

**РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ  
И КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОМАТИЧЕСКИХ  
ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Петров А.Р., Грачева Е.И.**

**Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия**  
*petroval13@mail.ru*

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время для развития электроэнергетики и электротехнической промышленности необходимым условием является разработка и создание новых типов и конструкций отечественных низковольтных коммутационных аппаратов. В статье представлена разработанная компьютерная модель для исследования и оценки технических и конструктивных характеристик низковольтных коммутационных аппаратов на примере автоматических выключателей (АВ). ЦЕЛЬ. Разработка компьютерной модели для исследования и оценки технических параметров контактных соединений АВ. МЕТОДЫ. В статье представлен мультиплатформенный подход к проектированию и оценке технических и конструктивных характеристик контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов на примере АВ. Трехмерное моделирование выполнено в программе Solid Edge, ввод значений параметров геометрии элементов контактных соединений проводится с помощью Microsoft Excel, физические процессы моделируются в программе COMSOL Multiphysics. РЕЗУЛЬТАТЫ. С помощью компьютерной модели возможно получать данные о нагреве контактных соединений, потерях мощности на полюс аппарата, а также сопротивлении контактных соединений при изменении коэффициента загрузки аппарата от 0,1 до 1,2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Определены значения температуры нагрева контактных соединений, вероятности безотказной работы, сопротивления контактных соединений, потери мощности на полюс аппарата в зависимости от изменения числа циклов коммутаций АВ. Разработанная компьютерная модель позволяет проводить исследования контактных соединений АВ технических параметров в динамике в процессе эксплуатации. Результаты исследования позволяют контролировать техническое состояние исследуемых АВ в режимах эксплуатации.

**Ключевые слова:** автоматический выключатель; коммутационный ресурс; вероятность безотказной работы; сопротивление контактных соединений; нагрев контактных соединений; потери мощности на полюс.

**Для цитирования:** Петров А.Р., Грачева Е.И. Разработка компьютерной модели и исследование технических и конструктивных характеристик автоматических выключателей в различных режимах эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 72-84. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-72-84.

**DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL AND RESEARCH OF TECHNICAL AND DESIGN CHARACTERISTICS OF CIRCUIT BREAKERS IN VARIOUS OPERATING MODES**

**Petrov A.R., Gracheva E.I.**

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**  
*petroval13@mail.ru*

**Abstract:** RELEVANCE. Currently, the development and creation of new types and designs of domestic low-voltage switching devices is a prerequisite for the development of the electric power industry and the electrical industry. The article presents a developed computer model for the study and evaluation of the technical and design characteristics of low-voltage switching devices using the example of circuit breakers (CB). THE PURPOSE. Development of a computer model for the

*study and evaluation of the technical parameters of contact connections CB. METHODS. The article presents a multiplatform approach to the design and evaluation of technical and constructive characteristics of contact connections of low-voltage switching devices using the example of CB. Three-dimensional modeling is performed in the Solid Edge program, input of the geometry parameters of the contact joints is carried out using Microsoft Excel, physical processes are modeled in the COMSOL Multiphysics program. RESULTS. Using a computer model, it is possible to obtain data on the heating of the contact connections, power losses to the pole of the device, as well as the resistance of the contact connections when the load factor of the device changes from 0.1 to 1.2. CONCLUSIONS. The values of the heating temperature of the contact connections, the probability of trouble-free operation, the resistance of the contact connections, and the loss of power to the pole of the device are determined depending on the change in the number of switching cycles of the CB. The developed computer model allows conducting studies of contact connections and technical parameters in dynamics during operation. The results of the study make it possible to monitor the technical condition of the studied CB in operating modes.*

**Keywords:** circuit breaker; switching resource; probability of trouble-free operation; resistance of contact connections; heating of contact connections; loss of power to the pole.

**For citation:** Petrov A.R., Gracheva E.I. Development of a computer model and research of technical and design characteristics of circuit breakers in various operating modes. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (6): 72-84. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-72-84.

#### **Литературный обзор (Literature Review)**

Ученым А.Ю. Верстуниным в [1] разработана и апробирована математическая модель процесса установления стационарного теплового состояния контактно-токоведущих контуров контакторов.

Авторами Петровым В. Н., Николаевым Д. Н., Никитиным Д. Н. в [2] разработано устройство управления электромагнитными приводами, обеспечивающее снижение потребляемой мощности, а также увеличение их электрической износостойкости.

Иванов И. П., Михайлов А. В., Моисеев С. А. в [3] провели оценку формы при обратном проектировании коммутационных аппаратов, повторяющую форму прототипа.

Иванов И. П., Самуилов Д. В. и др. в [4] усовершенствовали методику проектирования токопроводящих частей главной цепи электромагнитных контакторов. Особенность методики заключается в использовании в расчетах постоянной распределения температуры вдоль длины проводника.

Афанасьев П. А., Ивахненко А. Г. в [5] предложили алгоритм верификации методов испытаний в лаборатории, проводящей испытания низковольтного оборудования.

Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. и др. в [6] исследовали вопрос повышения эффективности работы низковольтных коммутационных аппаратов путем тепловизионного обследования.

Львов М.Ю., Никитина С.Д., Лесив А.В. в [7] разработали методологию применения термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений электрооборудования.

Авторы Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллаев Э.Ю. в [8] исследовали вопросы оценки параметров надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в электрических сетях систем электроснабжения промышленных предприятий.

Петровой Р. М., Грачевой Е. И. в работе [9] выявлены законы изменения вероятностных характеристик надежности коммутационных аппаратов, а также кабельных линий низкого напряжения.

Засипина В. И., Астанин С. С. в [10] исследовали иерархию и структуру систем электроснабжения, вероятностные характеристики работы оборудования, а также проанализировали методы расчета предполагаемой частоты отказов элементов.

Feng Z. в [11] исследовал различные типы неисправностей электрооборудования и основные влияющие на неисправности факторы в распределительных сетях низкого и среднего напряжения, а также предложил модель анализа надежности на основе теории дерева отказов.

Liu Z., Huang S., Zhao C. в [12] исследовали законы изменения восстанавливающегося напряжения при отключении автоматического выключателя при различных режимах нагрузки и коротких замыканиях.

Arrighetti P., Corfdir P., Ilic T. в [13] разработали модель автоматического выключателя для исследования технических характеристик при отключении аппаратом токов короткого замыкания.

