



## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ, УСТАНОВЛИВАЕМЫХ В СИСТЕМАХ ВНУТРИЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

petroval13@mail.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В статье исследуются вопросы оценки параметров надежности контактов низковольтных коммутационных аппаратов (НКА), устанавливаемых в низковольтных электрических сетях систем электроснабжения промышленных предприятий. *ЦЕЛЬ.* Исследование основных параметров надежности контактов НКА с использованием статистического метода и анализ физических процессов в контактных соединениях. *МЕТОДЫ.* Для повышения точности определения интенсивности отказов НКА предлагается ввести поправочные коэффициенты, которые учитывают влияние основных воздействующих факторов на исследуемые НКА. Исследование коммутационного ресурса контактов было выполнено аналитическим и графико-аналитическим методом. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* На основании проведенных исследований установлено, что для повышения достоверности оценки параметров НКА может быть рекомендован графико-аналитический метод с учетом поправочных коэффициентов. Значение числа циклов коммутаций аппарата, после которого появление отказа наиболее вероятно, зависит от его коэффициента загрузки. Выявлено, что для исследуемых аппаратов по истечении 25% ресурса числа коммутаций вероятность безотказной работы становится ниже допустимого значения. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Результаты исследований показывают, что после 3-5 лет эксплуатации вероятность безотказной работы наблюдаемых НКА снизилась до значения менее 0,85. Полученные результаты рекомендуется учитывать при составлении графиков планово-предупредительного ремонта в электрических сетях внутрицехового электроснабжения.

**Ключевые слова:** низковольтная сеть; коммутационный аппарат; надежность; поправочный коэффициент; ресурс коммутации.

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

## IMPROVING THE ACCURACY OF ESTIMATION OF RELIABILITY PARAMETERS OF LOW-VOLTAGE SWITCHING DEVICES INSTALLED IN THE SYSTEMS OF IN- HOUSE POWER SUPPLY TAKING INTO ACCOUNT THE MAIN INFLUENCING FACTORS

Petrov A.R., Gracheva E.I., Abdullazyanov E.Yu.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

petroval13@mail.ru<sup>1</sup>

**Abstract:** *RELEVANCE.* The article investigates the issues of evaluating the reliability parameters of contacts of low-voltage switching devices (LWSD) installed in low-voltage electrical networks of power supply systems of industrial enterprises. *OBJECT.* To investigate the main parameters of reliability of LWSD contacts using the statistical method and to analyze the physical processes in the contact connections. *METHODS.* To improve the accuracy of determining the LWSD failure rate, it is proposed to introduce correction factors that take into account the influence of the main influencing factors on the studied LWSD. The study of the switching life of contacts was performed

by analytical and graphical-analytical methods. **RESULTS.** On the basis of the conducted researches it has been established that the graphical-analytical method with taking into account correction factors can be recommended to increase the reliability of LWS parameters estimation. The value of the number of switching cycles of the device, after which the occurrence of failure is most likely, depends on its loading factor. It is revealed that for the studied devices after expiration of 25% of the resource number of switching cycles the probability of failure-free operation becomes lower than the permissible value. **CONCLUSIONS.** The research results show that after 3-5 years of operation the probability of failure-free operation of the observed LWS decreased to the value less than 0.85. The obtained results are recommended to be taken into account when drawing up schedules of preventive maintenance in the electrical networks of in-house power supply.

**Keywords:** low-voltage network; switching device; reliability; correction factor; switching resource.

**For citation:** 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 in-house 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.

### **Введение (Introduction)**

Как известно, повреждение контактов большинства коммутационных электрических аппаратов, является одной из основных причин их выхода из строя [1-3]. Объясняется это конструктивными особенностями аппаратов и физическими процессами, протекающими в контактах при коммутации аппаратами силовых цепей [4-6]. Поэтому исследование и оценка параметров надежности аппаратов в эксплуатационных режимах, является в настоящее время, в условиях развития электротехнической промышленности России, актуальной задачей.

Надежность НКА может быть рассчитана при определении состава и интенсивности воздействия различных внешних и внутренних факторов в процессе работы на основные узлы и на оборудование в целом [7-9].

Оценку параметров надежности аппаратов проводят с использованием статистических данных по отказам [10, 11].

Одними из современных методов исследования и способов повышения надежности аппаратов являются:

- метод проектирования силы удержания контакта на основе динамического и статического моделирования и результатов экспериментальных испытаний [12];
- исследование возможностей оценки технического состояния электроконтактных соединений и прогнозирования их остаточного ресурса по результатам термографического обследования [13];
- моделирование силы трения скользящего электрического контакта при переменной нагрузке на основе анализа экспериментальных данных [14];
- использование защитного металлического покрытия для уменьшения износа деталей [15, 16];
- оценка надежности в режиме онлайн, которая определяет эрозию контакта в зависимости от электрической нагрузки при прогнозировании электрической долговечности [17];
- моделирование влияния перепадов напряжения на контактное сопротивление и на температуру контактных соединений низковольтного электрооборудования [18].

