

Комплексный подход к исследованию функциональных параметров низковольтных коммутационных аппаратов

- Петров А. Р.¹, Казанский государственный энергетический университет, Казань
- Грачева Е. И., доктор техн. наук, Казанский государственный энергетический университет, Казань

Рассмотрены проблемы оценки эффективности эксплуатации низковольтных коммутационных аппаратов в системах внутрицехового электроснабжения. Для решения задачи проведено исследование технического состояния современных электрических аппаратов и разработан алгоритм и модели определения основных технических характеристик автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов различных заводов-изготовителей. Установлены зависимости потерь активной мощности в исследуемых аппаратах от их номинальных токов. По результатам исследований разработаны аппроксимирующие функции величины потерь активной мощности и сопротивления контактов и контактных соединений от основных номинальных параметров автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов. Разработаны алгоритм и модели оценки эффективности эксплуатации низковольтных коммутационных аппаратов, которые позволяют уточнить величину потерь активной мощности и электроэнергии в электрических сетях низкого напряжения. Результаты исследования рекомендуется применять для уточнения и повышения достоверности расчёта потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях.

Ключевые слова: электрические аппараты, контактные соединения, функция аппроксимации, потери мощности, сопротивление контактов.

Как показывает практика, в связи с широким развитием производства низковольтной аппаратуры различных марок, актуальной задачей становится выявление наиболее эффективного оборудования с наименьшими потерями мощности и электроэнергии, что способствует внедрению оптимальных решений по энергосбережению в системах внутрицехового электроснабжения [1 – 3].

Коммутационные аппараты являются одними из наиболее распространённых типов оборудования цеховых сетей. Большинство аппаратов внутризаводского электроснабжения, как правило, работают в условиях окружающей среды, отличной от нормальной: повышенная влажность, температура, агрессивные производственные среды и т.п. При этом нагрузка аппаратов изменяется в зависимости от условий технологических процессов и режимов эксплуатации [4 – 7]. Как известно, контактные системы аппаратов подвержены как электрическому, так и механическому износу, ввиду частых коммутаций, внешних вибраций и возможных механических воздействий, не предусмотренных техническими условиями.

Эти факторы определяют величину переходного сопротивления контактных соединений [8 – 11]. Внутрицеховые сети характеризуются большой

протяжённостью и разветвленностью и имеют множество последовательных и параллельных узлов с контактными соединениями. В связи с тем, что контактные системы коммутационных аппаратов в процессе эксплуатации находятся в замкнутом положении и от их состояния зависит уровень надёжности низковольтной сети в целом, к контактному соединению предъявляются строгие требования [12 – 14]. Надёжность низковольтных коммутационных аппаратов в целом определяется надёжностью элементов конструкции – контактной системы, дугогасительного устройства и привода [6].

Для исследования сопротивлений контактных соединений низковольтных аппаратов используются каталожные данные заводов-изготовителей потерь активной мощности ΔP на полюс аппарата².

К основным конструктивным особенностям аппаратов относятся форма, материалы и геометрические размеры контактов, тип биметаллических материалов и вид устройств защиты от электрической дуги. По конструктивным особенностям исследуемые низковольтные аппараты относятся к аппаратам, имеющим, кроме силовых контактов в силовой цепи, добавочные элементы (датчики тепловых реле, катушки максимальных реле).

Алгоритмы и модели потерь мощности в низковольтных аппаратах

Для исследования технических характеристик автоматических выключателей в литом корпусе

¹ Петров Алмаз Радикович: petroval13@mail.ru

² Каталог электротехнической продукции КЭАЗ (<https://keaz.ru/catalog>), Каталог электротехнической продукции ИЕК (<https://www.iek.ru/products/catalog/>), Каталог продукции Schneider Electric (<https://www.se.com/ww/en/>), Каталог продукции ABB (<https://global.abb/group/en>), Каталог продукции Legrand (<https://legrand.ru/services/library/>).

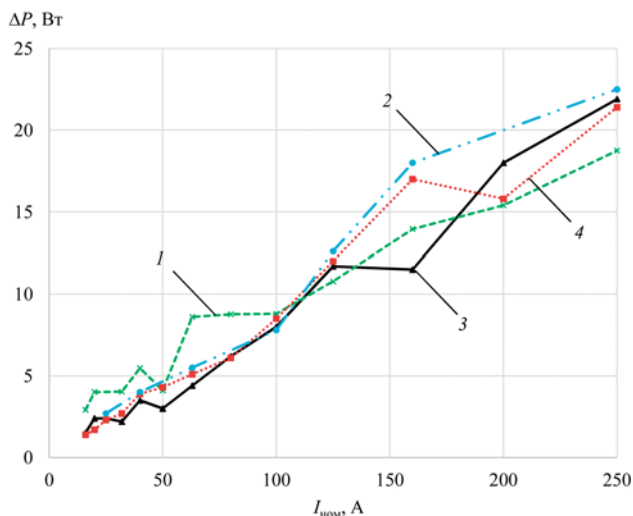


Рис. 1. Графические зависимости потерь активной мощности от номинального тока АВЛК:

1 – ComPact NSX (Schneider Electric); 2 – DPX (Legrand); 3 – ВА04 (КЭАЗ); 4 – Tmax XT (ABB)

(АВЛК) определялся вид графических зависимостей потерь активной мощности на полюс в контактных системах от номинального тока аппаратов различных заводов-изготовителей – Курского электроаппаратного завода (КЭАЗ), Schneider Electric, ABB, Legrand с номинальным током до 250 А (рис. 1).

