



ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Абдуллазянов¹ Э.Ю., Грачева¹ Е.И., Горлов² А.Н., Шакурова¹ З.М., Табачникова³ Т.В., Шумихина¹ О.А., Гибадуллин Р.Р.¹

¹Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия

²Юго-Западный Государственный Университет, г. Курск, Россия

³Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия

epp.kgeu@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследовать проблему оценки энергоэффективной эксплуатации низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в электротехнических комплексах, проанализировать современное состояние российского рынка электрических аппаратов и разработать алгоритм и модели основных технических характеристик автоматических выключателей пускателей электромагнитных и контакторов различных заводов-изготовителей. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи исследовано соотношение величины номинального тока аппарата и сопротивления контактов и контактных соединений аппаратов некоторых заводов-производителей. Анализ экспериментальных данных показал, какой вид имеют функциональные зависимости сопротивлений контактов от номинального тока. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработаны аппроксимирующие функции по результатам экспериментальных исследований величины сопротивлений контактов от основных номинальных параметров автоматов, пускателей электромагнитных и контакторов некоторых заводов-изготовителей. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В статье разработаны алгоритм и модели оценки энергоэффективности эксплуатации низковольтных электрических аппаратов, позволяющие уточнять величину потерь мощности (электроэнергии) в оборудовании и рекомендуемые для повышения достоверности расчета потерь электроэнергии в низковольтных сетях электротехнических комплексов.

Ключевые слова: *электрические аппараты; энергоэффективность; потери мощности; сопротивление контактов; аппроксимирующие функции; электротехнические комплексы;*

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».*

Для цитирования: Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В., Шумихина О.А., Гибадуллин Р.Р. Исследование качества функционирования электрических аппаратов низкого напряжения в составе электротехнических комплексов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15.

RESEARCH OF THE QUALITY OF FUNCTIONING OF LOW-VOLTAGE ELECTRIC DEVICES AS A PART OF ELECTRICAL COMPLEXES

EY. Abdullazyanov¹, EI. Gracheva¹, AN. Gorlov², ZM. Shakurova¹,
TV. Tabachnikova³, OA. Shumikhina¹, RR. Gibadullin¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

³Almetyevsky State Oil Institute

epp.kgeu@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. To investigate the problem of evaluating the energy-efficient operation of low-voltage switching devices installed in electrical complexes, to analyze the current state of the Russian market of electrical devices and to develop an algorithm and models of the main technical characteristics of circuit breakers of electromagnetic starters and contactors of various manufacturers. **METHODS.** In solving this problem, the ratio of the nominal current of the device and the resistance of contacts and contact connections of devices of some manufacturing plants is investigated. The analysis of experimental data showed what kind of functional dependences of contact resistances on the rated current have. **RESULTS.** Approximating functions have been developed based on the results of experimental studies of the value of contact resistances from the main nominal parameters of automatic machines, electromagnetic starters and contactors of some manufacturers. **CONCLUSION.** The article develops an algorithm and models for evaluating the energy efficiency of operation of low-voltage electrical devices, allowing to specify the amount of power (electricity) losses in equipment and recommended to increase the reliability of calculating electricity losses in low-voltage networks of electrical complexes.

Keywords: electrical device; energy efficiency; power losses; contact resistance; approximating functions; electrical complexes.

Acknowledgements: The publication was carried out with the financial support of the state task of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation, project No. 0851-2020-0032 «Research of algorithms, models and methods for improving the efficiency of complex technical systems».

For citation: Abdullazyanov EY, Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM, Tabachnikova TV, Shumikhina OA, Gibadullin RR. Research of the quality of functioning of low-voltage electric devices as a part of electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(6):3-15. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15.

Введение

В Российской Федерации вопросам повышения надежности электроснабжения и энергоэффективности эксплуатации электрооборудования в настоящее время уделяется пристальное внимание [1-4]. Это обусловлено повышением стоимости как энергоносителей и электроэнергии, так и стоимости оборудования систем электроснабжения. Ужесточаются требования к качеству электроэнергии [5-9]. Получают дальнейшее развитие новые виды электрооборудования на всех уровнях напряжения, что требует поиска новых путей оптимизации режимных и схемных параметров систем электроснабжения [10-13].

Как известно, наиболее разветвленными и протяженными в составе внутризаводских электротехнических комплексов являются электрические сети низкого напряжения, содержащие в своем составе большое количество низковольтной коммутационной аппаратуры (НКА). Поэтому выявление наиболее энергоэффективных аппаратов является актуальной задачей и способствует возможности оптимального внедрения мероприятий по энергосбережению в электротехнических комплексах. Исследованию технических характеристик НКА посвящено много работ, например [10-12]. Однако, не все параметры аппаратов достаточно хорошо изучены. Например, потери мощности в аппарате и величина сопротивления контактов и контактных соединений не всегда представлены в каталожных данных. Достоверная оценка этих величин требуется для уточнения уровня потерь электроэнергии в электрических сетях низкого напряжения.

Внедрение в электротехнических комплексах таких систем, как «умные сети» «интеллектуальные сети» [13-18] также требует повышения эффективности эксплуатации коммутационной аппаратуры, применения новых конструкторских разработок и исследования технических параметров аппаратов.