Эксплуатация аппарата, как известно, связана с нагревом контактов, обусловленным протекающим током. При этом повышается переходное сопротивление контактных соединений [19-21]. Допустимые превышения температуры контактов определяются условиями эксплуатации и зависят от температуры окружающей среды, давления, режима работы и применяемых материалов [22-24]. Нагрев контактных соединений происходит под воздействием различных источников теплоты, интенсивность которых меняется в зависимости от режима работы и загрузки аппарата [25-27]. Различные элементы аппаратов при протекании тока нагреваются неравномерно, поэтому температура контактных соединений обычно выше, чем температура прилегающих к нему проводников [28, 29].

Для оценки надежности коммутационных аппаратов выделим четыре основных состояния в режиме их эксплуатации:

- I – режим коммутации;
- II – режим работы при номинальных значениях;
- III – режим работы при аварийных ситуациях;
- IV – режим сохранения работоспособности при хранении.

Основными показателями надежности аппаратов при этом являются:

I – вероятность безотказной работы при коммутации с нагрузкой  $P_n(t)$  и без нагрузки  $P_{bn}(t)$ ; наработка на отказ при коммутации с нагрузкой  $T_n$  и без нагрузки  $T_{bn}$ ;

II – вероятность безотказной работы при эксплуатации аппарата с номинальными значениями  $P_{ном}(t)$ ; наработка на отказ  $T_{ном}$ ;

III – вероятность безотказной работы в режиме срабатывания защиты  $P_з(t)$ ; наработка на отказ  $T_з$ ;

IV – вероятность обеспечения безотказной эксплуатации при хранении  $P_x(t)$ ; наработка на отказ  $T_x$ .

В таблице 1 приведены основные показатели надежности для различных типов НКА.

Таблица 1

Table 1

Показатели надежности аппаратов  
Reliability indicators of the apparatus

| Тип аппарата               | I                   | II           | III      | IV       |
|----------------------------|---------------------|--------------|----------|----------|
| Автоматические выключатели | $P_n(t); P_{bn}(t)$ | $P_{ном}(t)$ | $P_з(t)$ | $P_x(t)$ |
|                            | $Q_n(t); Q_{bn}(t)$ | $Q_{ном}(t)$ | $Q_з(t)$ | $Q_x(t)$ |
|                            | $T_n; T_{bn}$       | $T_{ном}$    | -        | $T_x$    |
| Контакторы                 | $P_n(t); P_{bn}(t)$ | $P_{ном}(t)$ | -        | $P_x(t)$ |
|                            | $Q_n(t); Q_{bn}(t)$ | $Q_{ном}(t)$ | -        | $Q_x(t)$ |
|                            | $T_n; T_{bn}$       | $T_{ном}$    | -        | $T_x$    |
| Магнитные пускатели        | $P_n(t); P_{bn}(t)$ | $P_{ном}(t)$ | $P_з(t)$ | $P_x(t)$ |
|                            | $Q_n(t); Q_{bn}(t)$ | $Q_{ном}(t)$ | $Q_з(t)$ | $Q_x(t)$ |
|                            | $T_n; T_{bn}$       | $T_{ном}$    | -        | $T_x$    |
| Рубильники                 | $P_n(t); P_{bn}(t)$ | $P_{ном}(t)$ | -        | $P_x(t)$ |
|                            | $Q_n(t); Q_{bn}(t)$ | $Q_{ном}(t)$ | -        | $Q_x(t)$ |
|                            | $T_n; T_{bn}$       | $T_{ном}$    | -        | $T_x$    |
| Пакетные выключатели       | $P_n(t); P_{bn}(t)$ | $P_{ном}(t)$ | -        | $P_x(t)$ |
|                            | $Q_n(t); Q_{bn}(t)$ | $Q_{ном}(t)$ | -        | $Q_x(t)$ |
|                            | $T_n; T_{bn}$       | $T_{ном}$    | -        | $T_x$    |

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

### Материалы и методы (Materials and methods)

Надежность НКА, как известно, в основном зависит от уровня надежности электрических контактов. Отказы в контактных системах характеризуются загрязнением продуктами износа деталей подвижной части, уменьшением контактного давления ниже допустимого значения. Также отказы возникают из-за недостаточности зазоров между контактами, обусловленных деформациями контактных и возвратных пружин.

Надежность контактов характеризуется интенсивностью  $\lambda(k)$  и вероятностью безотказной работы  $P(k)$

$$P(k) = e^{-\int_0^k \lambda(k) dk} \quad (1)$$

где  $k$  – количество коммутаций.

При определении параметров надежности электрических контактов применяется показательный закон распределения, так как данный закон справедлив на небольшом интервале времени по сравнению с ресурсом долговечности самого аппарата, когда ещё незначительно сказывается старение материалов, но период приработки уже закончился. Поэтому выражение (1) упрощается

$$P(k) = e^{-\lambda k} \quad (2)$$

$\lambda(k)$  при графико-аналитическом методе исследования

$$\lambda(k) = -\frac{\ln P(k)}{t} = 2,3 \frac{-\lg P(k)}{t} \quad (3)$$

Графико-аналитический метод исследования – уравнение прямой, проходящей через начало координат под углом  $\alpha$  ( $\operatorname{tg} \alpha = \lambda/2,3$ ),  $\lambda(k)$  определяется произведением  $\operatorname{tg}$  угла наклона прямых с осью абсцисс и числа 2,3.