Вид полученных графических зависимостей показывает, что потери мощности на полюс автоматических выключателей с $I_{ном}$ до 100 А имеют приблизительно одинаковые значения для аппаратов фирмы КЭАЗ, ABB и Legrand. Наибольшие потери мощности характерны для автоматов производства Schneider Electric – примерно на 50% больше, чем для аппаратов ВА04 (КЭАЗ). При исследовании аппаратов с $I_{ном}$ свыше 100 А установлено, что наибольшие потери активной мощности имеют аппараты фирмы Legrand – примерно на 15% больше, чем ВА04. Стоит отметить, что наиболее эффективными с учётом потерь мощности и стоимости аппарата являются автоматические выключатели производства КЭАЗ.

Графики зависимости потерь мощности в контактных системах магнитных пускателей и контакторов от их номинальных токов, построенные по каталожным данным, представлены на рис. 2.

Полученные графические зависимости (рис. 2, а) показывают, что магнитные пускатели фирмы Legrand имеют наименьшие потери активной мощности в контактных системах – примерно на 18% меньше, чем аппараты фирмы КЭАЗ – и являются наиболее энергоэффективными по данной характеристике. Аппараты завода-производителя ABB, напротив, имеют наибольшие потери мощности – приблизительно на 33% больше, чем в контактных системах магнитных пускателей

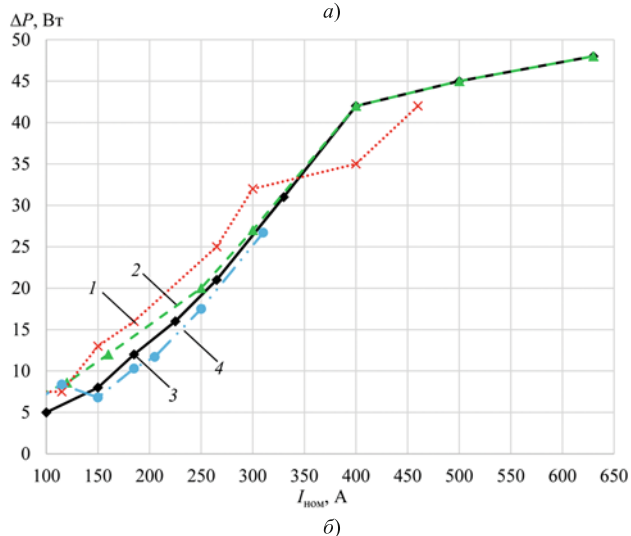
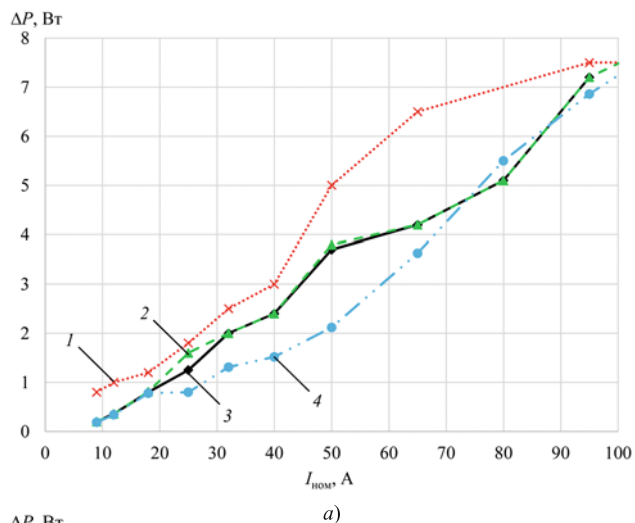


Рис. 2. Графические зависимости потерь активной мощности от номинального тока для магнитных пускателей (а) и контакторов (б):

1 – ABB A (ABB); 2 – EasyPact TVS (Schneider Electric); 3 – ПМЛ (КЭАЗ), КМИ (IEK) до 100 А, КТИ (IEK) более 100 А; 4 – CTX (Legrand)

ПМЛ. В процессе исследования установлено, что потери мощности в контактных системах магнитных пускателей фирм КЭАЗ, IEK и Schneider Electric, примерно, одинаковы.

Графические зависимости, показанные на рис. 2, б, иллюстрируют, что наименьшие потери мощности в контактных системах характерны для контакторов фирм КЭАЗ и Legrand – приблизительно, на 27% меньше, чем в аппаратах фирмы ABB.

Для выбора достоверной функции аппроксимации рассчитывался для каждой из них коэффициент детерминации R^2 и среднюю ошибку аппроксимации. Коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1)$$

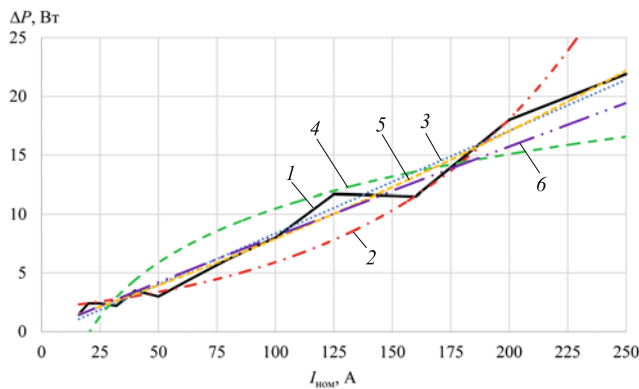


Рис. 3. Графики аппроксимирующих функций потерь активной мощности для АВЛК ВА04 (КЭАЗ):

1 – ВА04; 2 – экспоненциальная; 3 – линейная; 4 – логарифмическая; 5 – полиномиальная; 6 – степенная

где y_i – фактические значения переменных; \hat{y} – расчётные значения исследуемой величины; $\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{n}$ – среднее значение исследуемой величины; $\sum_i (y_i - \hat{y})^2$ – сумма квадратов ошибок регрессии; $\sum_i (y_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений точек данных от среднего значения.