Исследование технических параметров электрических аппаратов низкого напряжения

Проведем исследование, особенностей технических характеристик контактных аппаратов низкого напряжения российского производства.

В таблицах 1 и 2 показаны каталожные и стоимостные данные автоматических выключателей, контакторов и пускателей электромагнитных таких фирм, как *IEK GROUP*, Курский электроаппаратный завод, компания ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА», АО «КОНТАКТОР», ОАО «Дагэлектроавтомат», АО «Владикавказский завод «Электроконтактор», АО «ЧЕБОКСАРСКИЙ ЭЛЕКТРОАППАРАТНЫЙ ЗАВОД».

Таблица 1

Основные каталожные данные автоматов некоторых заводов-производителей

Завод-изготовитель	Марка оборудования	Величина Ином а, А	Цена оборудования на 01.10.2021 г., руб.
Автоматические выключатели			
<i>IEK GROUP</i> ООО «ИЭКХОЛДИНГ» (г. Подольск)	ВА 47-29	0,50-63,0	206-1406
	ВА 47-29 <i>GENERICA</i>	6,0-63,0	153-605
	ВА47-60М	1,0-63,0	276-1937
	ВА47-150	63,0-125,0	1744-8639
	ВА 07М	800,0-3200,0	165908-342801
	ВА88MASTER	16,0-630,0	4910-81191
Курский электроаппаратный завод (г. Курск)	<i>Optimat A</i>	1000,0-6300,0	267850-325439
	ВА 21 АЭС	0,6-100,0	3005-15629
	ВА 55-41	250,0-1000,0	78331-134555
	ВА 56-41	250,0-1000,0	61231-133769
	ВА 57-31АЭС	16,0-100,0	4080-4696
	ВА57-35АЭС	16,0-250,0	5506-216934
Компания ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (г. Москва)	AV-6	1,0-63,0	468-2916
	AV-10	1,0-63,0	1146-5085
	AV-6DC	1,0-63,0	1112-12888
	AV POWER	10,0-1600,0	14358-305481
	ВА-99С (Compact NS)	12,5-630,0	10467-119371
	ВА 99	16,0-1600,0	14358-305481
АО «КОНТАКТОР» (г. Ульяновск)	ВА 47-100 Про	10,0-100,0	568-2261
	ВА 04-31 Про	16,0-125,0	2983-4351
	ВА 04-35 Про	125,0-250,0	5504-6567
	AB2M10H-53-41	800,0-1000,0	122206-139067
	Электрон Э	630,0-4000,0	233446-732153
	Электрон М	250,0-1600,0	218003-367727
ОАО «Дагэлектроавтомат» (г. Кизилюрт)	АЕ-2063	16,0-250,0	1332-1739
	АЕ-2066	16,0-250,0	1364-1839

Таблица 2

Основные каталожные данные контакторов и пускателей электромагнитных

Завод-изготовитель	Марка оборудования	Величина Ином, А	Цена оборудования
Контакторы			
<i>IEK GROUP</i> ООО «ИЭК ХОЛДИНГ» (г. Подольск)	КМИ	9,0 – 95,0	865-5907
	КТИ	115,0 – 630,0	25663-162978
	МКИ	6,0 – 16,0	260-1290
Курский электроаппаратный завод (г. Курск)	ПМ12	10,0-250,0	853-61056
	ПМЛ	10,0-800,0	679-88901
Компания ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (г. Москва)	КМЭ	9,0-95,0	943-5848
	КТЭ	115,0-630,0	11150-75954
	КТЭ реверсивный	115,0-630,0	25406-161348

Продолжение таблицы 2

	КМ	16,0-63,0	1581-4363
	КМ РУ	16,0-63,0	1748-4581
АО «Владикавказский завод «Электроконтактор» (г. Владикавказ)	КПВ	160,0-630,0	6990-27990
	МК	40,0-160,0	5990-18988
	КПД	160,0-250,0	10990-12890
	КМ	9,0-95,0	567-1990
	КВТ	160,0-1000,0	18800-54800
	КВ	160,0-1000,0	7800-55051
	КМЭ	9,0-95,0	290-1680
АО «ЧЕБОКСАРСКИЙ ЭЛЕКТРОАППАРАТНЫЙ ЗАВОД» (г. Чебоксары)	МК2-20Б	40,0-63,0	8095-11387
Пускатели электромагнитные			
IEKGROUP ООО«ИЭКХОЛДИНГ» (г. Подольск)	ПМ-12	10,0 – 630,0	1820 – 1837
Компания ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (г. Москва)	КМЭ	9,0-95,0	3272-18382
АО «Владикавказский завод «Электроконтактор» (г. Владикавказ)	ПМЛ	9,0-400,0	280-21900
	КМН	9,0-95,0	290-1680

На рисунке 1 показаны данные сравнительного анализа ценовой политики на НКА с аналогичными эксплуатационными параметрами наиболее крупных заводов-производителей.

