

УДК 621.311

Определение законов изменения сопротивления контактных групп электрических аппаратов низкого напряжения

Е. И. Грачева*, А. Н. Горлов, А. Н. Алимова, П. П. Муханова

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;

e-mail: grachieva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 29.06.2021;

получена после доработки 01.12.2021

Ключевые слова:

электрическое низковольтное оборудование, сопротивление контактных соединений, конструктивные особенности, устройство контактов, прогнозирование технического состояния

Представлены основные российские и зарубежные фирмы-производители низковольтных электрических аппаратов – автоматических выключателей, предохранителей, магнитных пускателей, рубильников и пакетных выключателей. Рассмотрены данные экспериментов определения значений сопротивлений контактных групп низковольтной коммутационной аппаратуры. Исследованы конструктивные особенности аппаратов, определяющие величину сопротивлений силовых цепей низковольтной аппаратуры и предложена классификация в зависимости от элементов конструкции аппаратов. Представлен методический подход и алгоритм экспериментов и детального анализа контактных групп аппаратов. Предложены экспериментальные схемы для исследования контактных групп. Показаны данные проведенных экспериментов исследования контактных групп и величины сопротивления в функции протекающих токов. При проведении экспериментов выявлено, что значение сопротивления контактов изменяется в зависимости от значения, типа и времени воздействия тока в пределах $\pm 5\%$. Определены законы, характеризующие соотношения значений сопротивления конструктивных составляющих аппаратов – контактных систем, теплового реле, катушки максимального реле. Получены эмпирические выражения и графические зависимости сопротивлений контактов и контактных систем в функции величины номинальных токов низковольтной контактной аппаратуры. Определен минимальный объем выборки количества аппаратов при проведении экспериментальных исследований, достаточный для вычисления математического ожидания сопротивлений контактных соединений аппаратов с заданной точностью. В результате экспериментально проведенных исследований выявлено, что величина сопротивления контактов и контактных соединений может возрастать в процессе эксплуатации в 2–2,5 раза. Установленные зависимости изменения сопротивления контактов могут быть использованы для прогнозирования технического состояния электроустановок внутрицеховых низковольтных сетей, уточнения величины потерь электроэнергии в цеховых сетях до 1 кВ, а также могут применяться в качестве дополнительного регламента для технического обслуживания и плановых предупредительных ремонтов.

Для цитирования

Грачева Е. И. и др. 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>.

Resistance change of contact groups of low-voltage electrical apparatus: Determining the laws

Elena I. Gracheva*, Aleksey N. Gorlov, Alsu N. Alimova, Polina P. Mukhanova

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;

e-mail: grachieva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Article info

Abstract

Received 29.06.2021;

received in revised form 01.12.2021

Key words:

electrical low-voltage equipment, resistance of contact joints, design features, device contacts, forecasting of technical condition

The main Russian and foreign manufacturers of low-voltage electrical devices – circuit breakers, fuses, magnetic starters, knife switches and packet switches are presented. The data of experiments for determining the resistance values of contact groups of low-voltage switching equipment are considered. The design features of the devices that determine the value of the resistances of the power circuits of low-voltage equipment are investigated and a classification is proposed depending on the design elements of the devices. A methodological approach and an algorithm for experiments and detailed analysis of the contact groups of devices are given. Experimental schemes for the study of contact groups are proposed. The data of the conducted experiments on the study of contact groups and the resistance values as a function of the flowing currents are shown. During the experiments it is revealed that the value of the resistance of the contacts changes depending on the value, type and time of exposure to current within $\pm 5\%$. The laws that characterize the ratio of the resistance values of the structural components of devices (contact systems, thermal relay, coil of the maximum relay) have been revealed and defined. Empirical expressions and graphical dependences of the resistances of contacts and contact systems are obtained as a function of the magnitude of the rated currents of low-voltage contact equipment. The minimum sample size of the number of devices during experimental research is determined, sufficient to calculate the mathematical expectation of the resistances of the contact connections of the devices with a given accuracy. As a result of experimental studies, it is revealed that the resistance value of contacts and contact joints can increase during operation by 2–2.5 times. The established dependences of the change in contact resistance can be used to predict the technical state of electrical installations of intrashop low-voltage networks, to clarify the amount of electricity losses in shop networks up to 1 kV, and can also be used as an additional regulation for maintenance and scheduled preventive maintenance.

For citation

Gracheva, E. I. et al. 2021. Resistance change of contact groups of low-voltage electrical apparatus: Determining the laws. *Vestnik of MSTU*, 24(4), pp. 350–360. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-350-360>.

Введение

Для современных условий развития электротехнической промышленности характерным является увеличение номенклатуры выпускаемых электрических аппаратов низкого напряжения. В России низковольтная аппаратура выпускается такими заводами-изготовителями, как Курский электроаппаратный завод (КЭАЗ), Кашинский завод электроаппаратуры (КЗЭА), ИЕК, ЕКФ. Зарубежными производителями аппаратуры низкого напряжения являются фирмы Schneider Electric, ABB, Legrand, SIEMENS и др. Обобщенные данные по группам производителей указаны в табл. 1.