Dalal S. N., Gohel M. V., Mehta C. R. в [14] исследовали тепловые характеристики автоматического выключателя в литом корпусе и определили влияние тепловыделения на элементы конструкции внутри корпуса.

Sen P. M., Kanojia S. S. в [15] предложили эффективные методы улучшения тепловых характеристик автоматических выключателей, а также исследовали влияющие факторы на тепловые характеристики.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что в настоящее время проводятся исследования в области повышения точности оценки технического состояния низковольтных коммутационных аппаратов.

Научная и практическая значимость предлагаемого исследования заключается в повышении точности оценки технического состояния АВ внутрищекового электроснабжения.

Актуальностью и научной новизной исследования является разработка компьютерной модели для исследования и оценки технических и конструктивных характеристик АВ. Трехмерное моделирование выполнено в программе Solid Edge, ввод значений параметров геометрии элементов контактных соединений в Microsoft Excel, физические процессы моделируются в программе COMSOL Multiphysics.

#### ***Введение (Introduction)***

Компьютерное моделирование конструктивных и технических характеристик электрических аппаратов необходимо для повышения точности и сокращения времени определения основных параметров контактных соединений. В связи с этим результаты моделирования аппаратов необходимо представлять в доступной форме для инженерно-конструкторского персонала. Это позволит сократить проведение натурных испытаний образцов в лабораториях.

Компьютерная модель позволяет описать изменение технических параметров электрических аппаратов при изменении условий их работы. Системы электроснабжения промышленных предприятий характеризуются высокой стоимостью обслуживания оборудования и рисками отказа коммутационных аппаратов. Поэтому компьютерное моделирование является целесообразным при проектировании новых типов аппаратов и их эксплуатации.

В предлагаемой статье представлена разработанная компьютерная модель для расчета технических параметров контактных соединений АВ для различных режимов эксплуатации.

Под режимом эксплуатации понимается:

- характеристика срабатывания (кривая тока) – С,
- частота коммутаций – от 2 до 5 за один рабочий день;
- коэффициент загрузки аппарата – от 0,1 до 1,2.

Основными задачами моделирования при этом являются:

- определение температуры нагрева контактных соединений;
- определение потерь активной мощности на полюс аппарата;
- определение сопротивления контактных соединений.

С помощью предлагаемой модели осуществляется проверка геометрии элементов контактных соединений, выбор контактного нажатия и допустимых шероховатостей материалов контактных соединений АВ.

Результаты моделирования возможно использовать при проведении расчетов и исследований на стадии разработки конструкции АВ. Это позволит в дальнейшем устраниć ошибки, возникающие при проектировании, определить оптимальные размеры контактных соединений и сократить при этом число итераций. Допустимое значение температуры нагрева контактных соединений, потерь активной мощности и сопротивления контактных соединений свидетельствует о правильном выборе и учете конструктивных особенностей параметров исследуемых аппаратов.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Для разработки геометрической структуры контактных соединений использована программа Solid Edge, которая позволяет получить достоверные параметры аппаратов при проектировании. Для ввода значений параметров контактных соединений используется

Microsoft Excel, что упрощает процессы сбора и накопления базы данных необходимых технических характеристик. Физические параметры контактных соединений аппаратов учитываются в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Упрощенная схема моделирования представлена на рисунке 1.

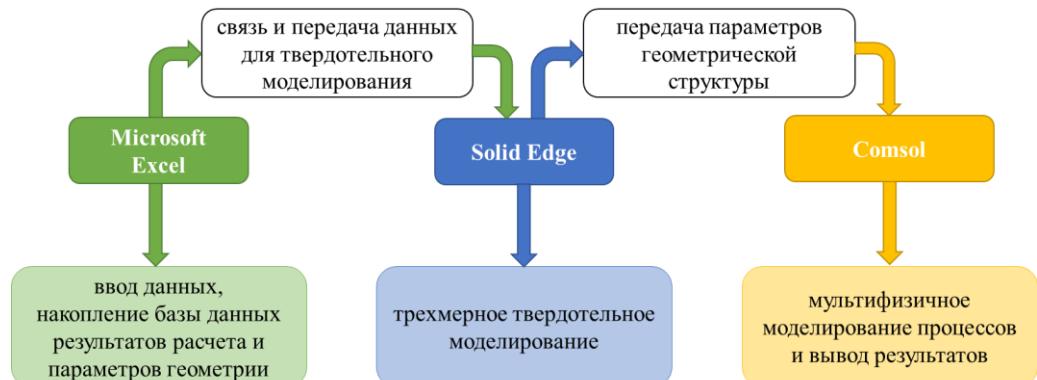


Рис. 1. Схема моделирования контактных соединений АВ Fig. 1. Scheme of modeling contact connections CB

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Моделирование выполнено для АВ с рычажным подвижным контактом. Разработанная геометрическая структура представлена на рисунке 2.