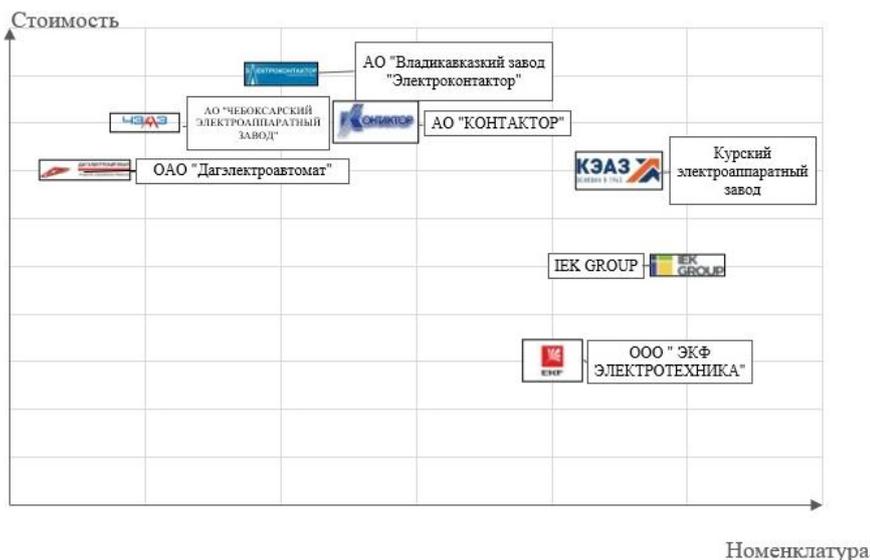


Рис.1. Сравнительный анализ соотношения «номенклатура-стоимость» для НКА

Fig.1. Comparative analysis of the "nomenclature-cost" ratio for the NCA

Для сравнения технических характеристик НКА, как правило, применяются три подхода.

Первый подход исследует конструктивные особенности аппаратов - геометрию и структуру контактных соединений, биметаллических материалов, защиту от электрических

дуг и др.

При этом выявлено, что различие в конструкции автоматических выключателей определяется типом защиты расцепителей, а также количеством пластин дугогасительной камеры, что соответствует режиму эксплуатации.

Во втором подходе исследуется материал контактов аппарата. Для контактов автоматов характерным является наличие серебряных напаяек.

В третьем подходе исследуются основные технические параметры аппаратов.

Исследование энергоэффективности электрических контактных аппаратов

Энергоэффективность электрических контактных аппаратов, в значительной степени, определяется рациональной конструкцией и выполняемыми функциями, а также значениями потерь мощности в контактных соединениях. Проиллюстрируем графически, как зависят потери мощности в контактах автоматов ΔP_a , Вт, от значений номинальных токов $I_{ном}$, А – рисунках 2 и 3.

Для оценки эффективности работы автоматических выключателей определены графические зависимости величины потерь активной мощности в контактных системах от номинального тока для автоматов различных заводов (рис.2,3).

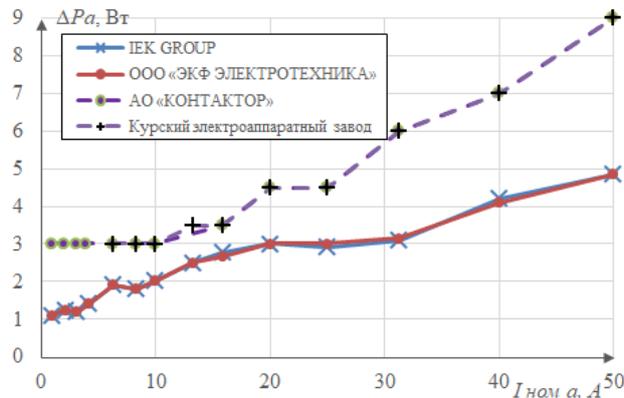


Рис.2. Графические зависимости в контактах автоматических выключателей с $I_{ном а}=1 \div 50 А$

Fig.2. Graphical dependencies in the contacts of circuit breakers with $I_n a = 1 \div 50 A$

По графическим зависимостям (рис. 2) можно видеть, что значения потерь на полюс в автоматах с $I_{нома}=0,5 \div 50 А$ заводов *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» меньше, чем в автоматах курского электроаппаратного завода и АО «КОНТАКТОР», что является характеристикой более энергоэффективного использования аппаратов *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА». При этом, для $I_{нома}=25$ и $32 А$ меньшие потери мощности на полюс аппарата характерны для автоматических выключателей *IEK GROUP*.

Наибольшее различие потерь мощности – в 2-3 раза наблюдается для автоматов с небольшими номинальными токами $I_{нома} = 0,5 \div 6 А$. По критерию минимальных потерь в данном диапазоне токов следует рекомендовать к установке аппараты фирм *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА». При $I_{нома} = 10 \div 50 А$ различие в потерях в контактах аппаратов *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА», имеющих наименьшие потери, по отношению к аппаратам фирм курского электроаппаратного завода и АО «КОНТАКТОР» составляет приблизительно 10-15%. При этом стоимостные показатели выгоднее у оборудования *IEK GROUP*. В среднем, цена аппаратов этого производителя примерно в 2 раза ниже, чем аппаратов ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (табл. 1). Стоимость оборудования заводов курского электроаппаратного завода и АО «КОНТАКТОР» выше, чем *IEK GROUP* и ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА» (табл. 1).

Для автоматов с номинальными токами в диапазоне $I_{ном а}= 50 \div 650 А$ наименьшая величина потерь мощности также характерна для автоматов *IEK GROUP* (рис. 3).

