

УДК 621.311

## Исследование технических параметров магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях

А. Р. Петров\*, Е. И. Грачева, S. Valtchev

\*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;  
e-mail: petroval13@mail.ru

### Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
28.08.2023;

принята  
к публикации  
14.09.2023

### Ключевые слова:

электрические  
аппараты,  
сопротивление  
контактов,  
нагрев контактов,  
аппроксимирующие  
функции,  
потери  
электроэнергии

В работе проведено исследование технических параметров низковольтных коммутационных аппаратов российского производства – магнитных пускателей ПМЛ и рубильников РЕ19. Рассматривается проблема оценки энергоэффективности эксплуатации магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых во внутривоздушных системах электроснабжения. Приведены основные дестабилизирующие факторы, существенно влияющие на технические характеристики коммутационных аппаратов напряжением до 1 кВ. Надежность функционирования исследуемых аппаратов, прежде всего, зависит от степени износа коммутационных контактов. Исследованы зависимости температуры нагрева контактных площадок коммутационных аппаратов от коэффициента загрузки. Выявлено, что с увеличением загрузки аппаратов в диапазоне от 1,0 до  $2,0I_{ном}$  температура контактов и контактных площадок находится в допустимых пределах в соответствии с требованиями ГОСТ 403-73. Показаны основные, влияющие на сопротивление контактных соединений факторы – ток, протекающий по контактам, их размеры и температура нагрева. По результатам теоретических и экспериментальных исследований разработаны аппроксимирующие функции зависимостей сопротивлений контактов и контактных соединений коммутационных аппаратов от номинального тока и определены погрешности расчетного метода оценки сопротивлений контактов. Разработанные зависимости могут быть использованы для определения эквивалентного сопротивления сетей внутривоздушного электроснабжения при оценке уровня потерь электроэнергии, что повысит достоверность полученных результатов.

### Для цитирования

Петров А. Р. и др. 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>.

## Study of technical parameters of magnetic starters and switches installed in workshop networks

Almaz R. Petrov\*, Elena I. Gracheva, S. Valtchev

\*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;  
e-mail: petroval13@mail.ru

### Article info

Received  
28.08.2023;

accepted  
14.09.2023

### Key words:

electrical  
devices,  
contact resistance,  
contact heating,  
approximating functions,  
power losses

### Abstract

The study of technical parameters of low-voltage switching devices of Russian production – magnetic starters PML and switches RE19 has been carried out. The problem of evaluating energy efficiency of operation of magnetic starters and switches installed in in-plant power supply systems has been presented. The main destabilizing factors significantly affecting the technical characteristics of switching devices with voltage up to 1 kV have been given. Reliability of functioning of the investigated devices, first of all, depends on the degree of wear of switching contacts. The dependences of the heating temperature of the contact areas of switching devices on the loading coefficient have been studied. It has been revealed that with the increase of loading of devices in the range from 1,0 to  $2,0I_{nom}$  the temperature of contacts and contact areas is within the permissible limits in accordance with the requirements of GOST 403-73. The main factors influencing the resistance of contact connections – current flowing through the contacts, their dimensions and heating temperature – have been shown. According to the results of theoretical and experimental studies approximating functions of dependences of resistance of contacts and contact connections of switching devices on rated current have been developed and errors of the calculated method of contact resistance estimation have been determined. The developed dependencies can be used to determine the equivalent resistance of networks of in-plant power supply when estimating the level of power losses, which will increase the reliability of the results obtained.

### For citation

Petrov, A. R. et al. 2023. Study of technical parameters of magnetic starters and switches installed in workshop networks. *Vestnik of MSTU*, 26(4), pp. 384–394. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-384-394>.

## Введение

Низковольтные коммутационные аппараты (НКА) являются важнейшей частью всех электрифицированных объектов промышленного назначения (Аполлонский и др., 2016). Поэтому к качеству функциональных характеристик НКА предъявляют высокие требования. НКА подвергаются одновременно одному или нескольким воздействующим факторам в процессе эксплуатации, хранения и транспортировки. Отдельные из этих факторов – как внутренние, так и внешние – можно рассматривать в качестве дестабилизирующих. Совокупность таких воздействий ведет к снижению параметров надежности, уменьшению механической прочности, ложным срабатываниям и, в конечном счете, может привести к отказу аппарата. Уровень надежности НКА в основном зависит от скорости износа коммутационных контактов (Садыков, 2017; Gheorghita et al., 2017). Факторы, определяющие скорость износа контактных соединений и дальнейший возможный отказ аппарата, представлены на рис. 1.