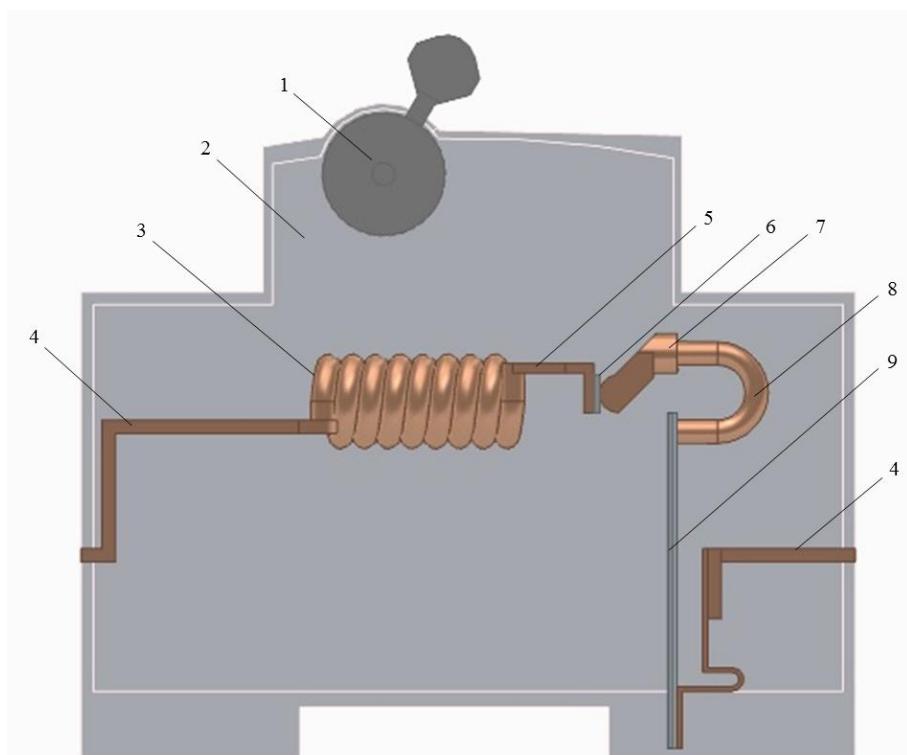


Рис. 2. Модель АВ в программе Solid Edge:  
1 – рычаг управления; 2 – корпус; 3 – электромагнитный (ЭМ) расцепитель; 4 – ввод для клеммы подключения; 5 – неподвижный контакт; 6 – напайка; 7 – подвижный контакт; 8 – гибкая связь; 9 – биметаллическая пластина

Fig. 2. The CB model in the Solid Edge program:  
1 – control lever; 2 – housing; 3 – electromagnetic (EM) release; 4 – input for connection terminals; 5 – fixed contact; 6 – soldering; 7 – moving contact; 8 – flexible connection; 9 – bimetallic plate

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В таблице 1 представлены уравнения описания физических процессов, протекающих в контактных соединениях АВ. Все процессы учитываются в программе COMSOL Multiphysics.

Таблица 1  
Table 1

Физические процессы, протекающие в контактных соединениях  
*Physical processes occurring in contact connections*

№	Физический процесс	Уравнение	Описание
1	Протекание тока по контактным соединениям	$J = \sigma E + J_e$	$J$ – вектор плотности тока, $\text{А}/\text{м}^2$ ; $\sigma$ – электропроводность, $\text{См}/\text{м}$ ; $E$ – вектор напряженности электрического поля, $\text{В}/\text{м}$ ; $J_e$ – внешняя плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$
		$E = -\nabla V$	$\nabla V$ – ротор электрической потенциальной энергии, $\text{В}$
		$\nabla J = Q_{j,v}$	$\nabla J$ – ротор плотности тока, $Q_{j,v}$ – скорость изменения заряда, $\text{Кл}/\text{м}^3$
2	Изменение сопротивления контактных соединений в зависимости от температуры нагрева	$\sigma = \frac{1}{\rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_{ref})]}$	$\rho_0$ – удельное сопротивление при температуре $t_{ref}$ $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ; $\alpha$ – температурный коэффициент сопротивления, $1/\text{К}$ ; $t$ – текущее значение температуры, $\text{К}$ ; $t_{ref}$ – эталонное значение температуры, $\text{К}$
3	Охлаждение элементов контактного соединения	$\rho \cdot C_\rho \cdot u \cdot \nabla T + \nabla q = Q_p + Q_{ted}$	$\rho$ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ ; $C_\rho$ – удельная теплоемкость при постоянном напряжении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ; $u$ – вектор скорости поступательного движения, $\text{м}/\text{с}$ ; $T$ – абсолютная температура, $\text{К}$ ; $q$ – тепловой поток за счет теплопроводности, $\text{Вт}/\text{м}^2$ ; $Q_p$ – дополнительные источники тепла, $\text{Вт}/\text{м}^3$ ; $Q_{ted}$ – термоупругое демпфирование для учета термоупругих эффектов в твердых телах
		$Q = h \cdot (T_{cs} - T_{air}) \cdot F$	$Q$ – тепловой поток, $\text{Вт}$ ; $h$ – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ ; $T_{cs}$ – температура контактных соединений, $\text{К}$ ; $T_{air}$ – температура окружающего воздуха, $\text{К}$ ; $F$ – поверхность теплообмена, $\text{м}^2$

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Обсуждение результатов (Discussions)

Для моделирования параметров контактных соединений исследуются АВ с номинальным током ( $I_{\text{ном}}$ ) 16 А и 32 А. Технические данные аппаратов должны соответствовать ГОСТ IEC 60947-2-2021 и ГОСТ 60898-1-2020. В таблице 2 приведены данные для моделирования, которые задаются в Microsoft Excel.

Таблица 2  
Table 2

Технические параметры АВ для моделирования  
*Technical parameters of the CB for modeling*

Ток $I_{\text{ном}}$ , А	Ширина подвижного контакта, мм	Ширина напайки, мм	Ширина неподвижного контакта, мм	Диаметр гибкой связи, мм	Диаметр ЭМ расцепителя	Количество витков ЭМ расцепителя
16	3	4,5	4,5	1,6	1,6	9
32	3	4,5	4,5	2,3	2,3	8

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для повышения точности моделирования в разработанной программной модели учитываются следующие параметры:  $M_{asp}$  – шероховатость поверхности, неровности среднего наклона;  $Q_{asp}$  – шероховатость поверхности, выступы средней высоты;  $P$  – контактное нажатие, кПа;  $H_c$  – микротвердость, Па;  $h_k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для представления результатов моделирования в удобной форме переходим в программе COMSOL в инструмент создания приложений Application Builder. С помощью инструмента приложений возможно разрабатывать отдельные пользовательские приложения, чтобы применять их без установки и навыков владения программой COMSOL. Рабочая область разработанного приложения представлена на рисунке 3.