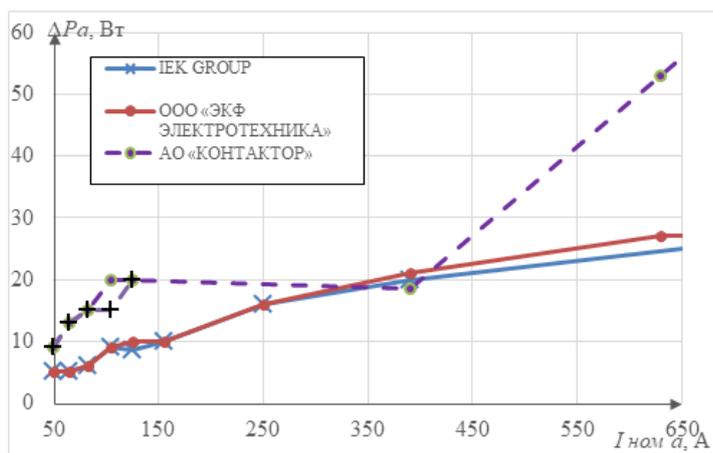


Рис.3. Графические зависимости в контактах автоматов ($I_{ном а} = 50 \div 630$ А) *Fig.3. Graphical dependencies in the contacts of automata ($I_{ном а} = 50 \div 630$ А)*

Для окончательного принятия решений по установке оборудования той или иной фирмы, требуются детальные исследования соотношения «цена-качество» с применением дополнительных критериев, что планируется авторами осуществить в будущем.

Рисунки 4, 5 графически иллюстрируют аналогичные зависимости для контакторов $\Delta P_{к} = f(I_{номк})$

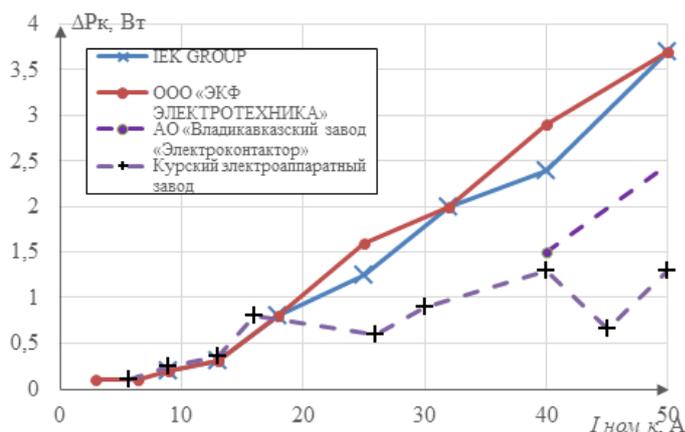


Рис.4. Графические зависимости в контакторах ($I_{номк} = 2 \div 63$ А) *Fig.4. Graphical dependencies in contactors ($I_{номк} = 2 \div 63$ А)*

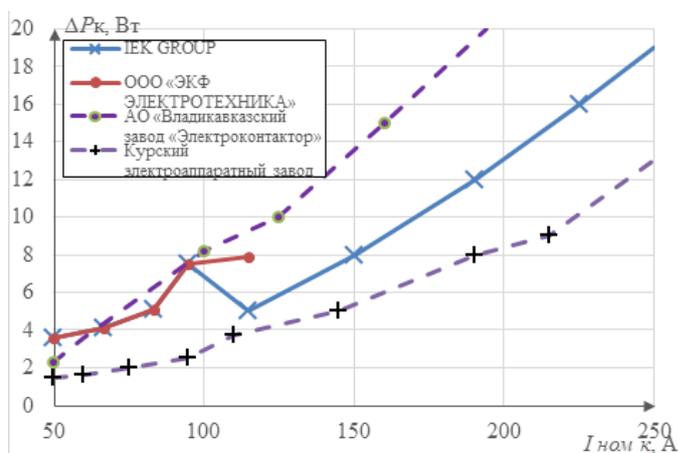


Рис.5. Графические зависимости в контакторах ($I_{номк} = 63 \div 250$ А) *Fig.5. Graphical dependencies in contactors ($I_{номк} = 63 \div 250$ А)*

Графические зависимости (рис. 4 и 5) показывают, что наименьшее значение потерь в контактах контакторов характерно для оборудования курского электроаппаратного завода на большей части диапазонов исследования номинальных токов – $I_{номк} = 3-50$ А, $I_{номк} = 50-250$ А.

И, если до $I_{номк}=20$ А величина потерь приблизительно одинакова для всех рассматриваемых контакторов, то с увеличением номинального тока до 50 А (рис. 4) потери в контакторах курского электроаппаратного завода меньше относительно оборудования АО «Владикавказский завод «Электроконтактор» и IEK GROUP на 10%. А при $I_{номк}=100-250$ А различие в величине потерь снижается до 5-6%, меньшие потери также в контакторах курского электроаппаратного завода.

Определим сопротивление контактов аппаратов

$$R_{ка} = \frac{\Delta P_{ка}}{I_{номка}^2} \quad (1)$$

где $\Delta P_{ка}$ – значение потерь мощности по каталогу; $I_{номка}$ – величина номинального тока аппарата.