Если принять, что учет доверительных границ надежности не влияет на характер появления отказов, то преобразуем выражение (3)

$$-\lg[1 - Q(k)] = \frac{\lambda_r}{2,3} k$$

где  $P(k) = 1 - Q(k) = 1 - \frac{n}{N}$ ;

$n$  – количество отказавших аппаратов;

$N$  – общее количество аппаратов.

При аналитическом методе используем выражение

$$\lambda_a = \frac{n}{\sum_{i=1}^n k_i + (N - n) \cdot k}, 1/\text{цикл}$$

где  $k_i$  – количество коммутаций до момента отказа  $i$ -ого аппарата.

Для расчетов преобразуем выражение (5)

$$\lambda_a = \frac{n}{N \cdot k}, 1/\text{цикл}$$

При расчете  $\lambda$ , вне зависимости от метода исследования, введем поправочные коэффициенты, которые учитывают влияние основных воздействующих факторов на исследуемые аппараты. Коэффициенты характеризуют отклонения  $\lambda$  при изменениях условий эксплуатации от исходных значений.

Тогда  $\lambda$  аппаратов будет определяться как

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot b_3, 1/\text{цикл}$$

где  $\lambda_{0i}$  – начальное значение  $\lambda$ ;

$b_1$  – коэффициент, учитывающий загрузку и температуру нагрева контактов. Коммутационные аппараты эксплуатируются в режиме работы, близком к номинальному, поэтому значение коэффициента загрузки  $K_3 = [0; 1,2]$ .

$b_2$  – коэффициент, учитывающий механические воздействия (вибрации, удары и дребезг контактов) – для аппаратов промышленного назначения принимается – 2 (при температуре окружающей среды от 20 °С до 40 °С) [30];

$b_3$  – коэффициент, учитывающий отказы в процессе эксплуатации. Поправочный коэффициент учитывает основные виды отказов аппарата (износ контактов, залипание контактов и перегрев) от коэффициента загрузки.

Причина отказов в замыкающих контактах объясняется тем, что контактное усилие в процессе эксплуатации аппарата уменьшается активнее, чем у размыкающих контактов из-за износа подвижных деталей. Отказы в размыкающих контактах возникают за счет эрозии контактов из-за более длительного горения дуги.

Значения коэффициентов  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ , полученные в результате аппроксимации статистических данных, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Поправочные коэффициенты при определении  $\lambda$  аппаратов  
Correction factors for determining the  $\lambda$  of the apparatuses

| Тип аппарата               | $b_1$                                                  | $b_2$ | $b_3$ при загрузке аппарата |           |           |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|-------|-----------------------------|-----------|-----------|
|                            |                                                        |       | до 0,4                      | 0,4 – 0,8 | 0,8 – 1,2 |
| Автоматические выключатели | $b_1 = 0,3934 \cdot K_3^2 + 0,2701 \cdot K_3 + 0,7239$ | 2     | 0,2                         | 0,35      | 0,45      |
| Контакторы                 | $b_1 = 0,3054 \cdot e^{1,5938 \cdot K_3}$              |       | 0,25                        | 0,35      | 0,4       |
| Магнитные пускатели        | $b_1 = 0,3054 \cdot e^{1,5938 \cdot K_3}$              |       | 0,25                        | 0,35      | 0,4       |
| Рубильники                 | $b_1 = 0,4383 \cdot K_3^2 - 0,0226 \cdot K_3 + 0,7898$ |       | 0,2                         | 0,35      | 0,45      |
| Пакетные выключатели       | $b_1 = 0,4383 \cdot K_3^2 - 0,0226 \cdot K_3 + 0,7898$ |       | 0,2                         | 0,35      | 0,45      |

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

### Обсуждение результатов

Графико-аналитический метод определения  $\lambda(k)$  с учетом поправочных коэффициентов

$$\lambda_T = \frac{-2,3 \cdot \lg[1 - Q(t)]}{t} \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot b_3, \text{ 1/цикл} \quad (8)$$

Проведем расчет для автоматических выключателей

$$\lambda_T = \frac{-2,3 \cdot \lg\left[1 - \frac{79}{184}\right]}{8000} \cdot (0,3934 \cdot 1^2 + 0,2701 \cdot 1 + 0,7239) \cdot 2 \cdot 0,45 = 8,82 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

Без учета поправочных коэффициентов  $\lambda(k)$  для исследуемых автоматических выключателей

$$\lambda_T = \frac{-2,3 \cdot \lg\left[1 - \frac{79}{184}\right]}{8000} = 7,06 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

Минимальный объем выборки, достаточный для определения математического ожидания вероятности времени безотказной работы с заданной точностью и достоверностью определяется по выражению

$$V = \left( \frac{\tau \cdot \gamma \cdot 100}{\Delta} \right)^2 \quad (9)$$

где  $\tau$  – параметр, зависящий от необходимой достоверности;

$\gamma$  – коэффициент вариации.

$$\gamma = \frac{\sigma}{M} \quad (10)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;

$M$  – математическое ожидание.

Достоверность результатов исследования вероятности времени безотказной работы по минимальному объему выборки, возможна при вероятности, равной, 0,95 погрешность не должна превышать 5 %. Определим  $M$  и  $\sigma$  составив таблицу 3, где отражены данные  $P(k)$ .