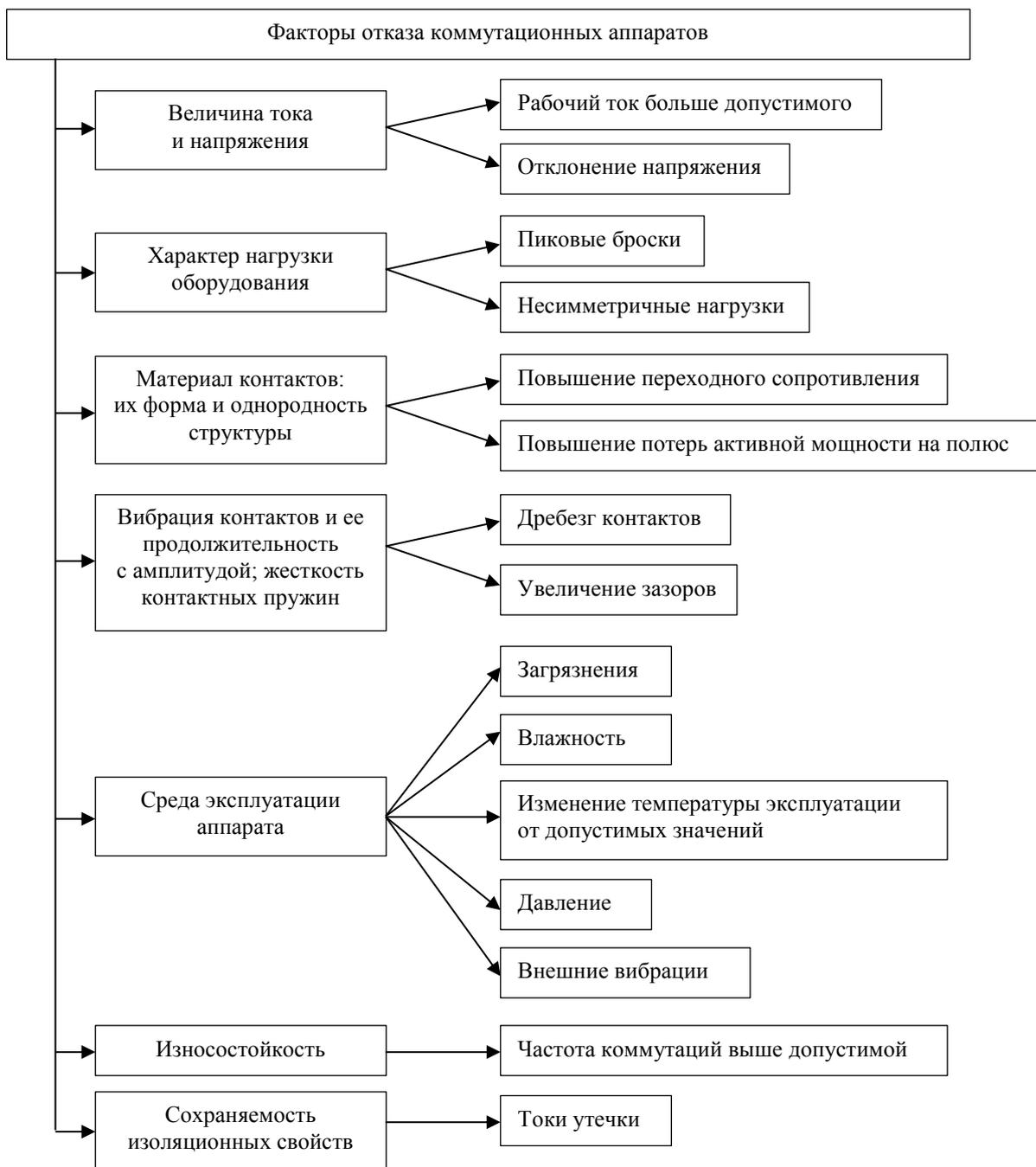


Рис. 1. Факторы отказа низковольтных коммутационных аппаратов  
Fig. 1. Failure factors of low-voltage switching devices

Одним из основных критериев износа контактов для большинства контактных соединений является величина провала контактов. Другим важным фактором, влияющим на износ контактов и контактных соединений НКА, является дуга, возникающая при цикле включение – отключение (Егоров и др., 2019; Shin et al., 2018; Ruempler et al., 2014). Процессы, происходящие при возникновении дуги, вызывают плавление и испарение материала контакта (Shin et al., 2017). Степень износа контактов НКА в процессе коммутации зависит от значения тока, протекающего через аппарат, материала контактов, а также конструктивных и массогабаритных особенностей аппарата (Hadziefendic et al., 2019; Lyuminarskaja et al., 2018).

В процессе эксплуатации аппарата не должно быть недопустимого перегрева аппарата в целом и его отдельных элементов, это требование необходимо соблюдать на протяжении всего срока службы НКА. Как известно, контактное сопротивление НКА представляет собой дополнительный источник потерь (Andrușcă et al., 2016; Deac et al., 2019). Допустимые превышения температур контактов НКА определяются условиями эксплуатации и зависят от температуры окружающей среды, давления, режима работы и применяемых материалов (Calin et al., 2020; Derevyankin et al., 2020). Нагрев контактных соединений НКА происходит под воздействием различных источников тепла, интенсивность которых меняется в зависимости от режима работы и нагрузки аппарата (Егоров и др., 2018; Gonzalez et al., 2018). Различные части и узлы НКА при протекании тока нагреваются неравномерно, поэтому температура контактных соединений обычно выше, чем температура прилегающих к нему проводников.

Целью работы является исследование и оценка величины сопротивлений контактных соединений НКА экспериментальным и расчетным методами. Полученные результаты исследования позволят в дальнейшем определять значения потерь электроэнергии в сетях напряжением до 1 кВ с высокой достоверностью.

### Материалы и методы

Как показывает практика, учет сопротивлений НКА позволяет повысить точность определения потерь в низковольтных сетях электроснабжения и определить проблемные участки сети с точки зрения энергоэффективности (Абдуллазянов и др., 2022; Грачева и др., 2019). Неучет таких параметров сети как температура нагрева проводников, температура окружающей среды и сопротивления НКА приводит к существенным погрешностям при определении потерь электроэнергии в сетях до 1 кВ (Абдуллазянов и др., 2021; Грачева и др., 2018).