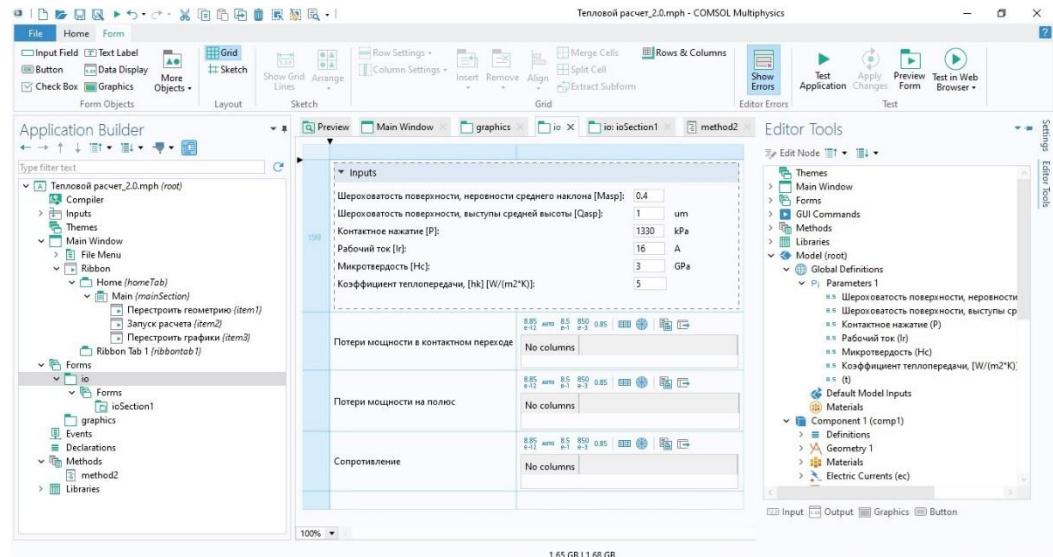
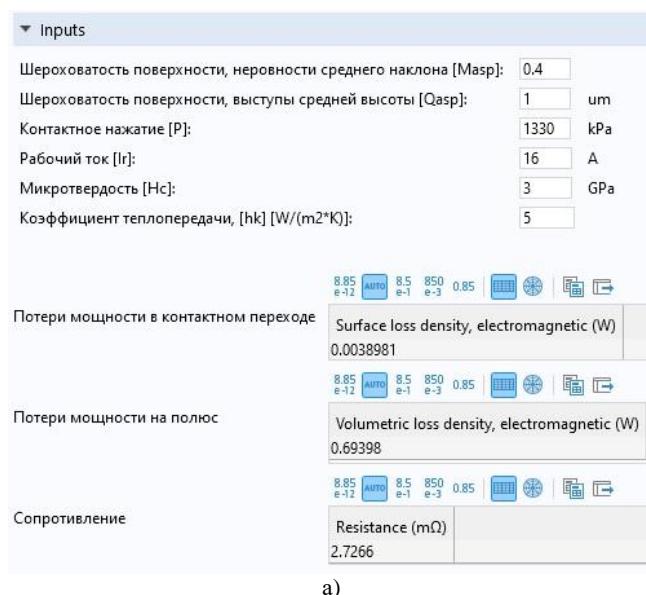


Рис. 3. Рабочая область приложения

Fig. 3. Application workspace

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Формирование результатов моделирования параметров контактных соединений АВ возможно с использованием блока расчета, который является разделом для визуализации разработанной модели. С помощью разработанного приложения осуществляется запуск расчета, перестроение геометрии модели, а также вывод графических зависимостей требуемых параметров. Ввод необходимых данных для моделирования производится в блоке задания параметров. На рисунках 4 и 5 представлены результаты моделирования для исследуемых АВ.



a)

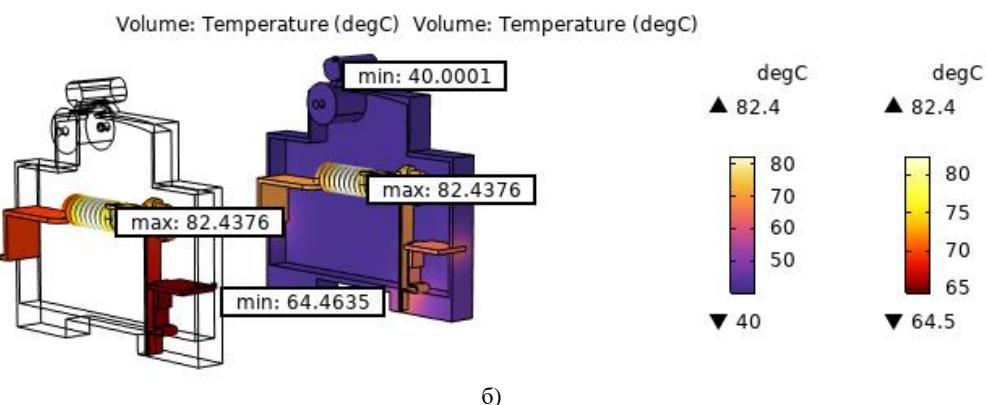
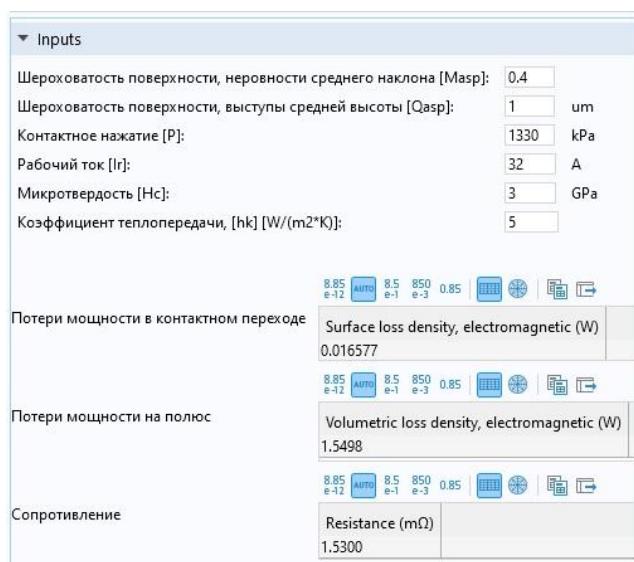


Рис. 4. Результаты применения разработанной компьютерной модели АВ с  $I_{\text{ном}} = 16 \text{ A}$

*Fig. 4. Results of application of the developed computer model of CB with  $I_{\text{nom}} = 16 \text{ A}$*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*



a)

Volume: Temperature (degC) Volume: Temperature (degC)