Таблица 3

Table 3

Определение  $M$  и  $\sigma$   
Determination of  $M$  and  $\sigma$

| $k$  | $P(k)$ | $M(P)$ | $\sigma$ | $\sigma(P)$ |
|------|--------|--------|----------|-------------|
| 0    | 1      | 0,718  | 0,0791   | 0,156       |
| 400  | 0,9653 |        | 0,0608   |             |
| 800  | 0,9318 |        | 0,0454   |             |
| 1200 | 0,8995 |        | 0,0327   |             |
| 1600 | 0,8683 |        | 0,0224   |             |
| 2000 | 0,8382 |        | 0,0143   |             |
| 2400 | 0,8091 |        | 0,0082   |             |
| 2800 | 0,7811 |        | 0,0039   |             |
| 3200 | 0,7540 |        | 0,0012   |             |
| 3600 | 0,7278 |        | 0,0001   |             |
| 4000 | 0,7026 |        | 0,0003   |             |
| 4400 | 0,6782 |        | 0,0016   |             |
| 4800 | 0,6547 |        | 0,0041   |             |
| 5200 | 0,6320 |        | 0,0075   |             |
| 5600 | 0,6100 |        | 0,0118   |             |
| 6000 | 0,5889 |        | 0,0169   |             |
| 6400 | 0,5685 |        | 0,0226   |             |
| 6800 | 0,5487 |        | 0,0289   |             |
| 7200 | 0,5297 |        | 0,0357   |             |
| 7600 | 0,5113 |        | 0,0430   |             |
| 8000 | 0,4936 |        | 0,0507   |             |

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

В этом случае математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение вероятности времени безотказной работы будут принимать значения

$$M(P) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{P_i(k)}{n} \right] = \frac{1 + \dots + 0,4936}{21} = 0,718$$

$$\sigma(P) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i(k) - M(P))^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(1-0,718)^2 + \dots + (0,4936-0,718)^2}{20}} = 0,156$$

Определим объем выборки необходимый для обеспечения погрешности 5 %.

$$\gamma = \frac{0,156}{0,718} = 0,217$$

$$V = \left( \frac{2 \cdot 0,217 \cdot 100}{5} \right)^2 = 75,34 \approx 76$$

Следовательно, минимальный объем выборки, необходимый для показателей достоверности 95% составляет 76 автоматических выключателей, исследованное же количество единиц оборудования составило 184.

В таблице 4 приведены минимальные объемы выборки НКА для применения графико-аналитического метода исследования.

Таблица 4  
Table 4

| Определение минимального объема выборки аппаратов<br><i>Determination of the minimum sample size of the apparatus</i> |        |             |          |     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------|----------|-----|-----|
| Тип аппарата                                                                                                          | $M(P)$ | $\sigma(P)$ | $\gamma$ | $V$ | $N$ |
| Автоматические выключатели                                                                                            | 0,718  | 0,156       | 0,217    | 76  | 184 |
| Контакты                                                                                                              | 0,603  | 0,208       | 0,345    | 191 | 220 |
| Магнитные пускатели                                                                                                   | 0,645  | 0,190       | 0,294    | 139 | 196 |
| Рубильники                                                                                                            | 0,720  | 0,156       | 0,216    | 75  | 92  |
| Пакетные выключатели                                                                                                  | 0,740  | 0,146       | 0,197    | 63  | 85  |

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

Результаты таблицы 4 показывают достаточность выборки ( $N > V$ ) при исследовании  $\lambda$  НКА.

Определим доверительный интервал для  $\lambda$  с помощью таблицы  $\chi^2$ , где параметрами являются уровень значимости и число степеней свободы  $r$ .

$$r_1 = \frac{2n}{\chi^2[p(\varepsilon); 2n]} ; r_2 = \frac{2n}{\chi^2[1-p(\varepsilon); 2n]}$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{r_1} ; \lambda_{\varepsilon} = \frac{\lambda}{r_2}$$

Доверительный интервал для автоматических выключателей составит

$$r_1 = \frac{2 \cdot 79}{\chi^2[0,95; 2 \cdot 79]} = \frac{158}{129,94} = 1,21$$

$$r_2 = \frac{2 \cdot 79}{\chi^2[0,05; 2 \cdot 79]} = \frac{158}{188,33} = 0,84$$

$$\lambda_{\Gamma.Н} = \frac{\lambda}{r_1} = \frac{8,82 \cdot 10^{-5}}{1,21} = 7,26 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

$$\lambda_{\Gamma.В} = \frac{\lambda}{r_1} = \frac{8,82 \cdot 10^{-5}}{0,84} = 10,5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

По аналогии проведем расчет аналитическим методом  $\lambda(k)$  с учетом поправочных коэффициентов для автоматических выключателей

$$\lambda_a = \frac{n}{N \cdot k} \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot b_3, \text{ 1/цикл}$$

$$\lambda_a = \frac{79}{189 \cdot 8000} \cdot (0,3934 \cdot 1^2 + 0,2701 \cdot 1 + 0,7239) \cdot 2 \cdot 0,45 = 6,76 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

Без учета поправочных коэффициентов  $\lambda(k)$

$$\lambda_a = \frac{79}{189 \cdot 8000} = 5,37 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

В этом случае  $M(P) = 0,773$  и  $\sigma(P) = 0,129$ .