Для эффективного функционирования НКА мощность, потребляемая аппаратом при его эксплуатации и рассеиваемая в нем, должна быть минимальной (Шагидуллин, 2017). Поэтому вопрос исследования потерь в НКА является актуальной задачей для достоверного моделирования основных технических характеристик низковольтных сетей (Петров и др., 2023; Ye et al., 2023; Kim et al., 2019).

Анализ большинства паспортных и каталожных данных НКА показывает, что в них не приводятся все основные технические характеристики. Не представлены значения сопротивлений большей части элементов НКА, так, например, нет данных о сопротивлениях силовых цепей и контактов аппаратов. При этом, как показывают исследования статистических данных отказов магнитных пускателей, наиболее слабыми элементами аппарата являются его силовые контакты (Буторин и др., 2019). Данные, которые содержатся в каталогах, как правило, носят приближенный характер, в связи с чем возникает необходимость исследования законов изменения сопротивлений контактных соединений НКА.

В табл. 1 представлены основные каталожные данные магнитных пускателей ПМЛ и рубильников РЕ19, выпускаемых Курским электроаппаратным заводом (КЭАЗ).

Таблица 1. Основные каталожные характеристики коммутационных аппаратов

Table 1. Main catalog characteristics of switching devices

Тип аппарата	Номинальный ток $I_{ном}$ , А	Коммутационная износостойкость, циклов	Механическая износостойкость, циклов	Потери мощности $\Delta P$ , Вт	Стоимость, руб.
Магнитный пускатель ПМЛ (КЭАЗ)	6–63	$1 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$	0,2–4,2	1 195–5 280
	80–95	$1 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	5,1–7,2	7 950
Рубильник РЕ19 (КЭАЗ)	100	нет данных	$25 \cdot 10^3$	1,4	9 662
	250–630	нет данных	$10 \cdot 10^3$	5,4–26,2	11 575–17 938

Проведем оценку сопротивлений контактных соединений аппаратов в зависимости от номинального тока и коэффициента загрузки по выражению

$$R_{к.расч.} = \frac{2\sqrt{\lambda \cdot F \cdot k_T \cdot S}}{I^2} \cdot \left( \theta_{к} - \frac{I^2 \cdot \rho \cdot (1 + \alpha \cdot \nu_{к})}{F \cdot k_T \cdot S} \right), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала контакта, для меди  $\lambda = 390$  Вт/(м·К);  $F$  – охлаждающая поверхность единицы длины проводника, м<sup>2</sup> ( $F = 2 \cdot (a + b) \cdot 10^{-3}$  – прямоугольное сечение;  $F = 2\pi r \cdot 10^{-3}$  – цилиндрическая поверхность);  $k_t$  – коэффициент теплоотдачи, для меди  $k_t = 16$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S$  – площадь поперечного сечения контактов, м<sup>2</sup> ( $S = a \cdot b$  – прямоугольное сечение;  $S = \pi r^2$  – цилиндрическая поверхность);  $I$  – ток, проходящий через контакты, А;  $\upsilon_k$  – температура контактных площадок, °С;  $\theta_k = 45^\circ\text{C}$  – допустимый перепад температуры контакта относительно температуры окружающей среды;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, для меди  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления,  $\alpha = 0,0043$ .

Определим установившееся значение температуры контакта из условия равенства между выделенной в контакте и отводимой с его поверхности тепловыми мощностями

$$\upsilon_k = \frac{I^2 \cdot \rho + \upsilon_0 \cdot F \cdot k_t \cdot S}{F \cdot k_t \cdot S - I^2 \cdot \rho \cdot \alpha}, \quad (2)$$

где  $\upsilon_0$  – температура окружающей среды,  $\upsilon_0 = 35$  °С.

По выражению (1) для магнитного пускателя ПМЛ с  $I_{\text{ном}} = 40$  А, коэффициент загрузки  $K_{зг} = 1$ , сопротивление контактных соединений  $R_{\text{кс.расч.мп}}$

$$R_{\text{кс.расч.мп}} = \frac{2 \cdot \sqrt{390 \cdot 2 \cdot (8,1 + 8,1) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (8,1 \cdot 8,1) \cdot 10^{-6}}}{40^2} \times \left( 45 - \frac{40^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 35,9)}{2 \cdot (8,1 + 8,1) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (8,1 \cdot 8,1) \cdot 10^{-6}} \right) = 6,34 \text{ мОм},$$

где  $\upsilon_k$  по (2):

$$\upsilon_k = \frac{40^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} + 35 \cdot 2 \cdot (8,1 + 8,1) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (8,1 \cdot 8,1) \cdot 10^{-6}}{2 \cdot (8,1 + 8,1) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (8,1 \cdot 8,1) \cdot 10^{-6} - 40^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 35,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

## Результаты и обсуждение

Результаты расчетов сопротивлений контактных соединений и температуры контактных площадок для исследуемых аппаратов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета технических характеристик коммутационных аппаратов  
Table 2. Results of calculation of technical characteristics of switching devices

Тип аппарата	Ток $I_{\text{ном}}$ , А	Размеры контактов, мм	Температура контактных площадок $\upsilon_k$ , °С	Сопротивление контактных соединений, $R_{\text{кс.расч.}}$ , мОм
Магнитный пускатель ПМЛ	25	$r = 4$	35,6	12,6
	40	$a = 8,1$ $b = 8,1$	35,9	6,34
	63	$a = 12$ $b = 12$	35,7	4,35
Рубильник РЕ19	100	$a = 10$ $b = 16$	36,5	1,98
	250	$a = 20$ $b = 20$	37,4	0,61
	400	$a = 25$ $b = 25$	38,2	0,32
	630	$a = 35$ $b = 35$	37,8	0,22

На рис. 2 представлены графические зависимости температуры контактных площадок  $\upsilon_k$  от коэффициента загрузки  $K_{зг}$  для магнитного пускателя марки ПМЛ с номинальным током 25 А и 40 А.