Средняя ошибка аппроксимации \bar{A} – значение, показывающее среднее отклонение расчётных значений от фактических

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \right| \cdot 100\%. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены аппроксимирующие функции потерь активной мощности для автоматического выключателя ВА04.

Данные табл. 1 показывают, что наиболее достоверной аппроксимирующей функцией для исследуемого АВЛК является полиномиальная с $R^2 = 0,9833$, $\bar{A} = 11,45\%$.

На рис. 3 показаны аппроксимирующие графические зависимости потерь мощности от номинального тока для АВЛК ВА04.

В табл. 2 представлены результаты аппроксимации зависимости потерь активной мощности от номинального тока для исследуемых автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов. Функции выбраны на основании наибольшего коэффициента детерминации R^2 и наименьшей ошибки аппроксимации \bar{A} . Оптимальные значения коэффициентов, как показатель достоверности аппроксимации, соответствует полиномиальным зависимостям.

Данные табл. 2 показывают, что аппроксимация потерь мощности в функции номинального тока для исследуемых низковольтных аппаратов является достоверной: коэффициент детерминации R^2 имеет значение более 0,95, а ошибка \bar{A} не превышает 14,8%. С помощью полученных зави-

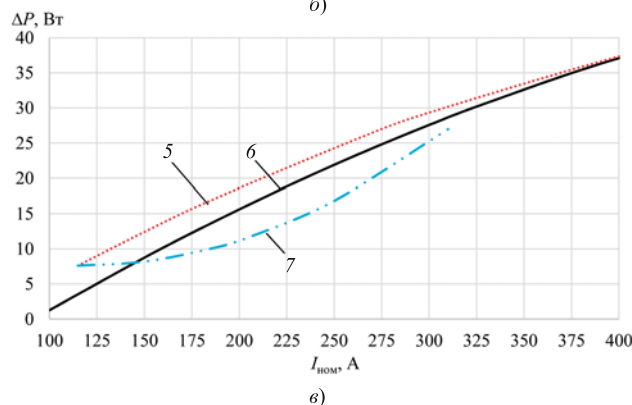
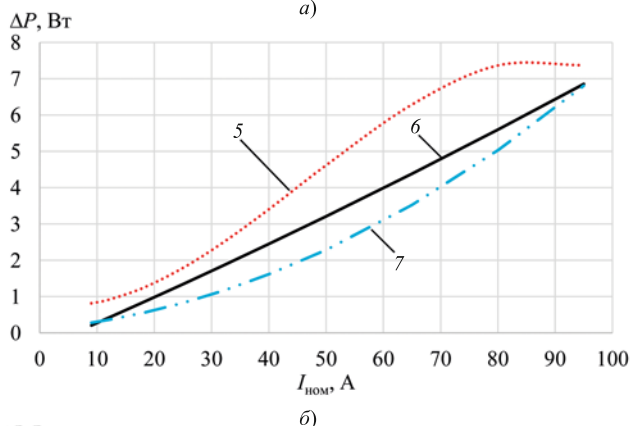
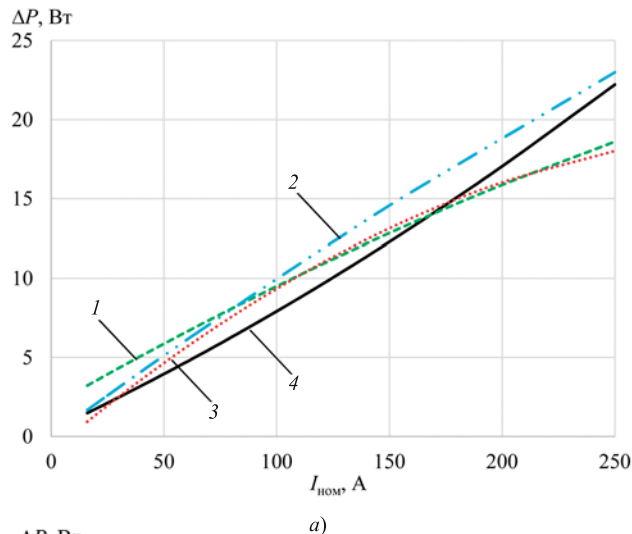


Рис. 4. Графики аппроксимирующих функций потерь активной мощности для АВЛК (а), магнитных пускателей (б) и контакторов (в):

1 – ComPact NSX (Schneider Electric); 2 – DPX (Legrand); 3 – Tmax XT (ABB); 4 – ВА04 (КЭАЗ); 5 – ABB A (ABB); 6 – ПМЛ (КЭАЗ), КМИ (IEK) до 100 А, КТИ (IEK) более 100 А, EasyPact TVS (Schneider Electric); 7 – CTX (Legrand)

симостей возможно определять потери активной мощности на полюс низковольтных коммутационных аппаратов. Данная информация может быть рекомендована к использованию для уточнения расчётов по оценке потерь электроэнергии в низковольтных электрических сетях. На рис. 4 представлены графические зависимости полученных аппроксимирующих функций для исследуемых

аппаратов при загрузке аппаратов номинальным током.