Определим объем выборки необходимый для обеспечения погрешности 5 %.

$$\gamma = \frac{0,129}{0,773} = 0,167$$

$$V = \left( \frac{2 \cdot 0,167 \cdot 100}{5} \right)^2 = 44,82 \approx 45$$

Следовательно, минимальный объем выборки, необходимый для показателей достоверности 95% составляет 45 автоматических выключателей, исследованное количество единиц оборудования составило 184.

Доверительный интервал составит

$$\lambda_{a.n} = \frac{\lambda}{n_1} = \frac{6,76 \cdot 10^{-5}}{1,21} = 5,56 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

$$\lambda_{a.v} = \frac{\lambda}{n_1} = \frac{6,76 \cdot 10^{-5}}{0,84} = 8,06 \cdot 10^{-5} \text{ 1/цикл}$$

В таблице 5 приведены результаты расчетов  $\lambda$  с учетом поправочных коэффициентов и их нижние и верхние доверительные границы.

Таблица 5

Table 5

Результаты исследования  $\lambda$  аппаратов

Results of the study of  $\lambda$  apparatuses

| Тип аппарата                  | k,<br>циклов | N,<br>шт | n,<br>шт | Графико-<br>аналитический<br>метод |                      |                      | Аналитический<br>метод |                      |                      |
|-------------------------------|--------------|----------|----------|------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
|                               |              |          |          | $\lambda_{\Gamma}$                 | $\lambda_{\Gamma.n}$ | $\lambda_{\Gamma.v}$ | $\lambda_a$            | $\lambda_{a.n}$      | $\lambda_{a.v}$      |
| Автоматические<br>выключатели | 8000         | 184      | 79       | $8,82 \cdot 10^{-5}$               | $7,26 \cdot 10^{-5}$ | $10,5 \cdot 10^{-5}$ | $6,76 \cdot 10^{-5}$   | $5,56 \cdot 10^{-5}$ | $8,06 \cdot 10^{-5}$ |
| Контакты                      | 800000       | 220      | 134      | $1,41 \cdot 10^{-6}$               | $1,21 \cdot 10^{-6}$ | $1,61 \cdot 10^{-6}$ | $9,13 \cdot 10^{-7}$   | $7,87 \cdot 10^{-7}$ | $1,04 \cdot 10^{-6}$ |
| Магнитные<br>пускатели        | 1000000      | 196      | 108      | $9,59 \cdot 10^{-7}$               | $8,13 \cdot 10^{-7}$ | $1,11 \cdot 10^{-6}$ | $6,61 \cdot 10^{-7}$   | $5,60 \cdot 10^{-7}$ | $7,69 \cdot 10^{-7}$ |
| Рубильники                    | 10000        | 92       | 44       | $7,02 \cdot 10^{-5}$               | $5,37 \cdot 10^{-5}$ | $8,84 \cdot 10^{-5}$ | $5,16 \cdot 10^{-5}$   | $3,86 \cdot 10^{-5}$ | $6,61 \cdot 10^{-5}$ |
| Пакетные<br>выключатели       | 5000         | 85       | 38       | $12,8 \cdot 10^{-5}$               | $9,57 \cdot 10^{-5}$ | $16,4 \cdot 10^{-5}$ | $9,66 \cdot 10^{-5}$   | $7,23 \cdot 10^{-5}$ | $12,4 \cdot 10^{-5}$ |

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

Графические зависимости по результатам расчетов для исследуемых аппаратов графико-аналитическим и аналитическим методами представлены на рисунках 1-5.

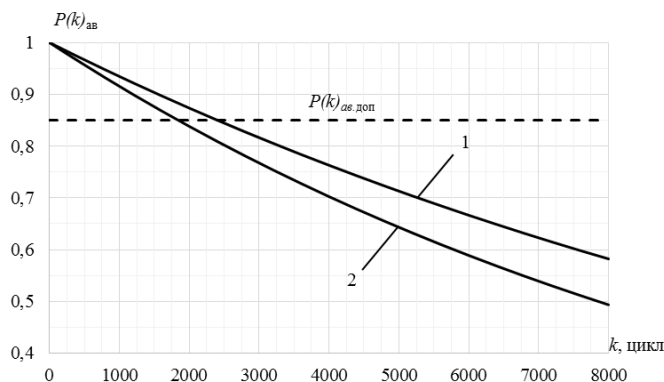


Рис. 1. Зависимость  $P(k)_{ав}$  с учетом поправочных коэффициентов для автоматических выключателей:

1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

Fig. 1. Dependence of  $P(k)_{ав}$  taking into account correction factors for circuit breakers:  
1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method