Таблица 1. Виды и производители низковольтных аппаратов
 Table 1. Types and manufacturers of low-voltage devices

Вид	Производители
Автоматический выключатель	КЭАЗ, ИЕК, ЕКФ, Schneider Electric, ABB, Legrand, SIEMENS
Предохранитель	КЭАЗ, КЗЭА, ИЕК, ЕКФ, Schneider Electric, ABB, Legrand, SIEMENS
Магнитный пускатель	КЭАЗ, КЗЭА, ИЕК, ЕКФ, Schneider Electric, ABB, Legrand, SIEMENS
Рубильник	КЭАЗ, ИЕК, ЕКФ, Schneider Electric, ABB, Legrand, SIEMENS
Пакетный выключатель	ЕКФ, Электротехник

Активно ведется создание фирм-производителей контактных аппаратов как в Российской Федерации, так и за рубежом. Разрабатываются новые конструкции аппаратов с дополнительными функциональными возможностями. В настоящее время заводы-изготовители контактных аппаратов в каталогах и прайсах, как правило, не предоставляют все технические параметры оборудования. Характеристика величины сопротивлений контактных систем в каталогах не приводится. Один из способов получения данных о величине сопротивлений контактов – метод амперметра-вольтметра (*Муханов и др., 2015; Федотов и др., 2013; Колодяжный, 2016*), согласно которому по контактам при их включении пропускается постоянный или выпрямленный ток и измеряется значение падения напряжения.

Целью работы является исследование, анализ и оценка величины сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых на линиях цеховых сетей. Полученные в результате экспериментальных и теоретических исследований данные позволяют повысить достоверность определения эквивалентных сопротивлений цеховых сетей и, следовательно, уточнить значение потерь электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения.

Материалы и методы

Для определения метода экспериментальных исследований сопротивлений контактов силовых цепей низковольтных аппаратов проведен анализ влияния типа и времени воздействия протекающего через контакты тока. На рис. 1 представлена схема, позволяющая при проведении измерений и подключении аппарата через его контакты пропускать переменный ток значительной величины за существенный промежуток времени. На рис. 2 показана схема, позволяющая пропускать через контакты исследуемого аппарата выпрямленный ток величиной 7–8 А. Экспериментальные исследования сопротивления контактов с использованием схем (рис. 1 и 2) проведены на низковольтных электрических аппаратах фирм КЭАЗ, КЗЭА и ЕКФ.

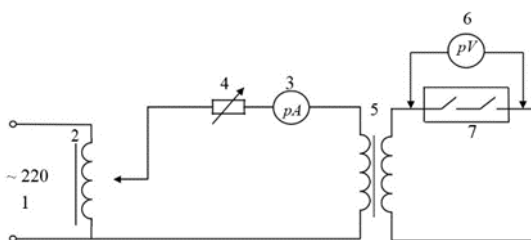


Рис. 1. Экспериментальная схема для исследования сопротивления контактных систем при питании от сети переменного тока: 1 – источник питания; 2 – линейный автотрансформатор; 3 – амперметр Э47; 4 – регулировочный резистор; 5 – трансформатор тока ТТ-УТТ-6М; 6 – электронный вольтметр VD-723; 7 – контактный аппарат для измерения сопротивления контактных систем

Fig. 1. Experimental circuit for studying the resistance of contact systems when powered from an alternating current network: 1 – power supply; 2 – linear autotransformer; 3 – E47 ammeter; 4 – adjusting resistor; 5 – TT-UTT-6M current transformer; 6 – VD-723 electronic voltmeter; 7 – contact device for measuring the resistance of contact systems

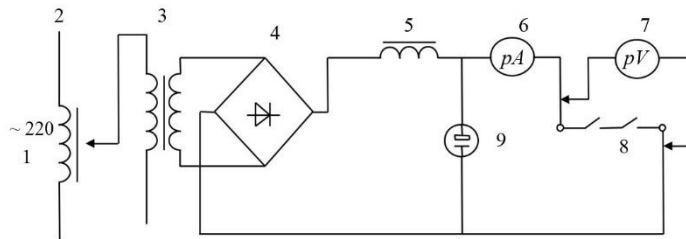


Рис. 2. Экспериментальная схема для исследования сопротивления контактных систем при питании от выпрямленного тока: 1 – источник переменного тока; 2 – автотрансформатор линейный; 3 – трансформатор; 4 – выпрямительный элемент 4AV5125; 5 – дроссель 4AV4101 (индуктивность); 6 – амперметр Э47; 7 – вольтметр VD-723; 8 – контактный аппарат для измерения сопротивления контактных систем; 9 – емкостный элемент

Fig. 2. Experimental circuit for studying the resistance of contact systems when powered from a DC source: 1 – AC source; 2 – linear autotransformer; 3 – transformer; 4 – 4AV5125 rectifier element; 5 – 4AV4101 choke (inductance); 6 – E47 ammeter; 7 – VD-723 voltmeter; 8 – contact device for measuring the resistance of contact systems; 9 – capacitive element