Таблица 3

Технические параметры автоматов IEK GROUP. ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА», курский электроаппаратный завод, АО «КОНТАКТОР»

$I_{номка}, А$	Значение потерь, Вт				Вычисленное сопротивление контактов, мОм			
	IEK GROUP	Курский электр аппаратный за вод	ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХ НИКА»	АО «КОНТАКТОР »	IEK GROUP	Курский электр аппаратный за вод	ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХ НИКА»	АО «КОНТАКТОР »
1	1,2	-	1,2	2,92	1190	-	1190	2900
2	1,3	-	1,3	2,92	325	-	325	750
3	1,27	-	1,27	2,92	144,4	-	144,4	333,4
4	1,39	-	1,39	2,92	87,5	-	87,5	187,6
6	1,8	3	1,8	3	50	83,3	50	83,3
10	1,9	3	2,1	3	19	30,0	21	30
16	2,7	3,5	2,6	3,5	10,5	13,7	10,2	13,7
20	3	4,5	3	4,5	7,5	11,3	7,5	11,3
25	2,8	4,5	3	4,5	4,5	7,2	4,8	7,2
32	3,1	6	3,2	6	3,03	5,86	3,13	5,86
40	3,7	7,5	4,1	7,5	2,31	4,69	2,56	4,69
50	4,5	9	4,8	9	1,80	3,60	1,92	3,60
63	5,2	13	5,2	13	1,31	3,28	1,31	3,28
80	7,1	15	7,1	15	1,11	2,34	1,11	2,34
100	7,5	15	8,7	20	0,75	1,50	0,87	2,00
125	8,3	20	10,1	-	0,53	1,28	0,65	-
160	10	-	10	-	0,39	-	0,39	-
250	16,7	-	16,7	-	0,27	-	0,27	-
400	21	-	21,8	18,4	0,14	-	0,15	0,12

Результаты расчетов сопротивлений контактов автоматов показаны в таблице 3. Исходной информацией при этом являются указанные в каталогах номинальные характеристики аппаратов.

Рисунок 6 иллюстрирует аппроксимированные расчетные графики функций $R_{ка} = f(I_{номка})$ для исследуемого оборудования. При этом рассматривается наиболее распространенное в эксплуатации оборудование с $I_{номка}$ до 100 А. Фирмы-изготовители НКА не всегда предоставляют данные о потерях в контактных группах низковольтной аппаратуры, поэтому выявление зависимостей $R_{НКА} = f(I_{номка})$ является актуальной

задачей.

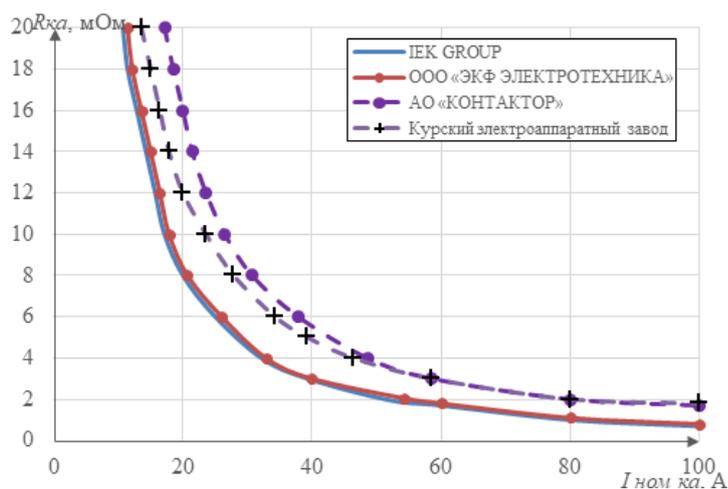


Рис.6. Графики функций $R_{ка} = f(I_{номка})$ Fig.6. Graphs of functions $R_{ка} = f(I_{номка})$

На рисунок 6 показаны графики функций $R_{ка} = f(I_{номка})$. Представленные номограммы позволяют оценивать величину исследуемых сопротивлений контактов автоматов.

Обсуждение результатов

В результате проведения экспериментов по измерению сопротивлений контактов аппаратов по методу амперметра-вольтметра [1] получены функциональные соотношения экспериментальных значений сопротивлений и номинальных параметров автоматов $R_{Эа} = f(I_{нома})$ (рис. 7), контакторов $R_{ЭК} = f(I_{номк})$ (рис. 9) и магнитных пускателей $R_{Эмп} = f(I_{номмп})$ (рис. 10).

Графики (рис. 8) показывают, как изменяется сопротивление контактов автоматов при изменении загрузки аппаратов (Кза) на примере оборудования *IEK GROUP*.

Экспериментальные исследования проводились на не менее чем 20-ти аппаратах каждого номинального тока, сопротивление контактов было измерено 3 раза. Затем среднее значение измеренного сопротивления было зафиксировано в протоколе испытаний.

Далее по методу наименьших квадратов аппроксимированы зависимости $R_{ка} = f(I_{нома})$ и представлены полученные уравнения в табл. 4. Аппроксимация проведена в программе *Mathcad*.