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

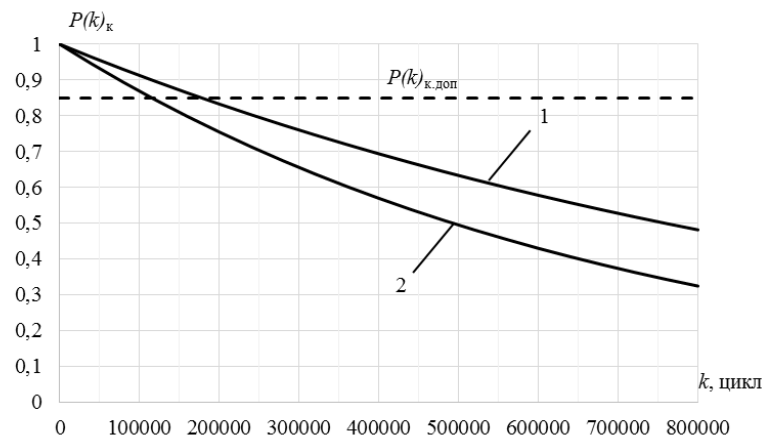


Рис. 2. Зависимость  $P(k)_к$  с учетом поправочных коэффициентов для контакторов:

1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

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

Fig. 2. Dependence of  $P(k)_к$  taking into account correction factors for contactors:

1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method

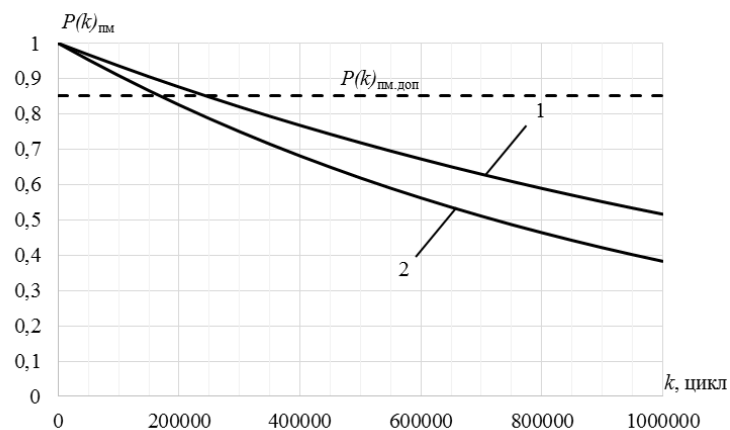


Рис. 3. Зависимость  $P(k)_пм$  с учетом поправочных коэффициентов для магнитных пускателей: 1 – аналитический метод;

2 – графико-аналитический метод

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

Fig. 3. Dependence of  $P(k)_пм$  taking into account correction factors for magnetic starters:

1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method

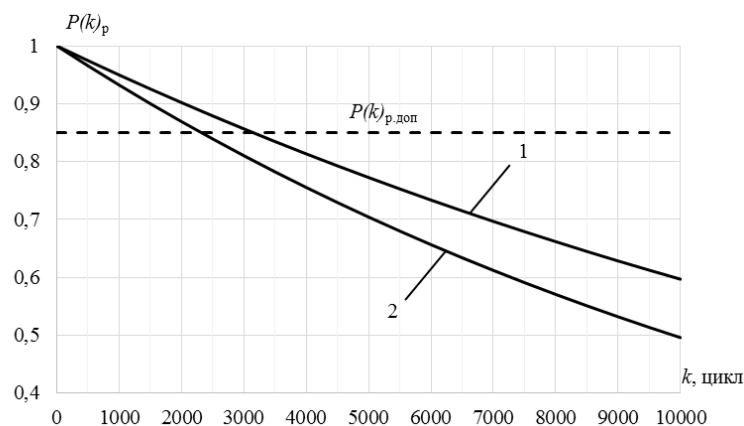


Рис. 4. Зависимость  $P(k)_р$  с учетом поправочных коэффициентов для рубильников:

1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

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

Fig. 4. Dependence of  $P(k)_р$  taking into account correction factors for switchgear:

1 – analytical method; 2 – graphical-analytical method



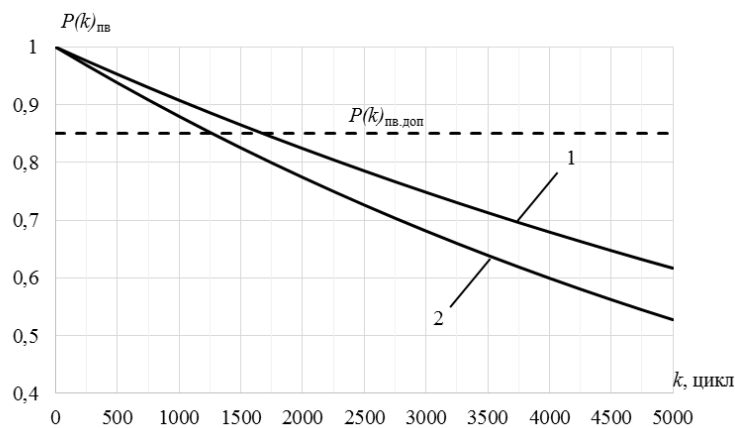


Рис. 5. Зависимость  $P(k)_{пв}$  с учетом поправочных коэффициентов для пакетных выключателей: 1 – аналитический метод; 2 – графико-аналитический метод

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

На основании полученных графиков (рисунки 1-5) и статистических данных можно сделать вывод о том, что наиболее достоверным методом исследования надежности контактов является графико-аналитический метод с учетом поправочных коэффициентов. Метод позволяет проводить исследования параметров надежности НКА при условии, что число отказов возникает не равномерно на всем сроке эксплуатации аппарата. Таким образом, предлагаемый метод позволяет повысить точность определения параметров надежности путем исследования различных режимов коммутации аппаратов.

