равное

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - R_{ekv})^2}}{4R_{ekv}} = \frac{\sqrt{(4,75 - 20,79)^2 + (19,63 - 20,79)^2 + (21,29 - 20,79)^2 + (20,13 - 20,79)^2}}{4 \cdot 20,79} = 0,19. \quad (11)$$

Границы суммарной погрешности при определении эквивалентного сопротивления смешанного участка схемы рассчитываются так:

$$\delta_- = \left(\frac{R_{\min \Sigma} - R_{ekv}}{R_{ekv}} \right) 100 \% = \left(\frac{12,74 - 20,79}{20,79} \right) 100 \% = -38,72 \%,$$

$$\delta_+ = \left(\frac{R_{\max \Sigma} - R_{ekv}}{R_{ekv}} \right) 100 \% = \left(\frac{28,84 - 20,79}{20,79} \right) 100 \% = +38,72 \%.$$

Суммарная погрешность при определении эквивалентного сопротивления радиального участка схемы составляет $\pm 36,16$ %, эквивалентного сопротивления магистрального участка схемы – $\pm 45,3$ %.

Заключение

Исследование параметров функционирования систем внутриводского электроснабжения показывает, что степень достоверности определения потерь мощности и электроэнергии зависит от точности расчета эквивалентного сопротивления схемы. Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на точность расчета эквивалентного сопротивления схемы, является учет сопротивлений контактов НКА.

Отсутствие достоверной информации о параметрах оборудования приводит к погрешности при определении эквивалентного сопротивления схемы сети. Для повышения точности расчета эквивалентного сопротивления схемы и потерь ЭЭ во внутриводских сетях необходимо учитывать влияние следующих факторов: температуры нагрева проводников, температуры окружающей среды, сопротивлений контактов НКА, а также загрузки электрооборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Горлов А. Н., Шакурова З. М. [и др.]. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13>. EDN: TVQQNU.
- Грачева Е. И., Абдуллазянов Р. Э., Алимова А. Н. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 4(40). С. 53–65. EDN: UCZSVD.
- Наумов И. В., Федоринова Э. С., Якупова М. А. Устройство для управления несимметричными режимами в компонентах низковольтных систем электроснабжения // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. 2023. Т. 16, № 2. С. 175–186. EDN: FEHWNS.
- Петров А. Р., Грачева Е. И., Valtchev S. Исследование технических параметров магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 384–394. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>. EDN: FNRQJC.
- Петрова Р. М., Грачева Е. И., Valtchev S., Мифтахова Н. К. Методы оценки надежности схем внутрицехового электроснабжения // Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 4. С. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>. EDN: MVFYKP.
- Рахимов О. С., Мирзоев Д. Н., Грачева Е. И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 209–222. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222>. EDN: NWISVC.
- Armas J., Ivanov A. Determination of the total cost of active power losses and methods to reduce power losses in low-voltage distribution networks // IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2019. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982319.
- Atanasov V., Stoilov D. Influence of the asymmetrical load on losses in low voltage network // V International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech), Sofia, Bulgaria, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/hitech56937.2022.10145568>.
- Chen L., Yaxin L., Kai W., Dongping Z. [et al.]. Research on graph clustering based line loss prediction in low-voltage distribution network // 2nd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET), Shanghai, China, 2023. P. 540–545. DOI: <https://doi.org/10.1109/apet59977.2023.10489816>.
- Grigoras G., Gavrilas M. An improved approach for energy losses calculation in low voltage distribution networks based on the smart meter data // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2018. P. 0749–0754. DOI: <https://doi.org/10.1109/icepe.2018.8559612>.
- Hasan H., Mozumdar M., Al-Jufout S. Using 0.6 kV/1 kV low voltage in distribution systems for the reduction of the technical and non-technical energy losses // 11th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/irec48820.2020.9310417>.
- Ivanov O., Neagu B.-C., Gavrilas M., Grigoras G. [et al.]. Phase load balancing in low voltage distribution networks using metaheuristic algorithms // International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/sielmen.2019.8905900>.
- Jizhou L., Jixian R., Ran H., Wen Y. [et al.]. Research on low voltage does not power cut operation refined collection of line loss data in distribution network // IEEE 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), Dalian, China, 2021. P. 450–454. DOI: <https://doi.org/10.1109/iciscae52414.2021.9590796>.

- Kerckhove S., D'Hulst R., Hertem D. V. Reconfiguration method for low voltage distribution networks // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), Grenoble, France, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/isgteurope56780.2023.10407763>.
- Oramas-Piero C., Vega-Fuentes E., Déniz F. Genetic algorithm based control for unbalanced low voltage networks // AEIT International Annual Conference, Bari, Italy, 2018. DOI: <https://doi.org/10.23919/aeit.2018.8577460>.
- Shengyan S., Xiaoliu S., Yawei G. Research on calculation of low voltage distribution network theoretical line loss based on matpower // International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, Beijing, China, 2011. P. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.1109/apap.2011.6180516>.
- Wang W., Wang T., Cai D., Dong H. [et al.]. Analysis on technical loss reduction of typical low-voltage distribution areas // 5th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), Tianjin, China, 2023. P. 696–700. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpet59380.2023.10367564>.