Таблица 2. Экспериментальные данные измеренных значений сопротивлений контактов, мОм
Table 2. Experimental data of measured values of contact resistances, mΩ

Тип и марка аппарата	Воздействие постоянного тока 7–8А	Воздействие переменного тока					
		Номинальный ток, А			0,5I _{ном} , А		
		Длительность воздействия тока, мин					
		0	7	15	0	7	15
Магнитный пускатель ПМЛ-1220Д I _н = 16А	52,3	52,4	52,1	52,6	52,2	52,3	52,6
Контактор КМ-103 I _н = 25А	12,6	12,2	12,5	12,8	12,5	12,6	12,9
Автомат ВА47-063Про I _н = 25А	12,5	12,3	12,6	12,7	12,1	12,5	12,6
Пакетный выключатель ПВ 3-63 I _н = 63А	1,2	1,0	0,9	1,4	0,8	1,0	1,5
Рубильник ТВ-80-3Р-F I _н = 80А	0,93	0,95	0,96	0,92	0,91	0,94	0,95
Предохранитель ПН2-100 I _н = 100А	2,3	2,4	2,3	2,4	2,2	2,1	2,3

Данные измерений по экспериментальным схемам (рис. 1 и 2) представлены в табл. 2. Результаты исследований показывают хорошую сходимость и соответствие измеренных сопротивлений контактов при протекании переменного и постоянного токов. При этом установлено, что величина, род воздействующего тока и его временной интервал соответствуют разбросу параметров +/-10 %, поэтому целесообразным является применение схемы с использованием постоянного тока для измерения величины сопротивлений контактных групп аппаратов.

Результаты и обсуждение

Полученные экспериментальные данные измерений сопротивлений контактных групп показаны на рис. 3–8.

При этом выявлено, что величина сопротивления контактной цепи состоит из:

- сопротивления контактной группы;
- сопротивления теплового реле;
- сопротивления катушки максимального реле.

Сопротивление болтового присоединения аппаратов кабелями является незначительным в общем сопротивлении контактной цепи.

Номер точки измерения в конструкции пускателя	Сопротивление контактного соединения пускателя $R_{\text{КМП}}$, мОм	0 I II III IV V
I	1,5	
II	22,1	
III	33,2	
IV	50,5	
V	52,3	

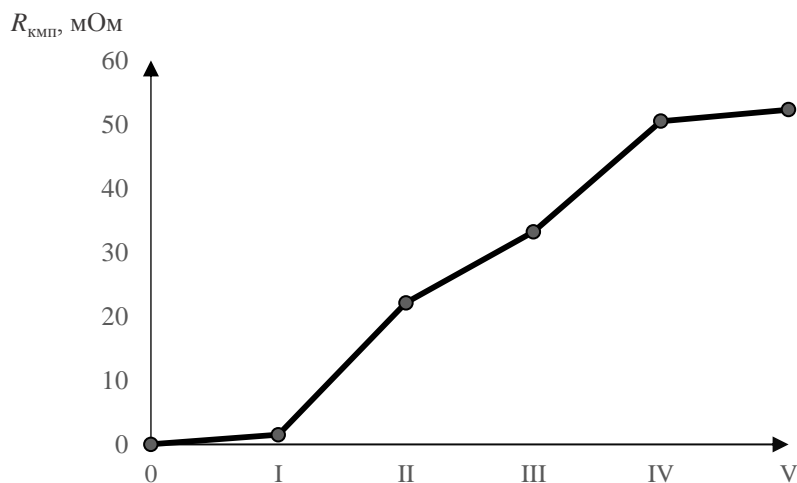


Рис. 3. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений пускателя электромагнитного ПМЛ-1220Д с номинальным током 16А с учетом элементов конструкции,
 Fig. 3. Experimental resistances of contact connections of the PML-1220D electromagnetic starter with $I_{\text{ном}} = 16\text{A}$ taking into account structural elements

Номер точки измерения в конструкции контактора	Сопротивление контактного соединения контактора $R_{\text{КК}}$, мОм	0 I II III
I	1,0–1,3	
II	11,2	
III	12,6	

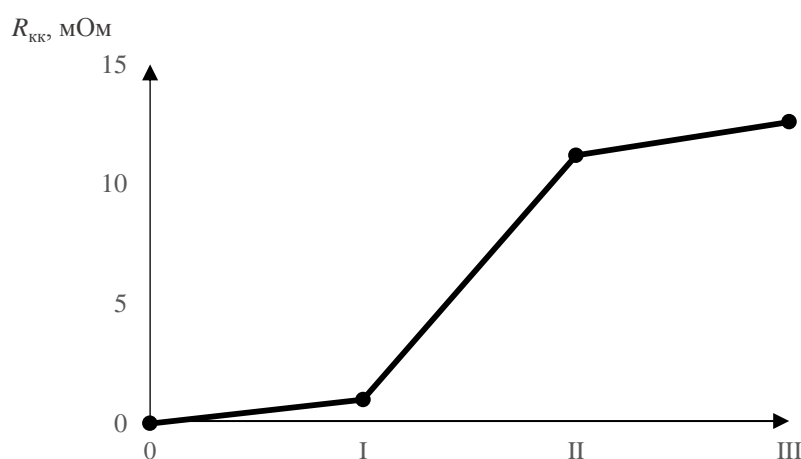


Рис. 4. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений контактора КМ-103 с номинальным током 25А с учетом элементов конструкции
 Fig. 4. Experimental resistances of contact connections of the KM-103 contactor with $I_{\text{ном}} = 25\text{A}$ taking into account structural elements