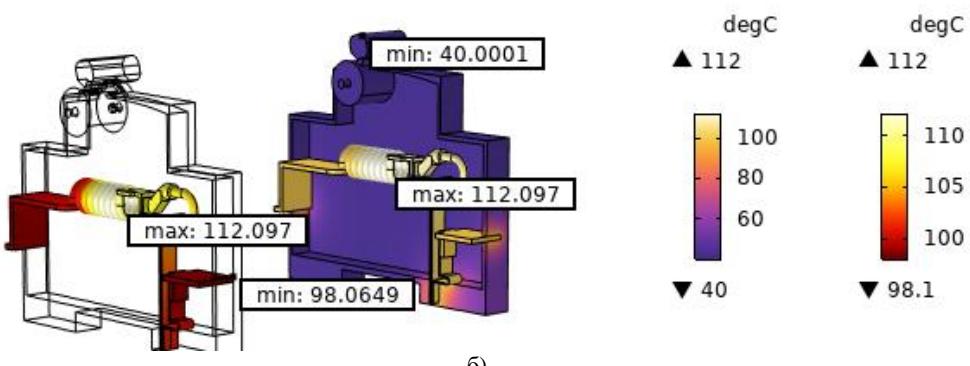


Рис. 5. Результаты применения разработанной компьютерной модели АВ с  $I_{\text{ном}} = 32 \text{ A}$

*Fig. 5. Results of application of the developed computer model of CB with  $I_{\text{nom}} = 32 \text{ A}$*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

На рисунках 4 и 5:

а – блок ввода и вывода данных;

б – распределение температуры нагрева по контактным соединениям и на корпус АВ.

Результаты моделирования параметров контактных соединений АВ приведены в таблице 3.

Таблица 3  
Table 3

Результаты моделирования параметров контактных соединений АВ  
The results of modeling the parameters of contact connections CB

Тип аппарата	Коэффициент загрузки $K_3$	Минимальная температура нагрева контактных соединений $t_{min}$ , °C	Максимальная температура нагрева контактных соединений $t_{max}$ , °C	Потери мощности на полюс $\Delta P$ , Вт	Сопротивление контактных соединений $R$ , мОм
AB на 16A	0,3	41,9	43,4	0,06	2,43
	0,5	45,6	49,6	0,16	2,48
	1,0	64,5	82,4	0,69	2,73
AB на 32A	0,3	44,3	45,3	0,15	1,25
	0,5	52,3	55,2	0,33	1,29
	1,0	98,1	112,1	1,55	1,53

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Определим изменение исследуемых параметров контактных соединений АВ при изменении коэффициента загрузки аппаратов. Результаты представлены на рисунках 6-8.

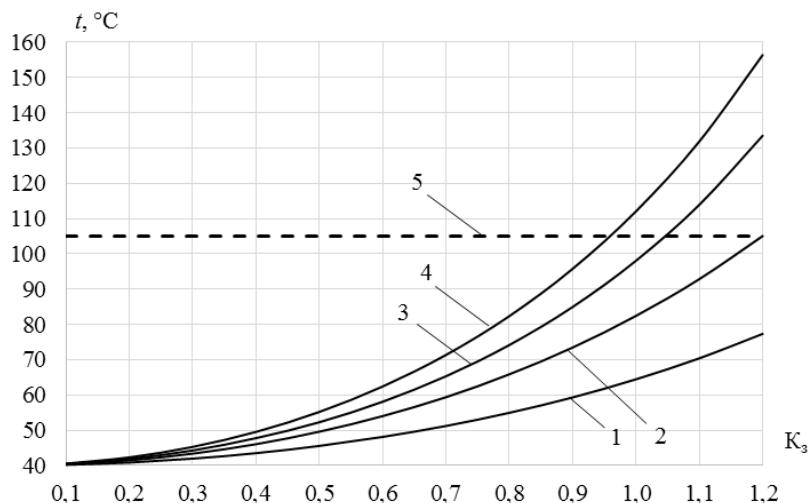


Рис. 6. Графические зависимости изменения температуры нагрева контактных соединений от коэффициента загрузки аппаратов: 1, 2 – минимальное и максимальное значения температуры нагрева для АВ с  $I_{nom} = 16$  A; 3, 4 – минимальное и максимальное значения температуры нагрева для АВ с  $I_{nom} = 32$  A; 5 – допустимое значение температуры нагрева в соответствии ГОСТ 403-73

Fig. 6. Graphical dependences of the change in the heating temperature of the contact connections on the load factor of the devices: 1, 2 – the minimum and maximum values of the heating temperature for CB with  $I_{nom} = 16$  A; 3, 4 – the minimum and maximum values of the heating temperature for CB with  $I_{nom} = 32$  A; 5 – the permissible value of the heating temperature in accordance with GOST 403-73

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Превышения температуры нагрева контактных соединений низковольтных аппаратов должны соответствовать требованиям ГОСТ. Для проверки проводится сравнение значений температуры нагрева с требованиями регламентирующих стандартов. При этом должно соблюдаться условие соответствия полученного значения превышения температуры допустимому. Допустимое превышение температуры нагрева контактных соединений регламентирует ГОСТ 403-73, т.е. допустимое значение температуры нагрева контактных соединений внутри аппаратов составляет  $t_{доп} = 105^{\circ}\text{C}$  при температуре окружающей среды, равной  $40^{\circ}\text{C}$ . Графические зависимости на рисунке 6 показывают, что при  $K_3 = 1$  для АВ с  $I_{nom} = 16$  A, максимальная абсолютная температура нагрева контактных соединений составляет  $82,4^{\circ}\text{C}$ , т.е. превышение температуры нагрева контактных соединений относительно допустимого значения температуры отсутствует. Для АВ с  $I_{nom} = 32$  A температура нагрева контактных соединений при номинальной загрузке аппарата равна  $112,1^{\circ}\text{C}$ , в этом случае превышение температуры составляет  $7,1^{\circ}\text{C}$ .