Экспериментальные и расчётные значения сопротивлений контактных систем аппаратов

Как правило, в паспортных данных низковольтных коммутационных аппаратов указываются не все технические характеристики. Не приводятся сопротивления большей части элементов низковольтных аппаратов, так, например, нет данных о сопротивлениях силовых цепей и контактов аппаратов.

Для определения сопротивления контактных соединений $R_{\text{к.пот}}$ использовано выражение

$$R_{\text{к.пот}} = \frac{\Delta P}{I_{\text{ном}}^2}, \quad (3)$$

где ΔP – потери активной мощности на полюс аппарата, Вт, (каталожное значение); $I_{\text{ном}}$ – номинальный ток аппарата, А.

С другой стороны, сопротивление контактных соединений в зависимости от номинального тока и

коэффициента загрузки расчётным способом определяется

$$R_{\text{к.расч}} = \frac{2\sqrt{\lambda F k_T S}}{I^2} \left[\theta_{\text{к}} - \frac{I^2 \rho (1 + \alpha v_{\text{к}})}{F k_T S} \right], \quad (4)$$

где λ – теплопроводность материала контакта, для меди $\lambda = 390$ Вт/(м·К); F – охлаждающая поверхность единицы длины проводника, м² [$F = 2(a + b) \cdot 10^{-3}$ при прямоугольном сечении; $F = 2\pi r \cdot 10^{-3}$ при цилиндрической поверхности]; k_T – коэффициент теплоотдачи, для меди $k_T = 16$ Вт/(м²·К); S – площадь поперечного сечения контактов, м² ($S = ab$ для прямоугольного сечения; $S = \pi r^2$ для цилиндрической поверхности); I – ток через контакты, А; $v_{\text{к}}$ – температура контактных площадок, °С; $\theta_{\text{к}} = 45^\circ\text{C}$ – допустимый перепад температуры контакта относительно температуры окружающей среды; ρ – удельное электрическое сопротивление, для меди $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; α – температурный коэффициент сопротивления, $\alpha = 0,0043$.

Т а б л и ц а 1

Аппроксимирующие функции потерь мощности для АВЛК ВА04 (КЭАЗ)

Аппроксимирующая функция		R^2	$\bar{A}, \%$
Экспоненциальная	$\Delta P_{\text{BA1}} = 1,9379e^{0,0112I_{\text{ном}}}$	0,7629	19,65
Линейная	$\Delta P_{\text{BA2}} = 0,0869I_{\text{ном}} - 0,3237$	0,9798	16,36
Логарифмическая	$\Delta P_{\text{BA3}} = 6,6325 \ln(I_{\text{ном}}) - 20,065$	0,8207	55,9
Полиномиальная	$\Delta P_{\text{BA4}} = -8 \cdot 10^{(-5)} I_{\text{ном}}^2 + 0,0673 I_{\text{ном}} + 0,3855$	0,9833	11,45
Степенная	$\Delta P_{\text{BA5}} = 0,1014 I_{\text{ном}}^{(0,9518)}$	0,9639	10,4

Т а б л и ц а 2

Аппроксимирующие функции потерь мощности для исследуемых аппаратов

Тип аппарата	Марка аппарата (производитель)	Аппроксимирующая функция	R^2	$\bar{A}, \%$
Автоматические выключатели	ВА04 (КЭАЗ)	$\Delta P_{\text{BA}} = -8 \cdot 10^{(-5)} I_{\text{ном}}^2 + 0,0673 I_{\text{ном}} + 0,3855$	0,9833	11,45
	ComPact NSX (Schneider Electric)	$\Delta P_{\text{NSX}} = -6 \cdot 10^{(-5)} I_{\text{ном}}^2 + 0,082 I_{\text{ном}} + 1,928$	0,9724	10,17
	Tmax XT (ABB)	$\Delta P_{\text{Tmax}} = -2 \cdot 10^{(-4)} I_{\text{ном}}^2 + 0,1209 I_{\text{ном}} - 0,9538$	0,9541	13,27
	DPX (Legrand)	$\Delta P_{\text{DPX}} = -5 \cdot 10^{(-5)} I_{\text{ном}}^2 + 0,1044 I_{\text{ном}} + 0,0142$	0,9659	13,53
Магнитные пускатели	ПМЛ (КЭАЗ); КМИ (IEK); EasyPact TVS (Schneider Electric)	$\Delta P_{\text{ПМЛ1}} = 9 \cdot 10^{(-5)} I_{\text{ном}}^2 + 0,0679 I_{\text{ном}} - 0,4125$	0,9856	7,23
	ABB A (ABB)	$\Delta P_{\text{ABB1}} = -2 \cdot 10^{(-4)} I_{\text{ном}}^3 + 0,0032 I_{\text{ном}}^2 - 0,0272 I_{\text{ном}} + 0,815$	0,9918	4,58
	CTX (Legrand)	$\Delta P_{\text{CTX1}} = 6 \cdot 10^{(-4)} I_{\text{ном}}^2 + 0,0135 I_{\text{ном}} + 0,1121$	0,9925	12,48
Контакты	ПМЛ (КЭАЗ); КТИ (IEK); EasyPact TVS (Schneider Electric)	$\Delta P_{\text{ПМЛ2}} = -1 \cdot 10^{(-4)} I_{\text{ном}}^2 + 0,1799 I_{\text{ном}} - 15,52$	0,9725	14,8
	ABB A (ABB)	$\Delta P_{\text{ABB2}} = -1 \cdot 10^{(-4)} I_{\text{ном}}^2 + 0,178 I_{\text{ном}} - 10,411$	0,9835	4,7
	CTX (Legrand)	$\Delta P_{\text{CTX2}} = 5 \cdot 10^{(-4)} I_{\text{ном}}^2 + 0,1204 I_{\text{ном}} + 14,614$	0,9887	6,2