Графические зависимости (рис. 2) показывают, что температура контактных площадок магнитных пускателей с номинальным током 25 А и 40 А увеличивается незначительно: при коэффициенте загрузки аппарата  $K_{згмп} = 0,5$  температура  $\upsilon_{\text{кмп}} = 35$  °С, при перегрузке аппаратов –  $K_{згмп} = 2,0$  температура  $\upsilon_{\text{кмп}}$  повышается до 38 °С. В расчетном выражении увеличения температуры  $\upsilon_k$  не учитывается влияние элементов установленного в цепи аппарата оборудования. Также в расчете не учитывается длительность протекания тока перегрузки.

Аналогичные зависимости представлены для рубильников РЕ19 (рис. 3).

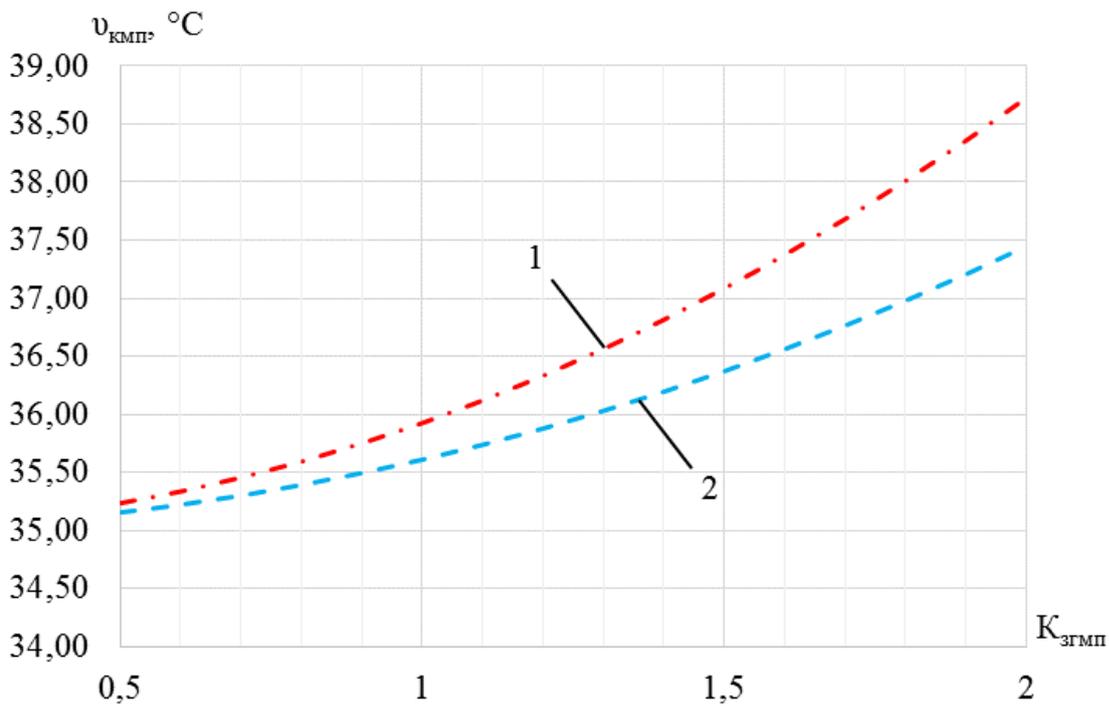


Рис. 2. Графики зависимостей температуры контактных площадок от коэффициента загрузки для магнитного пускателя ПМЛ: 1 –  $I_{ном} = 40$  А; 2 –  $I_{ном} = 25$  А

Fig. 2. Graphs of dependences of contact area temperature on the loading factor for the magnetic starter PML: 1 –  $I_{ном} = 40$  А; 2 –  $I_{ном} = 25$  А