Номер точки измерения в конструкции автомата	Сопротивление контактного соединения автомата $R_{КА}$, мОм	0	I	II	III	IV	V
I	1,3						
II	4,0						
III	7,5						
IV	11,1						
V	12,5						

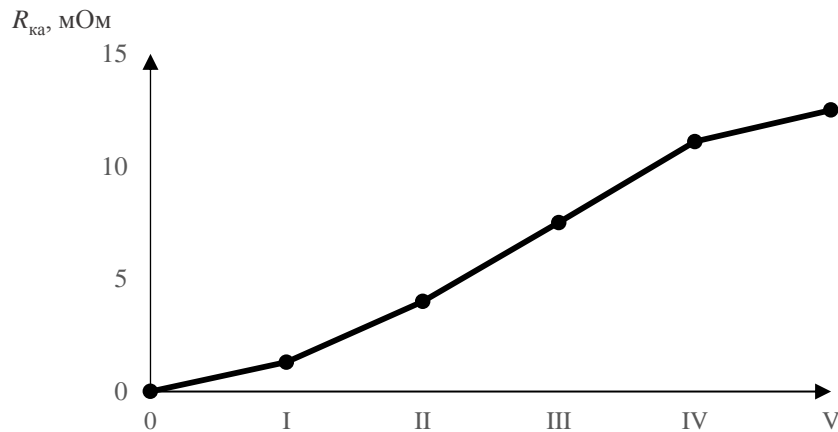


Рис. 5. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений автомата ВА47-063Про с номинальным током 25А с учетом элементов конструкции

Fig. 5. Experimental resistances of contact connections of the VA47-063Pro automatic circuit breaker with $I_{nom} = 25A$ taking into account structural elements

Номер точки измерения в конструкции пакетного выключателя	Сопротивление контактного соединения пакетного выключателя $R_{КПВ}$, мОм	0	I	II	III	
I	0,1					
II	0,85					
III	0,94					

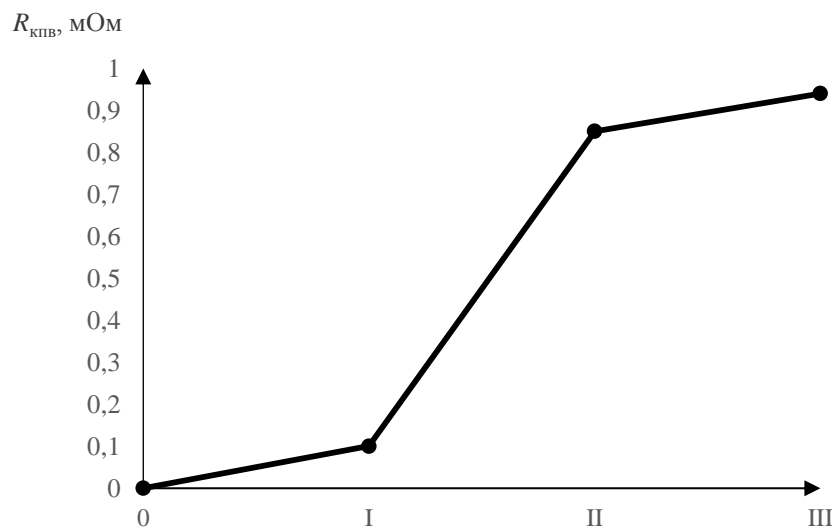


Рис. 6. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений пакетного выключателя ПВ 3-63 с номинальным током 63А с учетом элементов конструкции

Fig. 6. Experimental resistances of contact connections of the PV 3-63 packet switch with $I_{nom} = 63A$ taking into account structural elements

Номер точки измерения в конструкции рубильника	Сопротивление контактного соединения рубильника $R_{кр}$, мОм	0 I II III IV V
I	0,1	
II	0,3	
III	0,6	
IV	0,85	
V	0,95	