В таблице 6 показаны контрольные точки показателя  $P(k)$  при исследовании графико-аналитическим методом.

Таблица 6

Table 6

Коммутационный ресурс аппаратов  
Switching life of devices

| Аппараты                   | $P(k)$ |        |        |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                            | 10 %   | 25 %   | 50 %   | 75 %   | 100 %  |
| Автоматические выключатели | 0,9318 | 0,8382 | 0,7025 | 0,5888 | 0,4936 |
| Контакты                   | 0,8935 | 0,7546 | 0,5695 | 0,4298 | 0,3243 |
| Магнитные пускатели        | 0,9084 | 0,7866 | 0,6188 | 0,4868 | 0,3829 |
| Рубильники                 | 0,9322 | 0,8391 | 0,7040 | 0,5907 | 0,4957 |
| Пакетные выключатели       | 0,9380 | 0,8523 | 0,7264 | 0,6192 | 0,5277 |

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

Данные таблицы 6 показывают, что при достижении 25% ресурса коммутации  $P(k)$  большинства НКА становится ниже допустимого значения ( $P(k)_{доп} = 0,85$ ) согласно ГОСТ 12434-83 «Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия».

Определим погрешности при неучете поправочных коэффициентов при определении  $\lambda(k)$ ,  $P(k)$  и  $Q(k)$ . В таблице 7 показаны погрешности от неучета поправочных коэффициентов при определении основных параметров надежности графико-аналитическим методом.

Таблица 7

Table 7

Погрешности при определении параметров надежности при графико-аналитическом методе  
Errors in determining reliability parameters using the graphical-analytical method

| Тип аппарата               | $\delta_{\lambda}$ , % | $\delta_P$ , % | $\delta_Q$ , % |
|----------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| Автоматические выключатели | -20,6                  | +7,6           | -16,9          |
| Контакты                   | -16,7                  | +10,0          | -12,3          |
| Магнитные пускатели        | -16,7                  | +8,5           | -12,8          |
| Рубильники                 | -7,4                   | +2,7           | -5,9           |
| Пакетные выключатели       | -7,4                   | +2,4           | -6,0           |

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

В таблице 7:

$\delta_\lambda$  – погрешность при определении  $\lambda(k)$ ;

$\delta_P$  – погрешность при определении  $P(k)$ ;

$\delta_Q$  – погрешность при определении  $Q(k)$ .

Диапазон числа коммутаций аппарата, в пределах которого появление отказа наиболее вероятно, зависит от типа отказа и от коэффициента загрузки. Фактический ресурс контактных соединений ограничивается числом коммутаций с учетом верхней и нижней границы доверительного интервала.

Определим ресурс эксплуатации коммутационных аппаратов. На рисунке 6 представлены сравнительные графические зависимости  $P(t)$  исследуемых аппаратов от срока эксплуатации с учетом поправочных коэффициентов  $b_1, b_2, b_3$ .

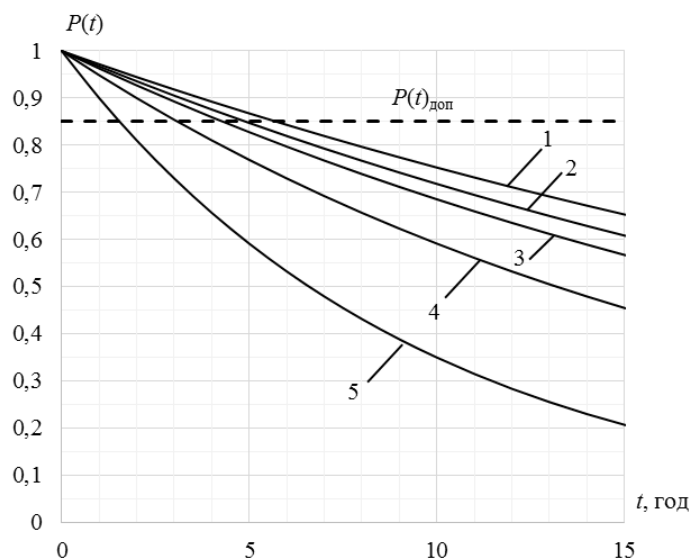


Рис. 6. Зависимость  $P(t)$  с учетом поправочных коэффициентов:

1 – пакетные выключатели; 2 – автоматические выключатели; 3 – рубильники; 4 – магнитные пускатели; 5 – контакторы

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

Fig. 6. Dependence  $P(t)$  taking into account correction factors:

1 - packet switches; 2 - circuit breakers; 3 - switchgear; 4 - magnetic starters; 5 - contactors

В таблице 8 представлены результаты расчетов  $P(t)$  исследуемых аппаратов от срока эксплуатации.