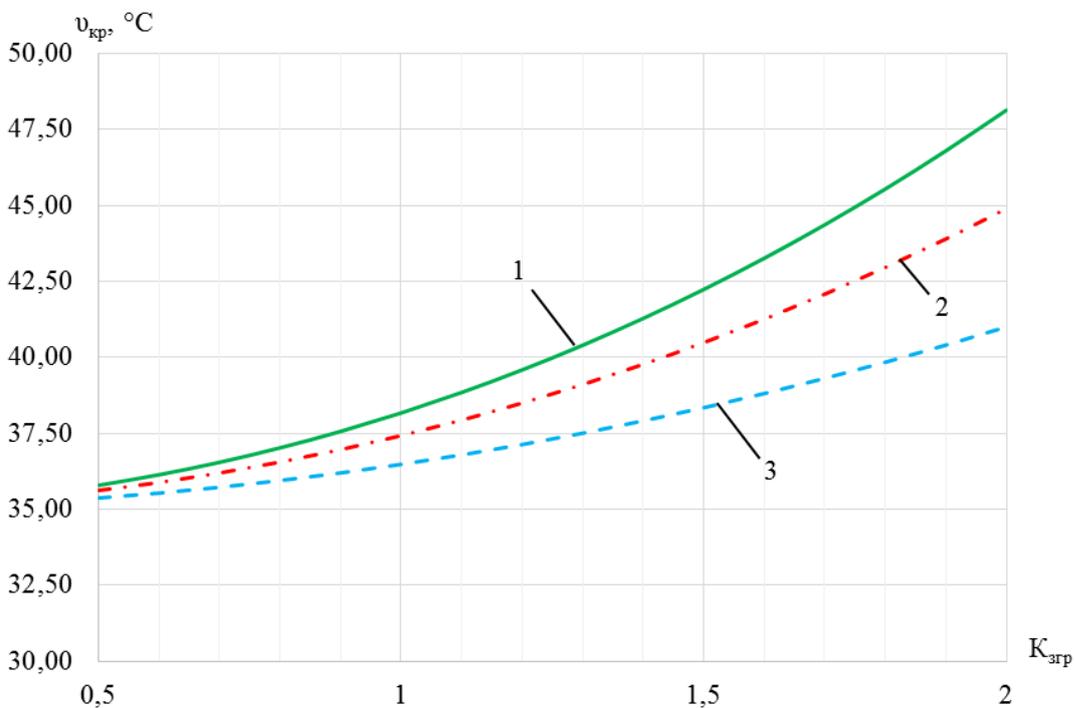


Рис. 3. Графики зависимостей температуры контактных площадок от коэффициента загрузки для рубильника РЕ19: 1 –  $I_{ном} = 400$  А; 2 –  $I_{ном} = 250$  А; 3 –  $I_{ном} = 100$  А

Fig. 3. Graphs of dependences of contact area temperature on the loading factor for the switch RE19: 1 –  $I_{ном} = 400$  А; 2 –  $I_{ном} = 250$  А; 3 –  $I_{ном} = 100$  А

Графические зависимости (рис. 3) показывают, что для рубильника РЕ19 на номинальный ток 100 А температура контактных площадок  $\upsilon_{кр}$  повышается с 36,5 °С при номинальном значении до 41 °С при двукратной перегрузке током аппарата. При номинальном токе 250 А и коэффициенте загрузки рубильника  $K_{згр} = 0,5$  температура  $\upsilon_{кр}$  составила 35,6 °С, при загрузке  $K_{згр} = 2,0$  температура повышается до 45 °С. Расчет температуры  $\upsilon_{кр}$  для рубильника на номинальный ток 400 А показал, что при увеличении загрузки с  $K_{згр} = 1,0$  до  $K_{згр} = 2,0$  значение температуры увеличивается с 38,2 до 48 °С.

Полученные значения температуры нагрева контактных площадок удовлетворяют требованиям ГОСТ 403-73<sup>1</sup>. Максимально допустимая температура контактных соединений из меди для магнитных пускателей и рубильников не должна превышать 95 °С, а допустимое превышение температуры контактов НКА при температуре окружающей среды 40 °С составляет 55 °С.

В результате экспериментальных исследований выявлены зависимости сопротивлений контактов НКА от номинального тока (табл. 3). Погрешность полученных аппроксимирующих функций не превышает 5 % (Грачева и др., 2021).

Таблица 3. Зависимости сопротивлений контактов коммутационных аппаратов от номинального тока  
 Table 3. Dependence of contact resistance of switching devices on rated current

Тип аппарата	Номинальный ток, $I_{ном}$	Аппроксимирующая функция
Магнитный пускатель	$I_{ном} < 70$ А	$R_{кc.эксп.мп} = \frac{825}{I_{ном}}$
	$I_{ном} \geq 70$ А	$R_{кc.эксп.мп} = \frac{760}{I_{ном}}$
Рубильник	для любых $I_{ном}$	$R_{кc.эксп.р} = \frac{68}{I_{ном}}$

Используя данные исследований, проведем сравнительный анализ графических зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока, полученных экспериментально и расчетным способом для рассматриваемых магнитных пускателей и рубильников (рис. 4, 5).