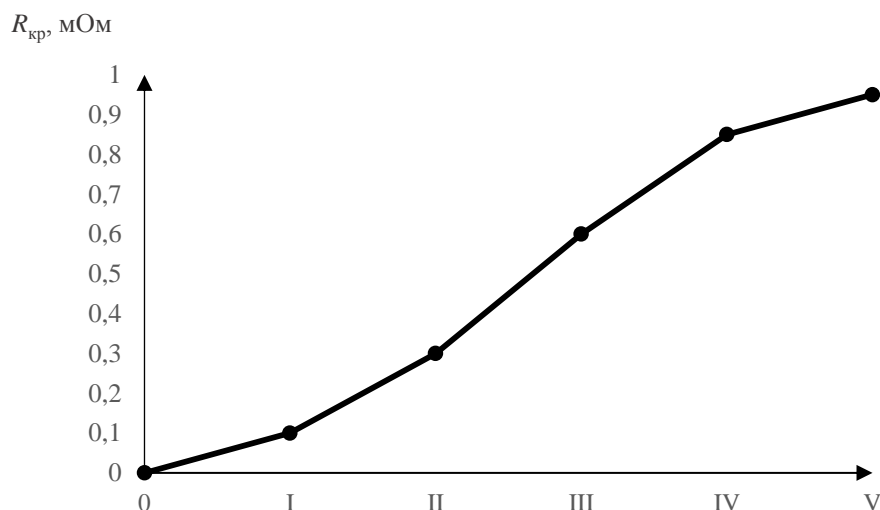


Рис. 7. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений рубильника ТВ-80-3Р-Ф с номинальным током 80А с учетом элементов конструкции
 Fig. 7. Experimental resistances of contact connections of the TB-80-3P-F contact switch with $I_{ном} = 80A$ taking into account structural elements

Номер точки измерения в конструкции предохранителя	Сопротивление контактного соединения предохранителя $R_{кп}$, мОм	0 I II III IV V
I	0,22	
II	0,51	
III	2,1	
IV	2,2	
V	2,3	

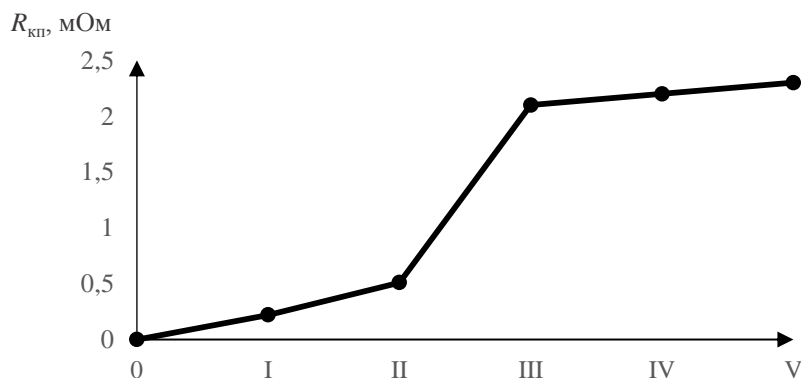


Рис. 8. Экспериментальные данные сопротивлений контактных соединений предохранителя ПН2-100 с номинальным током 100А с учетом элементов конструкции
 Fig. 8. Experimental resistances of contact connections of the PN2-100 cutout with $I_{ном} = 100A$ taking into account structural elements

Неполнота информации о технических характеристиках низковольтных коммутационных аппаратов, представляемая заводами-изготовителями в каталожных и паспортных данных, делает актуальными исследования по измерениям и детальному анализу закономерностей изменяющихся параметров (сопротивлений контактных систем) с учетом элементов конструкции аппаратов. При этом возникает необходимость в разработке методических подходов для теоретических и экспериментальных исследований¹ (Родионов, 2019; Федоров и др., 2015; Хорольский и др., 2017; Назарычев и др., 2016; Ионцева и др., 2015).

При проведении экспериментов замеры сопротивлений в фазах аппарата проводились по 4–5 раз и усреднялись, чтобы получить среднее значение сопротивления по фазам. При исследовании магнитных пускателей замеры сопротивлений проводились для двух фаз с определением усредненного значения, а также измерялось сопротивление для фазы с отсутствием тепловых реле.

По полученным данным измерений установлено, что величина протекающего тока оказывает несущественное влияние на сопротивление контактных систем.

Рис. 9 и 10 иллюстрируют графические зависимости величины сопротивления контактных систем в функции значений номинальных токов аппаратов (Федотов и др., 2013).

В результате проведенных исследований вычислено минимальное количество выборки аппаратов для определения закона распределения сопротивлений контактных систем с использованием и анализом данных автомата ВА47-063Про (номинальный ток 25А).

Полученные данные измерений показали, что величина сопротивления контактов и контактных соединений может возрасти в процессе эксплуатации в 2–2,5 раза. Установленные зависимости изменения сопротивления контактов могут быть использованы для прогнозирования технического состояния электроустановок внутрицеховых низковольтных сетей, уточнения величины потерь электроэнергии в цеховых сетях до 1 кВ, а также могут применяться в качестве дополнительного регламента для технического обслуживания (Safin et al., 2019a,b; Feizifar et al., 2019; Ahmed et al., 2014; Ling et al., 2015; Ahonen et al., 2016; Tsvetkov et al., 2019).

Минимально необходимую выборку для расчета математического ожидания сопротивлений контактных систем с требуемой точностью δ , % и вероятностью p можно вычислить по формуле

$$v = \left(\frac{\tau \cdot \gamma_x \cdot 100}{\delta} \right)^2, \quad (1)$$

где τ – характеристика в зависимости от принятого p (если $p = 0,95$, то $\tau = 2$); γ_x – вариация значения x , p – вероятность определения искомой величины (сопротивление контактов) с требуемой точностью, равной 95 %;

$$\gamma_x = \frac{\sigma_x}{M_x}, \quad (2)$$

где σ_x – среднее квадратическое отклонение; M_x – математическое ожидание x .