Таблица 4

Уравнения аппроксимации $R_{ка} = f(I_{нома})$ для автоматов

Фирма	Аппроксимирующая функция
<i>IEKGROUP</i>	$R_{ка} = 4,39 \cdot 10^{-3} \cdot I_{нома}^{-2,02} + 1,08$
ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»	$R_{ка} = 1,99 \cdot I_{нома}^{-2} + 0,08 \cdot I_{нома}^{-3} - 1,45 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-7} \cdot I_{нома}$
АО «КОНТАКТОР»	$R_{ка} = 2,07 \cdot e^{0,02I_{нома}} \cdot I_{нома}^{-2} - 0,43 \cdot I_{нома}^{-2}$
Курский электроаппаратный завод	$R_{ка} = 1,84 \cdot I_{нома}^{-2} + 0,07 \cdot I_{нома}^{-3} - 1,45 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-7} \cdot I_{нома}$

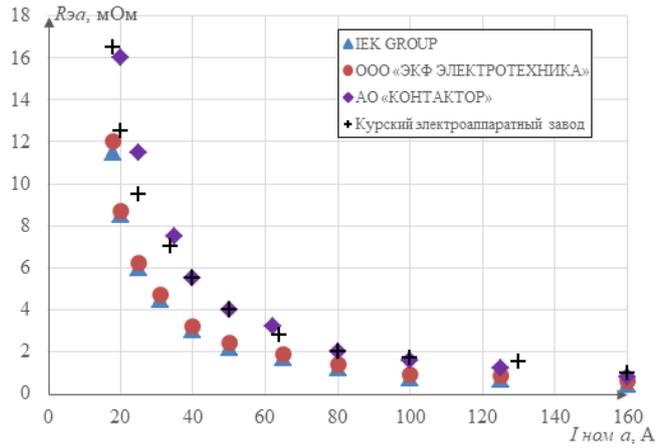


Рис.7. Графики эмпирических зависимостей $R_{эа} = f(I_{нома})$ Fig.7. Graphs of empirical dependencies $R_{эа} = f(I_{нома})$

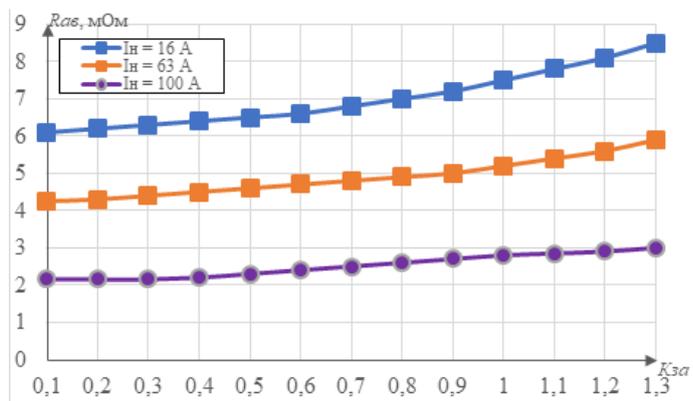


Рис. 8. Графики изменения $R_{эв} = f(K_{эа})$ для автоматов с $I_{ном} = 16; 25; 100 A$ Fig. 8. Graphs of changes in $R_v = f(K_z)$ for automata with $I_n = 16; 25; 100 A$

При изменении токовой нагрузки аппарата, согласно экспериментальным исследованиям, сопротивление контактов автоматов увеличивается. Измерения сопротивлений проведены при изменении протекающего тока через контакты от 10% до 130% $I_{ном а}$.

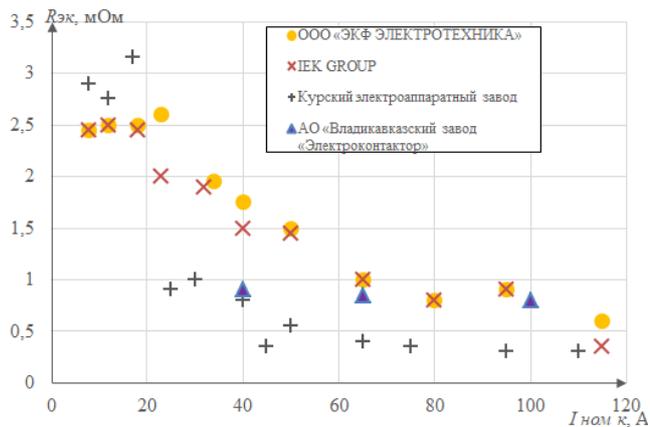


Рис. 9. Графики эмпирических зависимостей $R_{эк} = f(I_{номк})$ Fig. 9. Graphs of empirical dependencies $R_{эк} = f(I_{номк})$

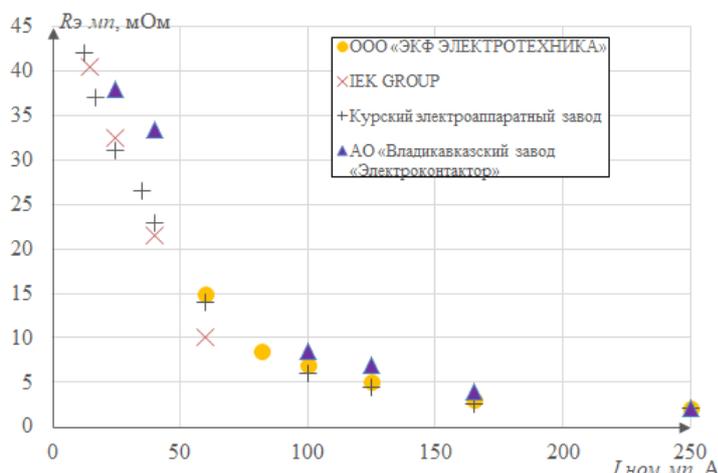


Рис.10. Экспериментальные графики зависимостей $R_{кмн} = f(I_{номмн})$ Fig.10. Experimental dependency graphs $R_{кмн} = f(I_{номмн})$

Далее проведем аппроксимацию эмпирических зависимостей $R_{кк} = f(I_{номк})$ и $R_{кмн} = f(I_{номмн})$ представим полученные уравнения в таблице 5.