References

- Abdullazyanov, E. Yu., Gracheva, E. I., Gorlov, A. N., Shakurova, Z. M. et al. 2021. Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23(3), pp. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13>. EDN: TVQQNU. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Abdullazyanov, R. E., Alimova, A. N. 2018. Analysis and methods for calculating active power and electricity losses in low-voltage shop networks. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*, 4(40), pp. 53–65. EDN: UCZSVD. (In Russ.)
- Naumov, I. V., Fedorinova, E. S., Yakupova, M. A. 2023. A device for controlling anbalancing modes in components of low-voltage power supply systems. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 16(2), pp. 175–186. EDN: FEHWNS. (In Russ.)
- Petrov, A. R., Gracheva, E. I., Valtchev, S. 2023. Study of technical parameters of magnetic starters and switches installed in workshop networks. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 384–394. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>. EDN: FNRQJC. (In Russ.)
- Petrova, R. M., Gracheva, E. I., Valtchev, S., Miftakhova, N. K. 2023. Methods for assessing the reliability of in-shop power supply. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 395–409. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-395-409>. EDN: MVFYKP. (In Russ.)
- Rakhimov, O. S., Mirzoev, D. N., Gracheva, E. I. 2021. Experimental study of quality and electricity losses in low voltage rural electric networks. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23(3), pp. 209–222. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222>. EDN: NWISVC. (In Russ.)
- Armas, J., Ivanov, A. 2019. Determination of the total cost of active power losses and methods to reduce power losses in low-voltage distribution networks. *IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia. DOI: 10.1109/RTUCON48111.2019.8982319.
- Atanasov, V., Stoilov, D. 2022. Influence of the asymmetrical load on losses in low voltage network. *V International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)*, Sofia, Bulgaria. DOI: <https://doi.org/10.1109/hitech56937.2022.10145568>.
- Chen, L., Yaxin, L., Kai, W., Dongping, Z. et al. 2023. Research on graph clustering based line loss prediction in low-voltage distribution network. *2nd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET)*, Shanghai, China, pp. 540–545. DOI: <https://doi.org/10.1109/apet59977.2023.10489816>.
- Grigoras, G., Gavrilas, M. 2018. An improved approach for energy losses calculation in low voltage distribution networks based on the smart meter data. *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iasi, Romania, pp. 0749–0754. DOI: <https://doi.org/10.1109/icepe.2018.8559612>.
- Hasan, H., Mozumdar, M., Al-Jufout, S. 2020. Using 0.6 kV/1 kV low voltage in distribution systems for the reduction of the technical and non-technical energy losses. *11th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, Tunisia. DOI: <https://doi.org/10.1109/irec48820.2020.9310417>.
- Ivanov, O., Neagu, B.-C., Gavrilas, M., Grigoras, G. et al. 2019. Phase load balancing in low voltage distribution networks using metaheuristic algorithms. *International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Craiova, Romania. DOI: <https://doi.org/10.1109/sielmen.2019.8905900>.
- Jizhou, L., Jixian, R., Ran, H., Wen, Y. et al. 2021. Research on low voltage does not power cut operation refined collection of line loss data in distribution network. *IEEE 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)*, Dalian, China, pp. 450–454. DOI: <https://doi.org/10.1109/iciscae52414.2021.9590796>.
- Kerckhove, S., D'Hulst, R., Hertem, D. V. 2023. Reconfiguration method for low voltage distribution networks. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE)*, Grenoble, France. DOI: <https://doi.org/10.1109/isgteurope56780.2023.10407763>.

- Oramas-Piero, C., Vega-Fuentes, E., Déniz, F. 2018. Genetic algorithm based control for unbalanced low voltage networks. *AET International Annual Conference*, Bari, Italy. DOI: <https://doi.org/10.23919/aet.2018.8577460>.
- Shengyan, S., Xiaoli, S., Yawei, G. 2011. Research on calculation of low voltage distribution network theoretical line loss based on matpower. *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Beijing, China, pp. 22–25. DOI: <https://doi.org/10.1109/apap.2011.6180516>.
- Wang, W., Wang, T., Cai, D., Dong, H. et al. 2023. Analysis on technical loss reduction of typical low-voltage distribution areas. *5th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET)*, Tianjin, China, pp. 696–700. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpet59380.2023.10367564>.

Сведения об авторах

Петров Алмаз Радикович – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, аспирант;
e-mail: petroval13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>

Almaz R. Petrov – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, PhD Student; e-mail: petroval13@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>

Грачева Елена Ивановна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: grachieva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Elena I. Gracheva – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: grachieva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Мифтахова Наиля Камильевна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, ст. преподаватель;
e-mail: nailya_miftahovna@mail.ru

Nailya K. Miftakhova – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066;
Kazan State Power Engineering University, Senior Lecturer;
e-mail: nailya_miftahovna@mail.ru