Проверим достоверность результатов измерений сопротивления контактных систем аппаратов по минимальному количеству испытаний при принятой вероятности 95 % и погрешности расчетов менее 5 %.

В этом случае математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение величины сопротивления контактной системы автомата составят: $M[R] = 14,2$ мОм, $\sigma[R] = 2,1$ мОм, откуда $b[\Delta R] = 0,15$.

$$v = \left(\frac{2 \cdot 0,15 \cdot 100}{5} \right)^2 = 6. \quad (3)$$

Таким образом, установлено, что для получения достоверных результатов требуется провести 6 измерений для данного типа аппаратов, количество измерительных испытаний при этом проведено более 30.

¹ ГОСТ ИЕС 60050-441-2015. Международный электротехнический словарь. Часть 441. Аппаратура коммутационная, аппаратура управления и плавкие предохранители. М., 2020. 32 с.; ГОСТ Р 50030.4.1-2012 (МЭК 60947-4-1:2009). Аппаратура распределения и управления низковольтная. Часть 4. Контактные и пускатели. Раздел 1. Электромеханические контакторы и пускатели. М., 2013. 93 с.

Заключение

На основании анализа полученных экспериментальных результатов, используя метод наименьших квадратов, можно получить функциональные зависимости сопротивлений контактных систем аппаратов от величины номинальных токов (рис. 9, 10, табл. 3).

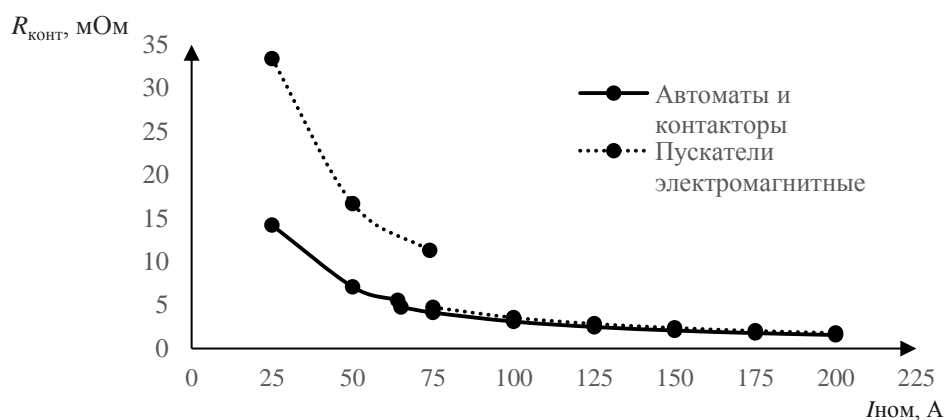


Рис. 9. Функциональные зависимости сопротивлений контактных систем электромагнитных пускателей, контакторов, автоматов от величины номинальных токов
 Fig. 9. Functional dependences of contact systems resistances of electromagnetic contactors, starters, and automatic circuit breakers on the value of rated currents

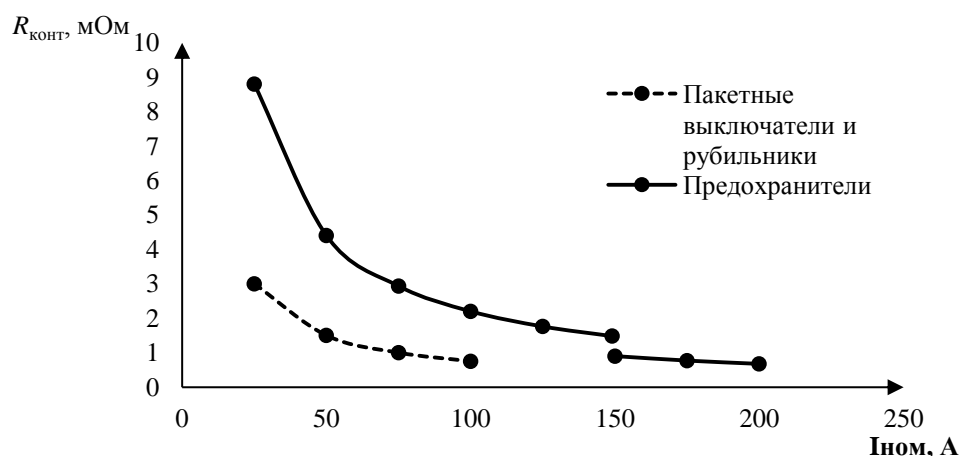


Рис. 10. Функциональные зависимости сопротивлений контактных систем предохранителей, пакетных выключателей и рубильников от величины номинальных токов
 Fig. 10. Functional dependences of contact systems resistances of cutouts, packet switches, and contact switches on the value of rated currents