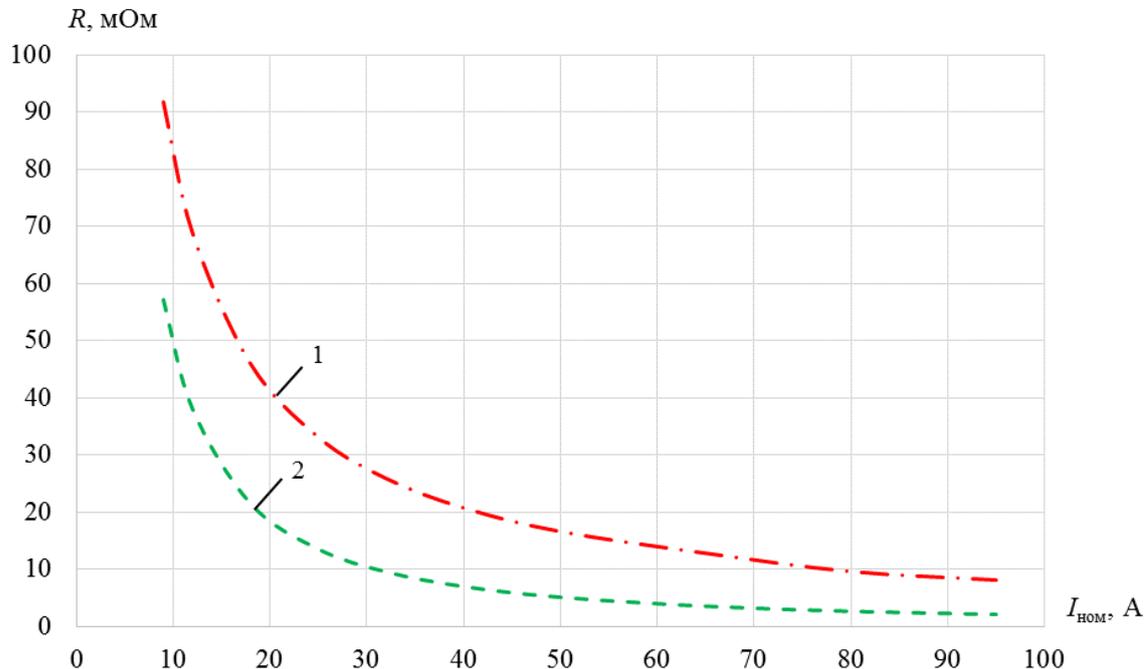


Рис. 4. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для магнитных пускателей ПМЛ: 1 – экспериментальные данные  $R_{кc.эксп.мп}$ ; 2 – расчетные значения  $R_{кc.расч.мп}$

Fig. 4. Graphs of contact resistance dependences on rated current for PML magnetic starters:  
 1 – experimental data  $R_{cc.exp.ms}$ ; 2 – calculated values  $R_{cc.calcul.ms}$

<sup>1</sup> ГОСТ 403-73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов. М., 2003.

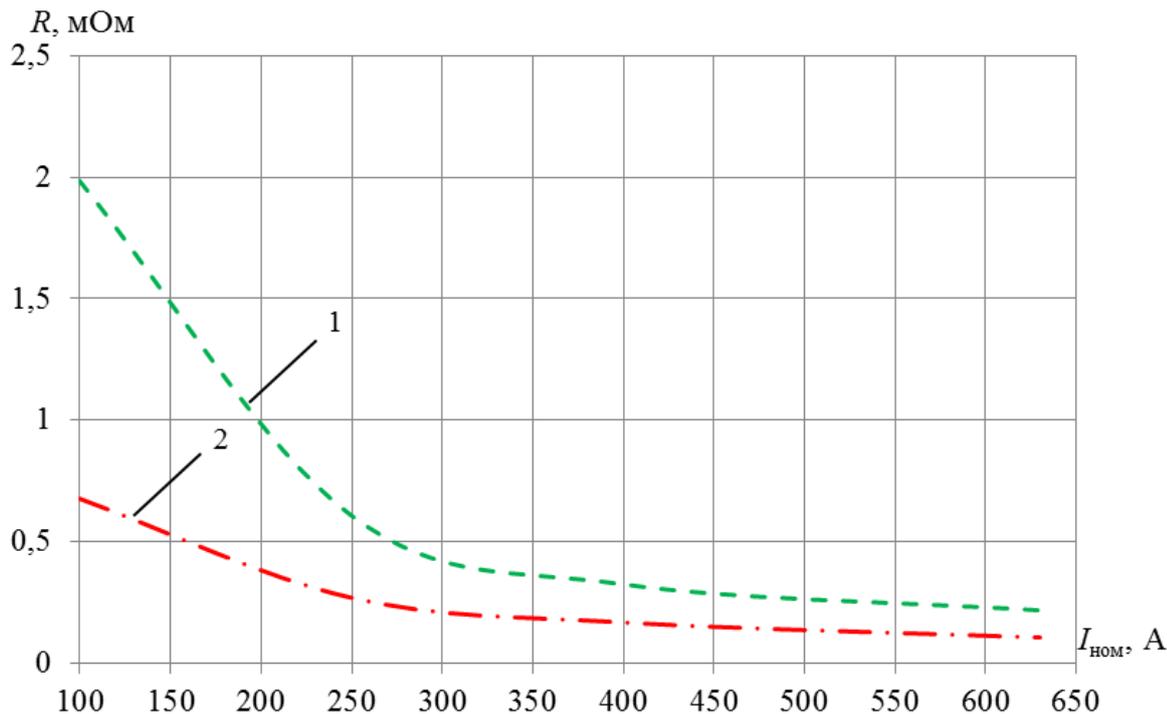


Рис. 5. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для рубильников РЕ19: 1 – расчетные значения  $R_{к.расч.р}$ ; 2 – экспериментальные данные  $R_{к.эксп.р}$

Fig. 5. Graphs of contact resistance dependences on rated current for switches RE19: 1 – calculated values  $R_{cc.calcul.s}$ ; 2 – experimental data  $R_{cc.exp.s}$

Оценим погрешность результатов расчетного метода относительно экспериментально полученных данных

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{R_{к.расч_i} - R_{к.эксп_i}}{R_{к.эксп_i}} \right) \cdot 100 \% \right], \quad (3)$$

где  $n$  – количество измерений.

Для магнитных пускателей марки ПМЛ погрешность

$$\delta = \frac{1}{14} \left[ \left( \frac{101,3 - 141,8}{141,8} \right) + \dots + \left( \frac{2,04 - 8,28}{8,28} \right) \right] \cdot 100 \% = -57,55 \%$$

Для рубильников марки РЕ19 погрешность

$$\delta = \frac{1}{12} \left[ \left( \frac{1,912 - 0,68}{0,68} \right) + \dots + \left( \frac{0,203 - 0,108}{0,108} \right) \right] \cdot 100 \% = 118,94 \%$$

Проведенные исследования и графические зависимости (рис. 4, 5) показывают, что расчетный и экспериментальный способы определения сопротивлений контактных соединений магнитных пускателей ПМЛ и рубильников РЕ19 имеют значительное различие в полученных результатах. При этом наиболее достоверным является экспериментальный метод определения сопротивлений контактных соединений. Для магнитных пускателей погрешность расчетного метода составляет  $-57,55 \%$ , для рубильников средняя погрешность –  $118,94 \%$ . Поэтому расчетный метод не может быть рекомендован для достоверных оценок технических параметров исследуемых аппаратов.