Таблица 3

Результаты расчёта технических характеристик контактов автоматических выключателей, контакторов и магнитных пускателей

Тип аппарата	Ток $I_{ном}$, А	Размеры контактов $a \times b$, мм	Температура контактных площадок ν_k , °С	Сопротивление контактных соединений, $R_{к.расч.}$, мОм
Автоматический выключатель ВА	16	2,8 × 2,8	38,6	7,56
	25	2,8 × 2,8	44,1	2,68
	32	3,8 × 3,8	40,8	2,82
	40	3,8 × 3,8	44,3	1,65
	50	3,8 × 3,8	49,8	0,89
	63	4,0 × 4,0	55	0,49
Магнитный пускатель ПМЛ	100	6,0 × 6,2	49,3	0,46
	25	$r = 4,0$	35,61	12,6
	40	8,1 × 8,1	35,92	6,34
Контактор КТИ	63	12,0 × 12,0	35,75	4,35
	250	10,0 × 20,0	41,5	0,34
	400	17,0 × 20,0	43	0,18

Температура контактных площадок

$$\nu_k = \frac{I^2 \rho + \nu_0 F k_T S}{F k_T S - I^2 \rho \alpha}, \quad (5)$$

где ν_0 – температура окружающей среды, $\nu_0 = 35^\circ\text{C}$.

По выражению (4) для автоматического выключателя марки ВА04 с $I_{ном} = 100$ А, коэффициент загрузки $K_{зг} = 1$, сопротивление контактных соединений $R_{к.расч.ав}$

$$R_{к.расч.ав} = \frac{2 \cdot \sqrt{390 \cdot 2 \cdot (6 + 6,2) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (6 \cdot 6,2) \cdot 10^{-6}}}{100^2} \times \left(45 \frac{100^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0043 \cdot 49,3)}{2 \cdot (6 + 6,2) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (6 \cdot 6,2) \cdot 10^{-6}} \right) = 0,46 \text{ мОм,}$$

где ν_k вычислено по формуле (5)

$$\nu_k = \frac{100^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} + 35 \cdot 2 \cdot (6 + 6,2) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (6 \cdot 6,2) \cdot 10^{-6}}{2 \cdot (6 + 6,2) \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot (6 \cdot 6,2) \cdot 10^{-6} - 100^2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 49,3^\circ\text{C}$$

Результаты расчётов сопротивлений контактных соединений и температуры контактных площадок для исследуемых аппаратов приведены в табл. 3.

Зависимости сопротивлений контактных соединений низковольтных коммутационных аппаратов от номинального тока (полученные экспериментально – по методу амперметра-вольтметра) $R_{к.эксп}$ представлены в табл. 4. Полученные выра-

жения для вычисления коэффициентов в эмпирических формулах имеют отклонения от экспериментальных данных на $\pm 5\%$ [6].

Используя данные исследований, проведём сравнительный анализ графических зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока, полученных экспериментально, по потерям мощности (каталожные данные), расчётным способом и по справочным данным для автоматических выключателей, магнитных пускателей и контакторов. Результаты представлены на рис. 5 и 6.

Из этих рисунков видно, что зависимости (экспериментальные, справочные, расчётные и данные по потерям мощности) имеют различные значения. Это связано с тем, что аппараты имеют разные коммутационные циклы, конструктивные особенности, а также существуют погрешности

Таблица 4

Аналитические зависимости сопротивлений коммутационных аппаратов от номинального тока

Тип аппарата	Пределы номинального тока	Вид аналитической зависимости сопротивления от номинального тока
Автоматические выключатели и контакторы	$I_{ном} < 60$ А	$R_{к.экс.ав,к} = \frac{350}{I_{ном}}$
	$I_{ном} \geq 60$ А	$R_{к.экс.ав,к} = \frac{310}{I_{ном}}$
Магнитные пускатели	$I_{ном} < 70$ А	$R_{к.экс.мп} = \frac{825}{I_{ном}}$
	$I_{ном} \geq 70$ А	$R_{к.экс.мп} = \frac{760}{I_{ном}}$

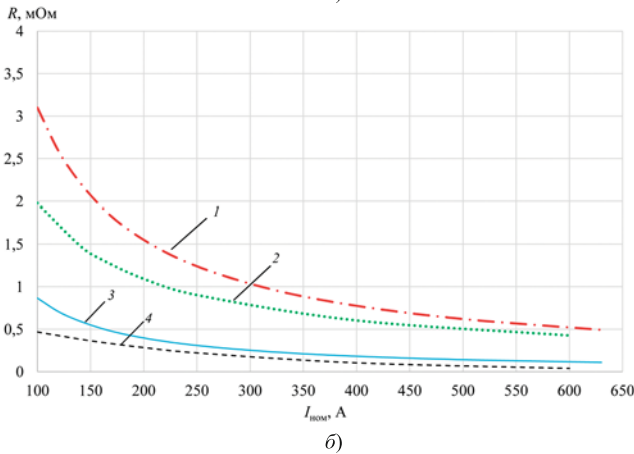
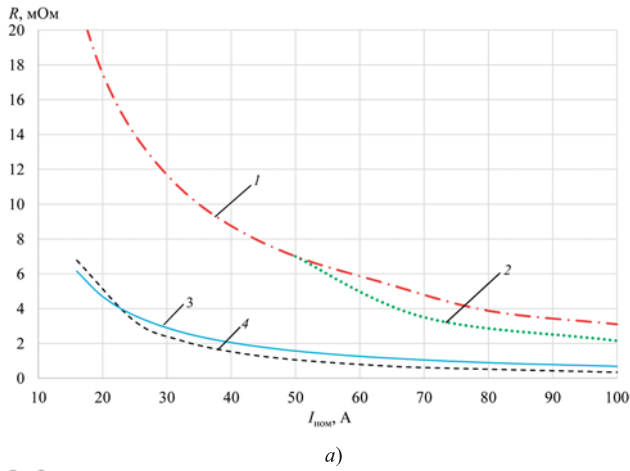