Таблица 3. Функциональные зависимости сопротивлений контактных систем низковольтных коммутационных аппаратов от величины номинальных токов
 Table 3. Functional dependences of contact systems resistances of low-voltage switching devices on the value of rated currents

Тип аппарата	Диапазон изменения величины номинальных токов, $I_{ном}, А$	Функциональные зависимости сопротивлений контактных систем аппаратов от величины номинальных токов
Контакторы и автоматы	< 65	$R_{ка} = 355/I_{ном}$
	≥ 65	$R_{ка} = 310/I_{ном}$
Пускатели электромагнитные	< 75	$R_{ка} = 835/I_{ном}$
	≥ 75	$R_{ка} = 355/I_{ном}$
Пакетные выключатели и рубильники	$0 \leq I_{ном} \leq 100$	$R_{ка} = 75/I_{ном}$
Предохранители	< 150	$R_{ка} = 220/I_{ном}$
	≥ 150	$R_{ка} = 135/I_{ном}$

На основании теоретических положений и практических исследований получена новая информация о функциональных закономерностях технических характеристик электрических аппаратов низкого напряжения.

1. Для существующих конструкций низковольтной аппаратуры с учетом основных параметров конструкции предлагается следующая классификация:

1) аппаратура, включающая как силовые контактные группы в силовых цепях, так и реле – тепловые и максимальные (автоматы, контакторы и пускатели электромагнитные);

2) аппаратура, содержащая в силовых цепях только переходные сопротивления (пакетные выключатели и рубильники);

3) аппаратура с относительно значительной величиной сопротивлений силовых цепей (предохранители).

2. Выявлены зависимости и получены экспериментально подтвержденные функциональные закономерности изменения значений сопротивления конструктивных частей контактных систем. На основании анализа экспериментальных зависимостей (рис. 3–8) установлено, что значение сопротивления болтового присоединения, подключающего аппарат кабельной линией или проводом, включает в себя примерно 3–20 % от суммарной величины сопротивления контактной системы.

3. По результатам экспериментов предложены приближенные зависимости сопротивлений контактов и контактных соединений электрических аппаратов низкого напряжения в функции от номинального тока (табл. 3 и графики на рис. 9 и 10).

Благодарности

Публикация выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, проект № 0851-2020-0032 "Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Ионцева О. А., Анчарова Т. В. Проектирование и эксплуатация внутриводских низковольтных сетей промышленных предприятий // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. № 6. С. 45–50.
- Колодяжный В. В. Возможности современных автоматических выключателей // *Энергетические установки и технологии*. 2016. Т. 2, № 1. С. 43–49.
- Муханов А. В., Муханов В. В. Исследование автоматических выключателей с тепловым расцепителем и расцепителем максимального тока // *Строительство и архитектура-2015. Градостроительство и планирование территориального развития: материалы междунар. студ. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 26–27 ноября 2015 г. Ростов-на-Дону : РИСИ, 2015. С. 51–52.*
- Назарычев А. Н., Новомлинский Э. В., Андреев Д. А. Оценка технического состояния электрооборудования на основе расчетов интегральных показателей // *Материалы Междунар. науч. семинара им. Ю. Н. Руденко. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики*. 2016. С. 171–179.
- Родионов И. В. Исследование моделей автоматических выключателей при реализации различных схем автоматического ввода резерва // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (14–15 марта 2019 г., Москва) : тез. докл. М. : ООО «Центр полиграфических услуг "Радуга"», 2019. С. 366.*
- Федоров О. В., Сарваров А. С., Петушков М. Ю. Электромагнитная совместимость пусковых устройств для электроприводов переменного тока с питающей сетью // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. 2015. № 4. С. 18–21.
- Федотов А. И., Грачева Е. И., Наумов О. В. Оценка сопротивлений контактных соединений коммутационной аппаратуры на основе статистической информации // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2013. № 1–2. С. 45–56.
- Хорольский В. Я., Таранов М. А. Надежность электроснабжения. Ростов-на-Дону : Терра Принт, 2017. 145 с.
- Ahmed A., Rashid A., Iqbal S. Analysis of weather forecasting model in PRISM // *12th International Conference on Frontiers of Information Technology. IEEE, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/fit.2014.73>*.
- Ahonen T., Orozco S. M., Ahola J., Tolvanen J. Effect of electric motor efficiency and sizing on the energy efficiency in pumping systems // *18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*. IEEE, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/epe.2016.7695671>.
- Feizifar B., Usta Ö. A new failure protection algorithm for circuit breakers using the power loss of switching arc incidents // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2019. Vol. 27, Iss. 3. P. 1982–1997. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.