Зависимости изменения сопротивления контактов и контактных соединений могут быть рекомендованы для прогнозирования технического состояния электрооборудования внутризаводского электроснабжения и уточнения величины потерь электроэнергии в низковольтных сетях.

### Заключение

В результате проведенных исследований получены расчетные зависимости оценки температуры контактных площадок магнитных пускателей и рубильников от значения коэффициента загрузки аппарата. Разработаны модели расчетных и экспериментальных зависимостей сопротивлений контактных соединений

магнитных пускателей и рубильников от величины номинального тока. Аппроксимирующие функции (табл. 4) позволяют оценивать значения сопротивлений контактов и контактных соединений НКА.

Таблица 4. Аппроксимирующие функции зависимостей сопротивлений контактов и контактных соединений коммутационных аппаратов от номинального тока

Table 4. Approximating functions of dependences of resistance of contacts and contact connections of switching devices on rated current

Тип аппарата	Номинальный ток $I_{ном}$ , А	Аппроксимирующая функция
Магнитный пускатель ПМЛ	6–630	$R_{кc.расч.мп} = 1276,2 \cdot I_{ном}^{-1,414}$
		$R_{кc.эксп.мп} = 894,51 \cdot I_{ном}^{-1,028}$
Рубильник РЕ19	100–1 600	$R_{кc.расч.р} = 521,9 \cdot I_{ном}^{-1,218}$
		$R_{кc.эксп.р} = \frac{68}{I_{ном}}$

Выявлены функциональные закономерности изменения значений сопротивлений НКА. Разработанные зависимости могут быть использованы для вычисления значений эквивалентных сопротивлений внутрицеховых сетей электроснабжения при определении величины потерь электроэнергии. Уточнение значений потерь в цеховых сетях позволяет наиболее эффективно планировать мероприятия по энергосбережению, а также осуществлять контроль за техническим состоянием электрооборудования.

На основании проведенных исследований технических характеристик магнитных пускателей и рубильников, устанавливаемых в цеховых сетях, предлагается принимать параметр сопротивления контактов и контактных соединений как один из критериев энергоэффективности НКА. Предлагаемый критерий рекомендуется для выбора наиболее эффективных в эксплуатации типов электрооборудования.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Библиографический список

- Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Альзаккар А., Низамиев М. Ф. [и др.]. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, № 6. С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. EDN: DYCRLP.
- 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. EDN: TVQQNU.
- Аполлонский С. М., Куклев Ю. В. Низковольтные электрические аппараты // Записки Горного института. 2016. Т. 218. С. 251–260. EDN: VXLDQP.
- Буторин В. А., Царев И. Б., Банин Р. В., Шарпилов А. Ю. Время первой проверки состояния контактов магнитного пускателя // Вестник Курганской ГСХА. 2019. № 2(30). С. 58–60. EDN: XIVECH.
- Грачева Е. И., Горлов А. Н., Алимова А. Н., Муханова П. П. Определение законов изменения сопротивления контактных групп электрических аппаратов низкого напряжения. Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 4. С. 350–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360>. EDN: KPMROA.
- Грачева Е. И., Шакурова З. М., Абдуллазянов Р. Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21, № 5. С. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-87-96>. EDN: NTJFZF.
- Грачева Е.И., Алимова А. Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 11–12. С. 81–92. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92>. EDN: YXRTVR.
- Егоров Е. Г., Егоров Г. Е., Луия Н. Ю. Особенности измерения восстанавливающейся электрической прочности в низковольтных контакторах переменного тока // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 78–86. EDN: JSGLUV.
- Егоров Е. Г., Иванова С. П., Луия Н. Ю., Афанасьев А. В. [и др.]. Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания // Электротехника. 2018. № 8. С. 12–15. EDN: UTZVLZ.

- Петров А. Р., Грачева Е. И. Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов // Омский научный вестник. 2023. № 2(186). С. 126–133. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-186-126-133>. EDN: SHFUKK.
- Садыков Р. Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 5–6. С. 98–108. EDN: ZIXFIF.
- Шагидуллин А. В. Эффективность замены низковольтных коммутационных аппаратов на примере промышленного предприятия // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 3–4. С. 89–95. EDN: ZBTJAF.
- Andrușcă M., Adam M., Burlica R., Munteanu A. [et al.]. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). Iasi, Romania, 2016. P. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781317>.
- Călin M. D., Helerea E. Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips // International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). Bucharest, Romania, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756156>.
- Deac C. N., Adam M., Andrușcă M., Dragomir A. Aspects regarding contact resistance measurement // 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.
- Derevyankin P. G., Frolov V. Ya., Gorchakov S. L. Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039012>.
- Gheorghîță C. M., Adam M., Andrușcă M., Munteanu A. [et al.]. About contact resistance of the electrical equipment // International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Romania, 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.
- Gonzalez D., Hopfeld M., Berger F., Schaaf P. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2018. Vol. 8, N 6. P. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.
- Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M. Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2019. Vol. 9, N 1. P. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.
- Kim K., Joo H. W., Bae C. Y., Choi J. [et al.]. 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker // 5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu, Japan, 2019. P. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.
- Lyuminarskaja E. S., Lyuminarsky I. E. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Moscow, Russia, 2018. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.
- Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014). Dresden, Germany, 2014. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.
- Shin D., Golosnoy I. O., Bull T. G., McBride J. W. Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices // 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Xi'an, China, 2017. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.
- Shin D., McBride J. W., Golosnoy I. O. Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices // IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque, NM, USA, 2018. P. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.
- Ye Z., Liu S., Zhao S. Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation // IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI). Changchun, China, 2023. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.