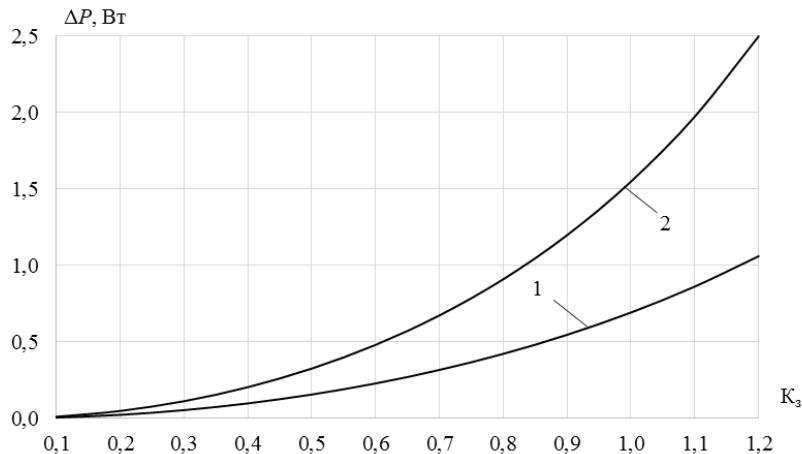


Рис. 7. Графические зависимости изменения потерь активной мощности на полюс АВ от его коэффициента загрузки: 1 – для АВ с  $I_{nom} = 16$  А; 2 – для АВ с  $I_{nom} = 32$  А  
*Fig. 7. Graphical dependences of the change in the loss of active power to the CB pole on its load factor: 1 – for CB with  $I_{nom} = 16$  A; 2 – for CB with  $I_{nom} = 32$  A*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости на рисунке 7 показывают, что для исследуемых аппаратов потери активной мощности на полюс находятся в допустимых пределах в соответствии с ГОСТ. Согласно ГОСТ 60898-1-2020, максимально допустимое значение потерь мощности на полюс при номинальной загрузке для АВ на токи, не превышающие 16 А составляет 3,5 Вт, а для АВ с  $I_{nom} = 32$  А – 4,5 Вт.

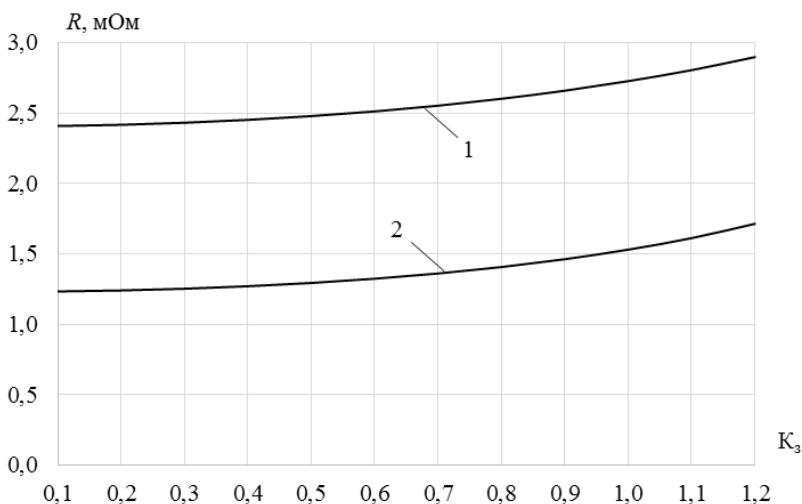


Рис. 8. Графические зависимости изменения сопротивления контактных соединений АВ от коэффициента загрузки аппарата: 1 – для АВ с  $I_{nom} = 16$  А; 2 – для АВ с  $I_{nom} = 32$  А  
*Fig. 8. Graphical dependences of the change in the resistance of the CB contact connections on the load factor of the device: 1 – for CB with  $I_{nom} = 16$  A; 2 – for CB with  $I_{nom} = 32$  A*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости на рисунке 8 показывают, что при изменении коэффициента загрузки от 0,1 до 1,2 для аппарата с  $I_{nom} = 16$  А сопротивление контактных соединений не превышает значения 2,9 мОм, а для АВ с  $I_{nom} = 32$  А – 1,7 мОм.

Далее определим изменение вероятности безотказной работы  $P(n)$  и сопротивления контактных соединений  $R(n)$  исследуемых АВ при изменении цикла коммутаций. Разработанная модель позволит учитывать интенсивность отказов АВ. При этом интенсивность отказов аппаратов определяется с учетом поправочных коэффициентов [8].

Тогда  $P(n)$  для АВ с  $I_{nom} = 16$  А имеет вид:

$$P(n) = e^{-7,44 \cdot 10^5 \cdot n} \quad (1)$$

$P(n)$  для АВ с  $I_{nom} = 32$  А.

$$P(n) = e^{-6,83 \cdot 10^5 \cdot n} \quad (2)$$

Графические зависимости изменения  $P(n)$  и  $R(n)$  от числа коммутационных циклов представлены на рисунках 9 и 10.

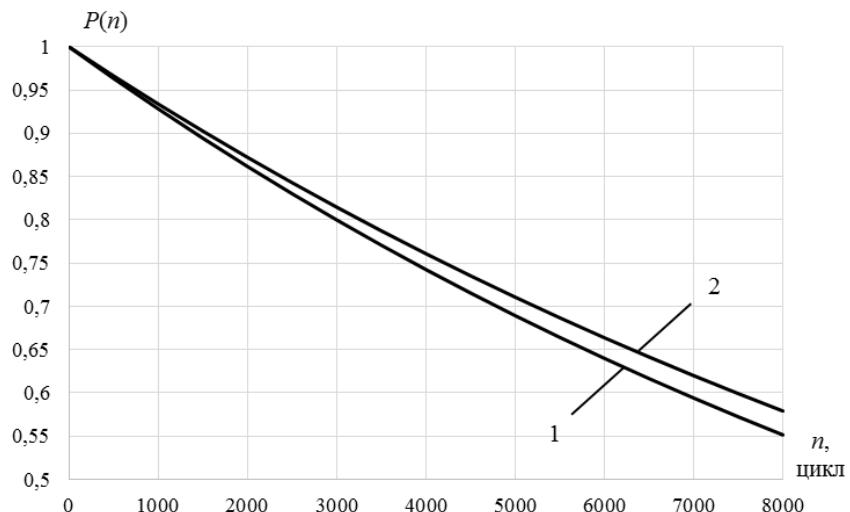


Рис. 9. Графические зависимости изменения вероятности безотказной работы АВ от числа цикла коммутаций: 1 – для АВ с  $I_{\text{ном}} = 16 \text{ A}$ ; 2 – для АВ с  $I_{\text{ном}} = 32 \text{ A}$

*Fig. 9. Graphical dependences of the change in the probability of failure-free operation of an CB on the number of switching cycles: 1 – for CB with  $I_{\text{nom}} = 16 \text{ A}$ ; 2 – for CB with  $I_{\text{nom}} = 32 \text{ A}$*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости на рисунке 9 показывают, что значение вероятности безотказной работы  $P(n)$  для исследуемых АВ менее 0,85 наблюдается при числе коммутаций более 2300, что является недопустимым согласно ГОСТ 12434-83. Поэтому предлагается провести модернизацию контактных соединений аппаратов, например, увеличение площади поперечного сечения контактного перехода. С помощью результатов исследования возможно определять максимально возможный уровень корректировки параметров конструкции аппаратов, т.е. когда будет рентабельно перейти к новой конструкции для повышения эффективности эксплуатации.