Таблица 5

Уравнения аппроксимации $R_{кк} = f(I_{ном})$ и $R_{кмн} = f(I_{номмн})$

Аппараты	Фирма	Аппроксимирующая функция
Контакторы	IEK GROUP	$R_{кк} = 4,84 \cdot 10^{-4} \cdot I_{номк}^{-2,01} + 0,06$
	ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»	$R_{кк} = -86,4 \cdot e^{-8,9 \cdot I_{номк}} \cdot I_{номк}^{-2} + 86 \cdot I_{номк}^{-2}$
	АО «Владикавказский завод «Электроконтактор»	$R_{кк} = 0,18 \cdot I_{номк}^{-2} + 0,01 \cdot I_{номк}^{-3} - 6,9 \cdot 10^{-4} - 4,48 \cdot 10^{-7} \cdot I_{номк}$
	Курский электроаппаратный завод	$R_{кк} = 1,88 \cdot I_{номк}^{-2} + 0,02 \cdot I_{номк}^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-4} - 3,26 \cdot 10^{-7} \cdot I_{номк}$
Магнитные пускатели	IEK GROUP	$R_{мп} = 6472 \cdot I_{номмп}^{-1,69}$
	ООО «ЭКФ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА»	$R_{мп} = -72,1 \cdot e^{-6,5 \cdot I_{номмп}} \cdot I_{номмп}^{-2} + 64 \cdot I_{номмп}^{-2}$
	АО «Владикавказский завод «Электроконтактор»	$R_{мп} = 2,35 \cdot I_{номмп}^{-2} + 0,04 \cdot I_{номмп}^{-3} - 1,1 \cdot 10^{-4} + 5,14 \cdot 10^{-7} \cdot I_{номмп}$
	Курский электроаппаратный завод	$R_{мп} = 0,25 \cdot I_{номмп}^{-2} + 0,03 \cdot I_{номмп}^{-3} - 7,7 \cdot 10^{-4} + 5,12 \cdot 10^{-7} \cdot I_{номмп}$

Полученные уравнения аппроксимации (табл. 4 и 5) позволяют достаточно быстро оценивать значения сопротивлений контактов для аппаратов с различными номинальными токами. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют выявить хорошую сходимость результатов расчетов и данных экспериментов определения сопротивлений аппаратов (рис. 6 и табл. 4 и 5). При наличии полученной в работе информации возможно создание универсальных моделей, которые будут отличаться различной степенью точности, для всех типов низковольтной аппаратуры. Всесторонний учет максимального числа факторов позволит повысить достоверность оценок параметров оборудования при моделировании. Выявленные зависимости сопротивлений аппаратов от номинального тока рекомендуются для вычисления значений эквивалентных сопротивлений электрических сетей низкого напряжения, которое используется для оценки величины потерь электроэнергии. При этом возможно более эффективное планирование мероприятий по энергосбережению. Уточнение значений потерь в низковольтных сетях позволяет оперативно управлять производственными процессами и режимами работы электрооборудования систем электроснабжения, а также контролировать техническое состояние электроустановок. Разработка математических моделей, алгоритмов и

аналитических зависимостей при отсутствии реальных данных, необходима для повышения эффективности эксплуатации оборудования. Анализ потребления электроэнергии с выделением достоверной величины потерь является особенно важным для электротехнических комплексов, т.к. доля электроэнергии в величине эксплуатационных расходов может быть значительной.

Заключение

Теоретический анализ технических параметров низковольтной аппаратуры и данные экспериментов позволяют предложить в качестве одного из критериев энергоэффективности аппаратов значение потерь мощности в контактах и сопротивлений контактных групп. Использование предлагаемого критерия позволяет выявить наиболее эффективные в эксплуатации типы оборудования. При этом для более точной оценки соотношения «цена-качество» необходим детальный анализ дополнительных технических характеристик аппаратов и учет основных эксплуатационных факторов. Исследования в данном направлении планируется продолжить.

Разработанные аппроксимирующие функции сопротивлений контактных систем аппаратов от номинального тока некоторых заводов-изготовителей позволяют анализировать величину потерь мощности и электроэнергии в оборудовании и повышают достоверность оценки уровня потерь электроэнергии во внутризаводских системах электроснабжения и электротехнических комплексах.