Рис. 5. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для автоматических выключателей с $I_{ном}$ до 100 А (а) и более 100 А (б):

1 – экспериментальные данные $R_{к.экс.ав}$; 2 – справочные данные $R_{к.спр.ав}$; 3 – данные по потерям мощности $R_{к.пот.ав}$; 4 – расчетные значения $R_{к.расч.ав}$

расчётов и исходных данных для расчётов. Следует также принять во внимание, что в эксперименте отбирались аппараты одной марки, но различных заводов-изготовителей и, соответственно, с разным уровнем технологической оснастки производства аппаратов.

На рис. 7 и 8 представлены результаты расчётов погрешностей δ для аппроксимирующих функций сопротивлений контактных соединений аппаратов различными методами относительно экспериментальных значений.

Графики, представленные на рис. 7, а, показывают, что наиболее точным является определение сопротивлений контактов автоматических выключателей в диапазоне номинальных токов $20 \text{ А} \leq I_{ном} < 80 \text{ А}$ по методу с использованием справочных данных. Погрешность при этом не превышает 20%.

Графики (рис. 7, б) показывают, что наиболее достоверным для данного диапазона $I_{ном}$ является

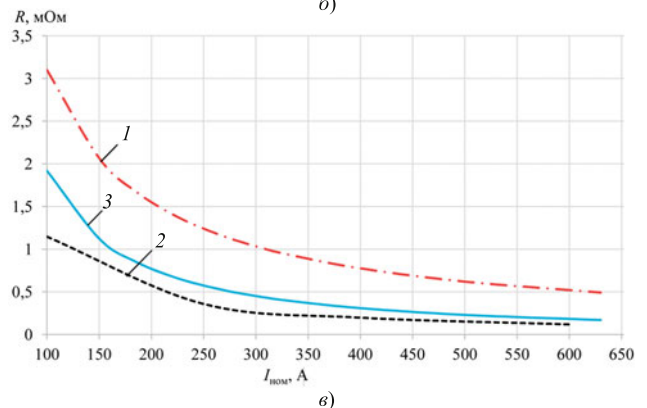
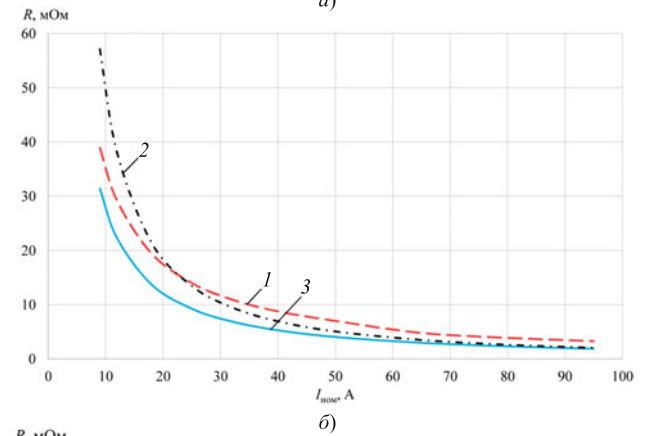
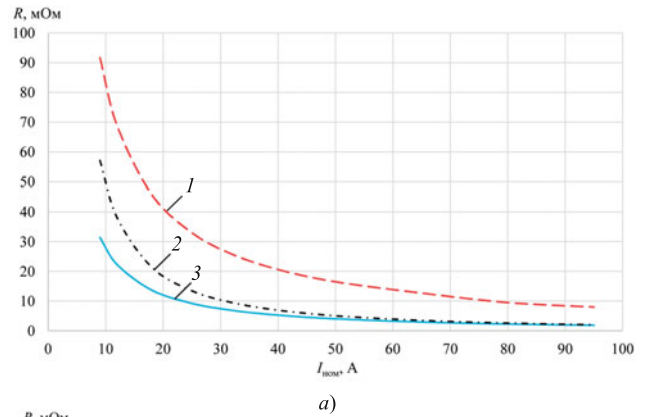


Рис. 6. Графики зависимостей сопротивлений контактных соединений от номинального тока для магнитных пускателей ПМЛ (а), контакторов КМИ (б) и КТИ (в):

1 – экспериментальные данные $R_{к.экс}$; 2 – расчетные значения $R_{к.расч}$; 3 – данные по потерям мощности $R_{к.пот}$

метод с использованием справочных данных. Погрешность при этом не превышает 30%.

Графики погрешностей определения сопротивлений контактных соединений контакторов КМИ, представленные на рис. 8, а, показывают, что в диапазоне значения номинальных токов $10 \text{ А} \leq I_{ном} < 70 \text{ А}$ могут использоваться как наиболее достоверные расчётные данные.