Изменение сопротивления контактных соединений  $R(n)$  в процессе эксплуатации для АВ с  $I_{\text{ном}} = 16 \text{ A}$  определяется выражением [8].

$$R(n) = 3 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 0,0005 \cdot n + 2,55 \quad (3)$$

Для АВ с  $I_{\text{ном}} = 32 \text{ A}$  функция  $R(n)$  имеет вид [8].

$$R(n) = 2 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 0,0005 \cdot n + 1,39 \quad (4)$$

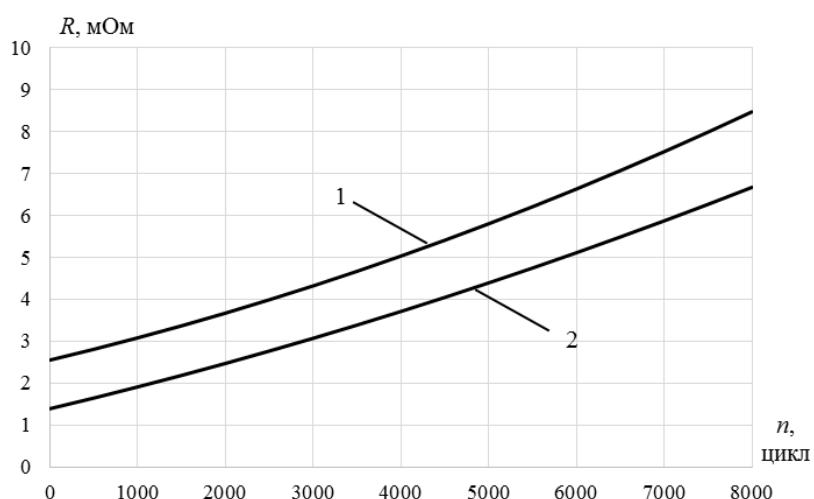


Рис. 10. Графические зависимости изменения сопротивления контактных соединений АВ от числа цикла коммутаций: 1 – для АВ с  $I_{\text{ном}} = 16 \text{ A}$ ; 2 – для АВ с  $I_{\text{ном}} = 32 \text{ A}$

*Fig. 10. Graphical dependences of the change in the resistance of the CB contact connections on the number of switching cycles: 1 – for CB with  $I_{\text{nom}} = 16 \text{ A}$ ; 2 – for CB with  $I_{\text{nom}} = 32 \text{ A}$*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графические зависимости на рисунке 10 показывают, что для АВ с  $I_{\text{ном}} = 16$  А сопротивление контактных соединений при числе циклов коммутаций  $n = 8000$  увеличивается в 3 раза относительно начального значения сопротивления контактных соединений. Для АВ с  $I_{\text{ном}} = 32$  А сопротивление контактных соединений при паспортном числе циклов коммутаций увеличивается в 4 раза относительно начального значения сопротивления нового аппарата (до начала эксплуатации). Результаты расчетов исследуемых параметров для АВ представлены в таблице 4.

Таблица 4  
Table 4

Результаты расчетов  $P(n)$  и  $R(n)$  для АВ  
The results of calculations of  $P(n)$  and  $R(n)$  for CB

Тип аппарата	Параметр	Количество циклов, $n$						
		500	1000	2000	3000	5000	7000	8000
АВ на 16 А	$P(n)$	0,9635	0,9283	0,8617	0,8000	0,6894	0,5940	0,5515
	$R(n)$ , мОм	2,81	3,08	3,67	4,32	5,80	7,52	8,47
АВ на 32 А	$P(n)$	0,9664	0,9340	0,8723	0,8147	0,7107	0,6200	0,5790
	$R(n)$ , мОм	1,65	1,91	2,47	3,07	4,39	5,87	6,67

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Заключение (Conclusions)

Проведенные исследования показывают, что разработанная для АВ компьютерная модель позволяет с требуемой точностью определять основные технические параметры низковольтных коммутационных аппаратов. При этом для оценки технического состояния аппаратов необходимо получить достоверные данные о нагреве контактных соединений, сопротивлении контактных соединений и потерях активной мощности на полюс аппарата. Результаты применения компьютерной модели сопоставлены с действующими государственными стандартами, регламентирующими исследуемые параметры, такие как нагрев контактных соединений, сопротивление контактных соединений и потери активной мощности на полюс.

Для оценки возможного технического ресурса АВ определены зависимости изменения сопротивления контактных соединений и вероятности безотказной работы от числа циклов коммутаций. Исследование показало, что для АВ значение  $P(n)$  уменьшается до значения 0,85 при числе циклов коммутаций  $n = 2300$ . Т.е., при превышении числа циклов коммутаций свыше указанного значения требование ГОСТ 12434-83 не выполняется.

Сопротивление контактных соединений при достижении паспортного значения числа циклов коммутаций аппаратов увеличивается в 3 раза для АВ с  $I_{\text{ном}} = 16$  А и, примерно, в 4 раза для АВ с  $I_{\text{ном}} = 32$  А, что соответствует процессу износа контактных соединений АВ при эксплуатации, уменьшению контактного нажатия и увеличению шероховатостей поверхностей материалов контактных соединений.

Результаты работы рекомендуется использовать для оценки технического состояния контактных соединений АВ в режимах эксплуатации.

Дальнейшие исследования возможны при разработке компьютерных моделей для анализа оценки технических характеристик для различных типов низковольтных аппаратов, таких, как магнитные пускатели, контакторы, рубильники и пакетные выключатели с различными номинальными токами.

### Литература

1. Верстунин А. Ю. Математическая итеративно-адаптационная модель процесса установления стационарного теплового состояния контактнотоковедущих контуров контакторов // Вестник МЭИ. – 2023. – №2. – с. 27-36.
2. Петров В. Н., Николаев Д. Н., Никитин Д. Н. Экспериментальное исследование оптимального по потребляемой мощности устройства управления электромагнитным приводом контактора // Вестник ЧГУ. 2024. №4. С. 98–106. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-98-106.
3. Иванов И. П., Михайлов А. В., Моисеев С. А. Особенности промышленного дизайна при обратном проектировании коммутационных аппаратов // Вестник Чувашского университета. 2024. №4. С. 36 – 44. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-36-44.
4. Иванов И. П., Самуилов Д. В., Свинцов Г. П., Федимиров А. А., Шпаков Е. В. Усовершенствованная методика проектирования токопроводящих частей электромагнитных

контакторов // Вестник Чувашского университета. 2021. №3. С. 73 – 82. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-73-82.