- Ling W, Liu D. A distributed fault localization, isolation and supply restoration algorithm based on local topology // *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2015. Vol. 25, Iss. 7. P. 1113–1129. DOI: <https://doi.org/10.1002/etep.1859>.
- Safin A. R., Ivshin I. V., Petrov T. I. The method for calculation and optimization of parameters of synchronous electric machines with permanent magnets as part of the generating and driving complexes // *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*. E3S Web of Conferences, 2019a. Vol. 124. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405004>.
- Safin A. R., Khusnutdinov R. R., Kopylov A. M. The method of topological optimization for design linear electric machines // *International Science and Technology Conference "EastConf" : Proceedings of a meeting held 1–2 March 2019, Vladivostok, Russia*. IEEE, 2019b. P. 134–139.
- Tsvetkov A. N., Safin A. R., Ivshin I. V., Petrov T. I. [et al.]. Development of a control station for oil pumping machines based on permanent magnet synchronous motors // *Journal of Physics: Conference Series*. International Conference on Physics and Photonics Processes in Nano Sciences 20–22 June 2019, Eluru, India. 2019. Vol. 1362. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1362/1/012160>.

References

- Iontseva, O. A., Ancharova, T. V. 2015. Design and operation of in-plant low-voltage networks of industrial enterprises. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 6, pp. 45–50. (In Russ.)
- Kolodyazhny, V. V. 2016. Possibilities of modern automatic switches. *Energeticheskiye ustanovki i tekhnologii*, 2(1), pp. 43–49. (In Russ.)
- Mukhanov, A. V., Mukhanov, V. V. 2015. Investigation of circuit breakers with a thermal release and an overcurrent release. Proceedings of Intern. conf. *Construction and architecture – 2015. Urban planning and territorial development planning*, 26–27 November, 2015. Rostov-on-Don, pp. 51–52. (In Russ.)
- Nazarychev, A. N., Novomlinsky, E. V., Andreev, D. A. 2016. Assessment of the technical condition of electrical equipment based on the calculation of integral indicators. Proceedings of Intern. conf. named after Yu. N. Rudenko. Methodological issues in the study of the reliability of large energy systems, pp. 171–179. (In Russ.)
- Rodionov, I. V. 2019. Investigation of models of circuit breakers in the implementation of various schemes for automatic transfer of reserve. Abstract of reports *Radio electronics, electrical engineering and power engineering: XXV Intern. scientific and technical conf.* 14–15 March, Moscow, pp. 366. (In Russ.)
- Fedorov, O. V., Sarvarov, A. S., Petushkov, M. Yu. 2015. Electromagnetic compatibility of starting devices for AC electric drives with a supply network. *Scientific works of Vinnytsia National Technical University*, 4, pp. 18–21. (In Russ.)
- Fedotov, A. I., Gracheva, E. I., Naumov, O. V. 2013. Estimation of resistances of contact connections of switching equipment based on statistical information. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 1–2, pp. 45–56. (In Russ.)
- Khorolsky, V. Ya., Taranov, M. A. 2017. Reliability of power supply. Rostov-on-Don. (In Russ.)
- Ahmed, A., Rashid, A., Iqbal, S. 2014. Analysis of weather forecasting model in PRISM. *12th International Conference on Frontiers of Information Technology*. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/fit.2014.73>.
- Ahonen, T., Orozco, S. M., Ahola, J., Tolvanen, J. 2016. Effect of electric motor efficiency and sizing on the energy efficiency in pumping systems. 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/epe.2016.7695671>.
- Feizifar, B., Usta, Ö. 2019. A new failure protection algorithm for circuit breakers using the power loss of switching arc incidents. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 27(3), pp. 1982–1997. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.
- Ling, W, Liu, D. 2015. A distributed fault localization, isolation and supply restoration algorithm based on local topology. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 25(7), pp. 1113–1129. DOI: <https://doi.org/10.1002/etep.1859>.
- Safin, A. R., Ivshin, I. V., Petrov, T. I. 2019a. The method for calculation and optimization of parameters of synchronous electric machines with permanent magnets as part of the generating and driving complexes. *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*. E3S Web of Conferences, 124. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405004>.
- Safin, A. R., Khusnutdinov, R. R., Kopylov, A. M. 2019b. The method of topological optimization for design linear electric machines. *International Science and Technology Conference "EastConf": Proceedings of a meeting held 1–2 March 2019, Vladivostok, Russia*. IEEE, pp. 134–139.
- Tsvetkov, A. N., Safin, A. R., Ivshin, I. V., Petrov, T. I. et al. 2019. Development of a control station for oil pumping machines based on permanent magnet synchronous motors. *Journal of Physics: Conference Series*. International Conference on Physics and Photonics Processes in Nano Sciences 20–22 June 2019, Eluru, India, 1362. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1362/1/012160>.

Сведения об авторах

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

Горлов Алексей Николаевич – ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, 305040; Юго-Западный государственный университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: alexjulia17@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-6162>

Aleksey N. Gorlov – 94, 50 years of October Str., Kursk, 305040; Southwestern State University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: alexjulia17@yandex.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-6162>

Алимова Алсу Нюрхайдаровна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, магистрант; e-mail: aan-678@rambler.ru

Alsu N. Alimova – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Master's Student; e-mail: aan-678@rambler.ru

Муханова Полина Петровна – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;
Казанский государственный энергетический университет, магистрант; e-mail: muhanova-polina@mail.ru

Polina P. Mukhanova – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Master's Student; e-mail: muhanova-polina@mail.ru