Результаты вычисления погрешностей по потерям мощности и с использованием расчётных данных показывают, что наиболее достоверными являются экспериментальные методы определения

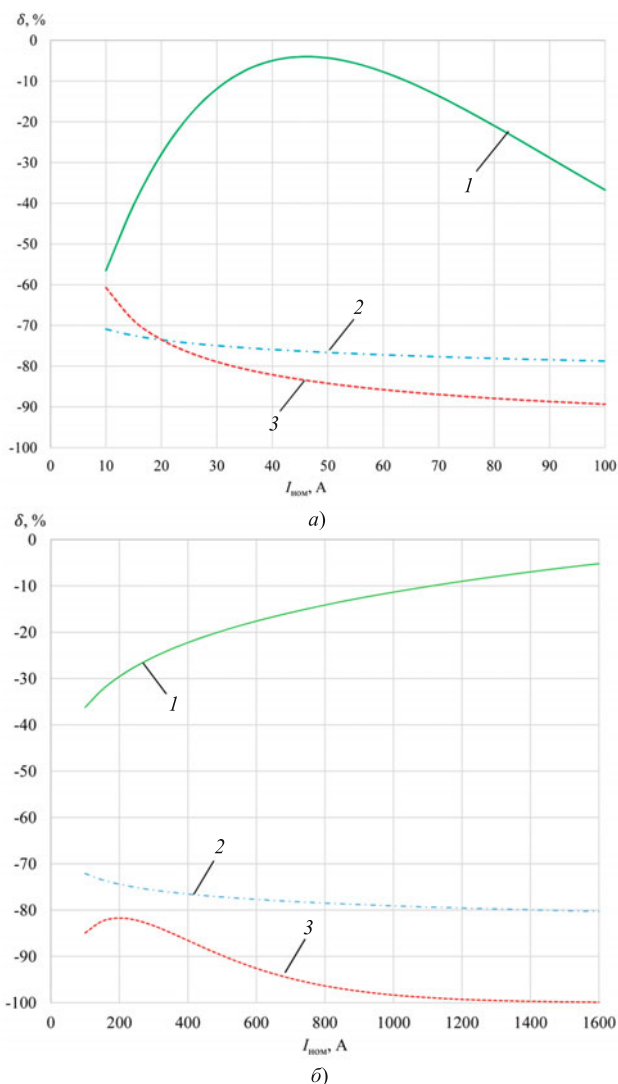


Рис. 7. Графики погрешностей определения сопротивлений контактных соединений различными методами для автоматических выключателей с $I_{ном}$ менее 100 А (а) и более 100 А (б):

1 – по справочным данным; 2 – по потерям мощности; 3 – расчётные значения

сопротивлений контактных соединений. Другие представленные методы имеют существенные погрешности и не могут быть рекомендованы для достоверных оценок параметров магнитных пускателей.

Выводы

1. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что учёт потерь мощности в контактных соединениях низковольтных коммутационных аппаратов позволяет уточнять величину потерь электроэнергии в системах внутривозовского электроснабжения.

2. Выявленные зависимости рекомендуются для получения достоверных оценок расчётных значений эквивалентных сопротивлений низко-

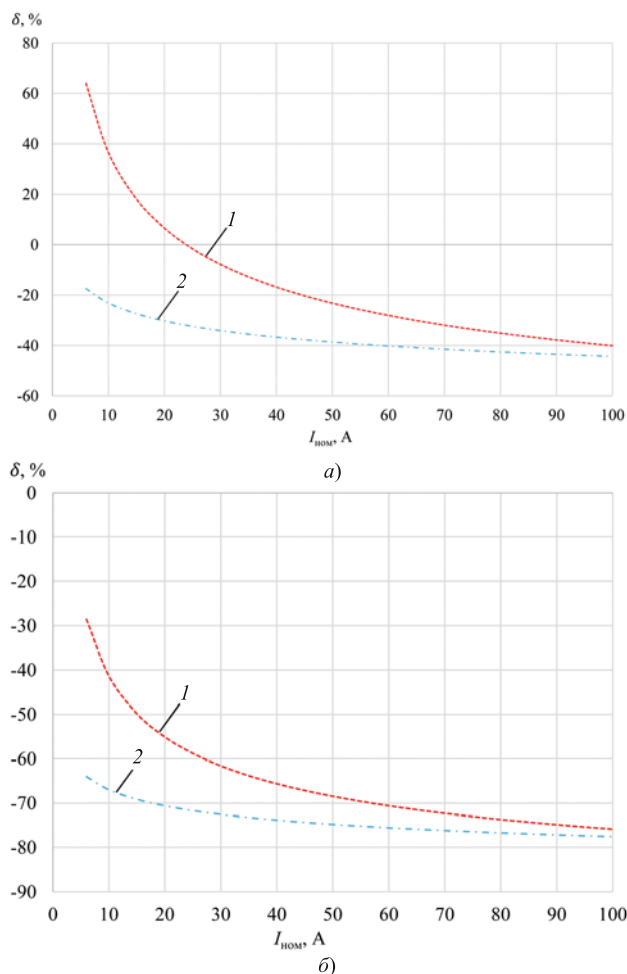


Рис. 8. Графики погрешностей определения сопротивлений контактных соединений контакторов КМИ (а) и магнитных пускателей ПМЛ (б):

1 – расчётные значения; 2 – по потерям мощности

вольтных электрических сетей. Полученные аппроксимирующие функции сопротивлений контактных соединений имеют различные значения погрешностей в зависимости от используемых исходных данных.