5. Афанасьев П. А., Ивахненко А. Г. Верификация методов испытаний низковольтного оборудования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №12. С. 343–348. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-343-349.

6. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А., Петров А.Р., Грачева Е.И. Тепловизионный контроль электрооборудования промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 2. С. 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.

7. Львов М.Ю., Никитина С.Д., Лесив А.В. Применение термоиндикаторов для контроля состояния контактов и контактных соединений при эксплуатации электрооборудования // Электрические станции. 2023. № 2. С. 44-51. doi:<http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1099.2.008>.

8. Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллаев Э.Ю. Повышение точности оценки параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в системах внутрищелевого электроснабжения с учетом основных действующих факторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 3. С. 38 -52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.

9. Петрова Р. М., Грачева Е. И. Алгоритмы оценки основных параметров надежности низковольтного оборудования схем цеховых сетей // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.

10. Зацепина В. И., Астанин С. С. Возможности мониторинга состояния системы относительно её отказоустойчивости // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №12. С. 98 – 102.

11. Feng Z. A Study of Reliability of Low and Medium Voltage Distribution Networks Based on Fault Tree Theory // 2024 IEEE 4th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), Changchun, China, 2024, pp. 955-960, doi: 10.1109/ICETCI61221.2024.10594689.

12. Liu Z., Huang S., Zhao C. Study on the Influence of Reignition on Electrical Life Distribution of Low-Voltage Circuit Breakers // in IEEE Access, vol. 9, pp. 91500-91511, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091735.

13. Arrighetti P., Corfdir P., Ilic T. System level and multiphysics approaches to simulate low voltage circuit breaker interruption // 2023 IEEE 68th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), Seattle, WA, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/HOLM56075.2023.10352272.

14. Dalal S. N., Gohel M. V., Mehta C. R. Analysis and Thermal Performance Implementation of MCCB with Aluminium Busbar and Enclosure // 2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Delhi, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10307722.

15. Sen P. M., Kanojia S. S. Analysis of Thermal Performance of an Air Circuit Breaker // 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/GUCON50781.2021.9573594.

### Авторы публикации

**Петров Алмаз Радикович** – аспирант Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID\*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru

**Грачева Елена Ивановна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

### References

1. Verstunin A.Yu. Iterative-Adaptive Mathematical Model of Settling a Stationary Thermal State of the Contactor Live Circuits. Bulletin of MPEI. 2023;2:27—36. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-2-27-36.
2. Petrov V. N., Nikolaev D. N., Nikitin D. N. Experimental study of optimal power consumption control device for the electromagnetic drive of a contactor // Bulletin of the Chuvash University. 2024. No.4. pp. 98–106. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-98-106.
3. Ivanov I. P., Mikhailov A. V., Moiseev S. A. Features of industrial design in reverse engineering of switching devices // Bulletin of the Chuvash University. 2024. No.4. pp. 36–44. DOI: 10.47026/1810-1909-2024-4-36-44.
4. Ivanov I. P., Samuilov D. V., Svintsov G. P., Fedimirov A. A., Shpakov E. V. Improved design technique for conducting parts of electromagnetic contactors // Bulletin of the Chuvash University. 2021. No.3. pp. 73 – 82. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-73-82.

5. Afanasyev P.A., Ivakhnenko A.G. Verification of low-voltage equipment test methods // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021. No.12. pp. 343–348. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-343-349.
6. Shpiganovich A.N., Shpiganovich A.A., Petrov A.R., Gracheva E.I. Thermal imaging control of electrical equipment of industrial enterprises. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (2): 68-77. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77.
7. Lvov M. Yu., Nikitina S. D., Lesiv A. V. Methodological principles of monitoring the condition of contacts and contact connections during the operation of electrical equipment using thermal indicators // Electrical stations. 2023. n. 2. pp. 44-51. doi:<http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.1099.2.008>.
8. Petrov A.R., Gracheva E.I., Abdullazyanov E.Yu. Improving the accuracy of estimation of reliability parameters of low-voltage switching devices installed in the systems of inhouse power supply taking into account the main influencing factors. Power engineering: research, equipment, technology. 2025; 27 (3):38-52. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-38-52.
9. Petrova R. M., Gracheva E. I. Algorithms for estimating the main reliability parameters of low-voltage equipment of shop-floor network schemes // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 93–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-93-102.
10. Zatsepina V.I., Astanin S.S. Possibilities of monitoring the state of the system relating to its failure touch // Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2021. No.12. pp. 98–102.
11. Feng Z. A Study of Reliability of Low and Medium Voltage Distribution Networks Based on Fault Tree Theory // 2024 IEEE 4th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), Changchun, China, 2024, pp. 955-960, doi: 10.1109/ICETCI61221.2024.10594689.
12. Liu Z., Huang S., Zhao C. Study on the Influence of Reignition on Electrical Life Distribution of Low-Voltage Circuit Breakers // in IEEE Access, vol. 9, pp. 91500-91511, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091735.
13. Arrighetti P., Corfdir P., Illic T. System level and multiphysics approaches to simulate low voltage circuit breaker interruption // 2023 IEEE 68th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), Seattle, WA, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/HOLM56075.2023.10352272.
14. Dalal S. N., Gohel M. V., Mehta C. R. Analysis and Thermal Performance Implementation of MCCB with Aluminium Busbar and Enclosure // 2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Delhi, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10307722.
15. Sen P. M., Kanojia S. S. Analysis of Thermal Performance of an Air Circuit Breaker // 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/GUCON50781.2021.9573594.

#### Authors of the publication

**Almaz R. Petrov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID\*: <https://orcid.org/0009-0008-4497-4807>. petroval13@mail.ru

**Elena I. Gracheva** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** **31.08.2025 г.**

**Отредактировано** **12.09.2025 г.**

**Принято** **01.10.2025 г.**