Литература

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.
2. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2021. № 1. С.93-104.
4. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
5. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С.65-74.
6. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Оценка потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях // Вестник ПИТТУ им. академика М. Осими. 2019. № 4 (13). С. 38-50
7. Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., и др. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2021. № 3. С.3-13.
8. Варнавский К.А., Матвеев В.Н. Анализ путей повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2016. № 4. С. 14–18.
9. Гайибов Т.Ш., Эшонкулов Э.Б., Айтбаев Н.А. Эквивалентность поиска оптимальных значений регулируемых параметров при минимизации потерь мощности в электрических сетях // Точная наука. 2018. № 31. С. 15–18.
10. Власюк И.В., Парамонов С.Ю., Белов С.И. Повышение эксплуатационной надежности автоматических выключателей в сетях напряжением 0,4 кВ, используемых в агропромышленном комплексе // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 1. С. 51–58.
11. 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.
12. Колодяжный В.В. Возможности современных автоматических выключателей // Энергетические установки и технологии. 2016. Т. 2. № 1. С. 43–49.
13. 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. V. 27, Iss. 3. P. 1982–1997. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.
14. Lei C., Tian W., Zhang Y., Fu R. [et al.]. Probability-based circuit breaker modeling for

power system fault analysis // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 2017. P. 979–984. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec.2017.7930815>.

15. Energy management system for smart house with multi-sources using pi-ca controller / Afrakhte H., Bayat P. 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG 2016 4.2016 pp. 24-31.

16. Lin X., Lei Y., Zhu YA. Novel Superconducting magnetic Energy Storage system design based on a Three-Level T-type Converter and ITS Energy-Shaping Control Strategy. Electric Power Systems Research. 2018. T. 162. C. 64-73.

17. A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet Sun Q., Zhang Y., Ma D., Zhang H., He H. 2017. IEEE Transactions on Smart Grid 8 (3), pp. 1195-1210.

18. Smart Power Grids - Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009.

Авторы публикации

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – канд. техн. наук, доцент, ректор Казанского государственного энергетического университета.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Горлов Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электроснабжение» Юго-Западного государственного университета, г. Курск.

Шакурова Зумейра Мунировна – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Табачникова Татьяна Владимировна – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электро- и теплоэнергетики» Альметьевского государственного нефтяного института, г. Альметьевск.

Шумихина Ольга Александровна – студентка, Казанского государственного энергетического университета.

Гибадуллин Рамил Рифатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Gracheva EI, Naumov OV. *Loss of electricity and the effectiveness of the operation of equipment workshop networks*. Monograph. M.: RUSAINS, 2017. 168 p.

2. Gracheva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining energy losses in workshop networks. *Problems of Energy*. 2019;5:87-96.

3. Gracheva EI, Naumov OV, Gorlov AN, et al. Algorithms and probabilistic models of the parameters of the functioning of the intra-factory power supply. *Energy problems*. 2021;1:93-104.

4. Gracheva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining electricity losses in shop networks. *Problems of power engineering*. 2019;5:87-96

5. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and evaluation of energy savings in intra-plant power supply systems. *Energy problems*. 2020;2:65-74.

6. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Estimation of electric power losses in intra-factory electric networks. *Bulletin of the PITTU named after Academician M. Osimi*. 2019;4 (13):38-50.

7. Abdullazyanov EYu, Gracheva EI, Gorlov AN, et al. Influence of low-voltage electrical devices and electrical equipment parameters on electricity losses in shop networks. *Problems of power engineering*. 2021;3:3-13.

8. Varnavsky KA, Matveev VN. Analysis of ways to improve the efficiency of operation of power supply systems of industrial enterprises. *Promyshlennaya energetika*. 2016;4:14-18.

9. Gayibov TSh, Eshonkulov EB, Aitbayev NA. Equivalence of searching for optimal values of regulated parameters when minimizing power losses in electric networks. *Exact science*.

10. Vlasyuk IV, Paramonov SYu, Belov SI. Improving the operational reliability of circuit breakers in networks with a voltage of 0.4 kV, used in the agro-industrial complex. *International Technical and Economic Journal*. 2018;1:51-58.

11. Egorov EG, Ivanova SP, Luiya NYu, Afanasyev AV, et al. Investigation of the breaking capacity of automatic circuit breakers in the short-circuit mode. *Electrical engineering*. 2018;8:12-15.

12. Kolodyazhny VV. Possibilities of modern automatic circuit breakers. *Power plants and technologies*. 2016;2(1):43-49.

13. 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;27(3):1982–1997. doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.

14. Lei C, Tian W, Zhang Y, Fu R, et al. *Probability-based circuit breaker modeling for power system fault analysis*. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 2017. pp. 979–984. doi: <https://doi.org/10.1109/apec.2017.7930815>.

15. Afrakhte H, Bayat P. *Energy management system for smart house with multi-sources using Pi-Ca controller*. 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG. 2016. 4. pp. 24-31.

16. Lin X, Lei Y, Zhu Y. A Novel Superconducting magnetic Energy Storage system design based on a Three-Level T-type Converter and ITS Energy-Shaping Control Strategy. *Electric Power Systems Research*. 2018;162:64-73/

17. Zhang Q., Ma D., Zhang H. *A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet Sun*. 2017. IEEE Transactions on Smart Grid 8. 2017 (3):1195-1210.

18. Smart Power Grids - Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009 г.

Authors of the publication

Edward Y. Abdullazyanov – Rector of Kazan State Energy University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Alexey N. Gorlov – South-West State University, Kursk.

Zumeyra M. Shakurova – Kazan State Power Engineering University.

Tatyana V. Tabachnikova – Almet'yevsk State Oil Institute, Almet'yevsk.

Olga A. Shumikhina – Kazan State Energy University.

Ramil R. Gibadullin – Kazan State Energy University.

Получено

10.12.2021 г.

Отредактировано

13.12.2021 г.

Принято

14.12.2021 г.