## References

- Abdullazyanov, E. Yu., Gracheva, E. I., Alzakkar, A., Nizamiev, M. F. et al. 2022. Prediction and analysis of power consumption and power loss at industrial facilities. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 24(6), pp. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12>. EDN: DYCRLP. (In Russ.)
- 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. EDN: TVQQNU. (In Russ.)

- Apollonsky, S. M., Kuklev, Y. V. 2016. Low-voltage electrical apparatus. *Journal of Mining Institute*, 218, pp. 251–260. EDN: VXLDQP. (In Russ.)
- Butorin, V. A., Tsarev, I. B., Banin, R. V., Sharpilov, A. Yu. 2019. Time of first check of condition contact magnetic pusher. *Vestnik Kurganskoi GSKhA*, 2(30), pp. 58–60. EDN: XIVECH. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Gorlov, A. N., Alimova, A. N., Mukhanova, P. N. 2021. Resistance change of contact groups of low-voltage electrical apparatus: Determining the laws. *Vestnik of MSTU*, 24(4), pp. 350–360. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360>. EDN: KPMROA. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Shakurova, Z. M., Abdullazyanov, R. E. 2019. A comparative analysis of the most common deterministic methods for the calculation of electricity losses in industrial networks. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 21(5), pp. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-87-96>. EDN: NTJFZF. (In Russ.)
- Gracheva, E. I., Alimova, A. N. 2018. Possible errors of calculations of losses of the electric power on shop industrial networks. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 20(11–12), pp. 81–92. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-81-92>. EDN: YXRTVR. (In Russ.)
- Egorov, E. G., Egorov, G. E., Luiya, N. Yu. 2019. Features of measurement of recoverable electrical strength in low-voltage ac contactors. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, 3, pp. 78–86. EDN: JSGLUV. (In Russ.)
- Egorov, E. G., Ivanova, S. P., Luiya, N. Yu., Afanasiev, A. V. 2018. Investigation of the breaking capacity of the automatic circuit-breakers in the short-circuit mode. *Russian Electrical Engineering*, 8, pp. 12–15. EDN: UTZVLZ. (In Russ.)
- Petrov, A. R., Gracheva, E. I. 2023. Modeling of power losses in contact systems of low-voltage switching devices. *Omsk Scientific Bulletin*, 2(186), pp. 126–133. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2023-186-126-133>. EDN: SHFUKK. (In Russ.)
- Sadykov, R. R. 2017. Evaluation of reliability of low voltage commercial networks of industrial power supply. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 19(5–6), pp. 98–108. EDN: ZIXFIF. (In Russ.)
- Shagidullin, A. V. 2017. The effectiveness of the replacement low-voltage switching devices on the example of industrial enterprise. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 19(3–4), pp. 89–95. EDN: ZBTJAF. (In Russ.)
- Andrușcă, M., Adam, M., Burlica, R., Munteanu, A. et al. 2016. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment. *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. Iasi, Romania, pp. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781317>.
- Călin, M. D., Helerea, E. 2020. Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips. *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. Bucharest, Romania, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756156>.
- Deac, C. N., Adam, M., Andrușcă, M., Dragomir, A. 2019. Aspects regarding contact resistance measurement. *8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Cluj, Romania, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.
- Derevyankin, P. G., Frolov, V. Ya., Gorchakov, S. L. 2020. Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia, pp. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039012>.
- Gheorghiuță, C. M., Adam, M., Andrușcă, M., Munteanu, A. et al. 2017. About contact resistance of the electrical equipment. *International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Romania, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.
- Gonzalez, D., Hopfeld, M., Berger, F., Schaaf, P. 2018. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 8(6), pp. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.
- Hadziefendic, N., Kostic, N., Trifunovic, J., Kostic, M. 2019. Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 9(1), pp. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.
- Kim, K., Joo, H. W., Bae, C. Y., Choi, J. et al. 2019. 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker. *5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*. Kitakyushu, Japan, pp. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.
- Lyuminarskaja, E. S., Lyuminarsky, I. E. 2018. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow, Russia, pp. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.
- Ruempler, C., Zacharias, A., Stammberger, H. 2014. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion. *The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014)*. Dresden, Germany, pp. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.

- Shin, D., Golosnoy, I. O., Bull, T. G., McBride, J. W. 2017. Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices. *4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*. Xi'an, China, pp. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.
- Shin, D., McBride, J. W., Golosnoy, I. O. 2018. Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices. *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Albuquerque, NM, USA, pp. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.
- Ye, Z., Liu, S., Zhao, S. 2023. Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation. *IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. Changchun, China, pp. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.

#### Сведения об авторах

**Петров Алмаз Радикович** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;  
Казанский государственный энергетический университет, аспирант; e-mail: petroval13@mail.ru

**Almaz R. Petrov** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, PhD Student; e-mail: petroval13@mail.ru

**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>

**Станимир Валтчев** – Лиссабон, Португалия; Университет NOVA в Лиссабоне, профессор;  
e-mail: ssv@fct.unl.pt

**S. Valtchev** – Lisbon, Portugal; University NOVA of Lisbon, Professor; e-mail: ssv@fct.unl.pt