Для автоматических выключателей в диапазоне значений номинального тока $20 \text{ А} \leq I_{ном} < 80 \text{ А}$ наиболее достоверным является определение сопротивлений контактов с использованием справочных данных. Погрешность при этом не превышает 20%.

Для автоматических выключателей с $I_{ном} \geq 100 \text{ А}$ также наиболее достоверным является метод с использованием справочных данных. Погрешность при этом не превышает 30%.

Для контакторов КМИ с номинальными токами в диапазоне $10 \text{ А} \leq I_{ном} < 70 \text{ А}$ могут быть использованы расчётные данные определения сопротивлений контактов.

Результаты вычисления погрешностей для магнитных пускателей ПМЛ показали, что наиболее

достоверными являются экспериментальные методы определения сопротивлений контактных соединений.

3. Математические модели и аналитические зависимости позволяют выявить эффективные в эксплуатации типы низковольтных аппаратов и рационально внедрять мероприятия по энергосбережению в системах внутриводского электроснабжения.

Соблюдение этических норм

Авторы не получали поддержки от какой-либо организации в отношении представленной работы.

Список литературы

1. Петров, А. Р. Моделирование потерь мощности в контактных системах низковольтных коммутационных аппаратов [Текст] / А. Р. Петров, Е. И. Грачева // Омский научный вестник. – 2023. – № 2 (186). – С. 126 – 133. – (DOI: 10.25206 / 1813-8225-2023-186-126-133).
2. Грачева, Е. И. Проблемы исследования эквивалентного сопротивления электрических цеховых сетей низкого напряжения [Текст] / Е. И. Грачева, О. В. Наумов, А. Н. Горлов // Вестник КГЭУ. – 2019. – № 3 (43). – С. 38 – 46.
3. Грачева, Е. И. Определение законов изменения сопротивления контактных групп электрических аппаратов низкого напряжения [Текст] / Е. И. Грачева [и др.] // Вестник МГТУ. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 350 – 360. – (DOI: <https://doi.org/10.21443 / 1560-9278-2021-24-4-350-360>).
4. Абдуллазянов, Э. Ю. Алгоритмы оценки эквивалентных сопротивлений внутриводских электрических сетей [Текст] / Э. Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева, А. Н. Горлов, З. М. Шакурова, Т. В. Табачникова, С. Валтчев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 3 – 13. – (doi:10.30724 / 1998-9903-2021-23-4-3-13).
5. Абдуллазянов, Э. Ю. Исследование качества функционирования электрических аппаратов низкого напряжения в составе электротехнических комплексов [Текст] / Э. Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева, А. Н. Горлов, З. М. Шакурова, Т. В. Табачникова, О. А. Шумихина, Р. Р. Гибадуллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 6. – С. 3 – 15. – (doi:10.30724 / 1998-9903-2021-23-6-3-15).
6. Грачева, Е. И. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей [Текст]: монография / Е. И., Грачева О. В. Наумов. – М.: РУСАЙНС, 2017. – 168 с.
7. Хамидуллин, И. Н. Повышение работоспособности распределительных электрических сетей [Текст] / И. Н. Хамидуллин, А. В. Шагидуллин, В. К. Ильин // Вестник КГЭУ. – 2018. – № 3 (39). – С. 72 – 79.
8. Шагидуллин, А. В. Эффективность замены низковольтных коммутационных аппаратов на примере промышленного предприятия [Текст] / А. В. Шагидуллин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2017. – № 3 – 4. – С. 89 – 95.
9. Егоров, Е. Г. Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания [Текст] / Е. Г. Егоров, С. П. Иванова, Н. Ю. Луия, А. В. Афанасьев [и др.] // Электротехника. – 2018. – № 8. – С. 12 – 15.
10. Григорьев, А. А. Анализ физических процессов износа электрических контактов коммутационных низковольтных аппаратов [Текст] / А. А. Григорьев, М. А. Ваткина // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. – 2014. – № 2 (82). – С. 3 – 13.
11. Егоров, Е. Г. Особенности измерения восстанавливающейся электрической прочности в низковольтных контакторах переменного тока [Текст] / Е. Г. Егоров, Г. Е. Егоров, Н. Ю. Луия // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 3. – С. 78 – 86.
12. Gheorghioş, C. M. About contact resistance of the electrical equipment [Text] / C. M. Gheorghioş, M. Adam, M. Andruşcu, A. Munteanu, A. Dragomir // 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS). – Cluj-Napoca, Romania, 2017. – P. 1 – 4. – (doi: 10.1109 / MPS.2017.7974439).
13. Andruşcu, M. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment [Text] / M. Andruşcu, M. Adam, R. Burlica, A. Munteanu, A. Dragomir // 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). – Iasi, Romania, 2016. – P. 123 – 128. – (doi: 10.1109 / ICEPE.2016.7781317).
14. Deac, C. N. Aspects Regarding Contact Resistance Measurement [Text] / C. N. Deac, M. Adam, M. Andrusca and A. Dragomir // 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). – Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. – P. 1 – 6. – (doi: 10.1109 / MPS.2019.8759784).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Российское авторское общество (РАО) начинает выплату авторских гонораров за статьи, опубликованные в журнале «Power Technology and Engineering» за 2022 г.

Документы, которые необходимо предоставлять в РАО авторам – получателям гонораров, опубликованы на сайте РАО в разделе АВТОРАМ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ.

<https://rao.ru/for-rightholders/avtoram-nauchnyh-statej/>