Таблица 8  
Table 8

Результаты расчетов  $P(t)$  коммутационных аппаратов  
Calculation results  $P(t)$  of switching devices

| Аппараты                   | t, год |        |        |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                            | 1      | 3      | 5      | 10     | 15     |
| Автоматические выключатели | 0,9674 | 0,9054 | 0,8473 | 0,7179 | 0,6083 |
| Контакты                   | 0,9002 | 0,7295 | 0,5912 | 0,3495 | 0,2066 |
| Магнитные пускатели        | 0,9488 | 0,8541 | 0,7689 | 0,5912 | 0,4545 |
| Рубильники                 | 0,9629 | 0,8927 | 0,8277 | 0,6852 | 0,5672 |
| Пакетные выключатели       | 0,9720 | 0,9183 | 0,8676 | 0,7527 | 0,6531 |

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

Большинство НКА имеет срок службы, согласно паспортным данным, равный, не менее 8-10 лет. Результаты статистических данных при определении основных параметров надежностей свидетельствуют, что при достижении аппаратом срока эксплуатации 3-5 лет  $P(t)$  снижается до значения 0,85, что требует замены аппарата. Погрешность от неучета поправочных коэффициентов при этом составляет 20% при определении  $\lambda(t)$  и  $P(t)$ , при определении  $Q(t)$  погрешность равна, примерно, 17%.

### Заключение (Conclusions)

Проведенные исследования показывают, что при наблюдаемых фактических режимах эксплуатации НКА необходим контроль их технического состояния, а также своевременная замена или ремонт до появления первых отказов. На предприятиях промышленной отрасли необходимо повышать уровень автоматизации процессов контроля качества и надежности контактов. Полученные результаты следует учитывать при составлении графиков планово-предупредительного ремонта.

Наиболее точным методом исследования параметров надежности НКА в зависимости количества цикла коммутации контактов является графико-аналитический метод с учетом поправочных коэффициентов. Неучет поправочных коэффициентов приводит к погрешности до 20,6% при определении  $\lambda(k)$ , до 10% при определении  $P(k)$  и 16,9% при определении  $Q(k)$ .

Проведенное исследование показывает, что паспортный ресурс циклов коммутации аппаратов не всегда совпадает с эксплуатационным значением циклов коммутации.  $P(k)$  исследуемых НКА после использования 25% ресурса коммутации снижается до 0,85, что, согласно ГОСТ 12434-83, является недопустимым уровнем значения  $P(k)$  и требует замены аппарата.

Одним из методов определения параметров надежности НКА является уточнение числа циклов коммутации при котором наблюдается снижение паспортного значения вероятности времени безотказной работы. При этом предлагается учитывать физические процессы в контактах, а также проводить анализ статистических данных об отказах НКА.

### Литература

1. Абдул्लाязов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Логачева А.Г. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(3):3-13.
2. Воронин А. Е., Пешехонов Н. Е., Рыбаков В. В. К вопросу оценки надежности электроснабжения в структурно-сложных распределительных электрических сетях // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. №7. С. 125-133.
3. Будко П. А., Голунов М. В., Аллакин В. В. Повышение надежности средств радиосвязи автоматизированного радиоцентра за счет своевременного обнаружения их параметрических отказов в процессе функционального контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 204- 227. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.
4. Грачева Е. И., Садыков Р. Р., Хуснутдинов Р. Р., Алимова А. Н. Надежность и компоновка низковольтных распределительных устройств внутрицехового электроснабжения // Вестник КГЭУ. 2019. №1 (41). С. 3-9.
5. Ершов С. В., Демьянов Д. В. Построение математических моделей надежности системы электроснабжения предприятия // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. №12-1. С. 118-125.
6. Аполлонский С.М. Методика опытного определения восстанавливающейся прочности / С.М. Аполлонский, Ю.В. Куклев // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 235-239. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.235.
7. Петров А. Р. и др. Совершенствование методики оценки потерь электроэнергии во внутривзаводских электрических сетях. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 4. С. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.
8. Гулин С.В., Пиркин А.Г. Комплексный подход к оценке эффективности сложного электротехнологического оборудования на предприятиях АПК // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2 (67). – С. 145-154. doi: 10.24412/2078-1318-2022-2-145-154.
9. 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.
10. E. I. Gracheva, O. V. Naumov, A. V. Beloglazov, A. N. Gorlov and M. A. Mikhaylov, "Modeling the Reliability Characteristics of Contact Devices of Low-Voltage Grid," 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, Russia, 2020, pp. 84-87, doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281197.
11. W. Zhang, L. Qin, Y. Zhou, C. Yi and S. Li, "Reliability Assessment of Medium and Low Voltage Distribution Networks Considering Distributed Energy Sources," 2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS), Dali, China, 2023, pp. 271-275, doi: 10.1109/EEPS58791.2023.10257168.

12. N. Zhu, G. Zhai and Z. Guo, "Research on Contact Reliability Design of Electrical Connector Contact," 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), Zhangjiajie, China, 2019, pp. 155-160, doi: 10.1109/QR2MSE46217.2019.9021171.
13. Y. Lozanov, "Assessment of the Technical Condition of Electric Contact Joints Using Thermography," 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503060.
14. L. Hui, Z. Chen, F. Guo and G. Sun, "Modeling of the Friction Force in Sliding Electrical Contact with Mining Rules," 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, NM, USA, 2018, pp. 61-65, doi: 10.1109/HOLM.2018.8611778.
15. V. Romanov, A. Kazantsev and A. Batishchev, "Reducing Transient Resistance in Contact Connections of Electrical Installations in Oil Industry," 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 75-79, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906745.
16. Derevyankin P. G., Frolov V. Ya., Gorchakov S. L. Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039012>.
17. K. Li *et al.*, "Electrical Performance Degradation Model and Residual Electrical Life Prediction for AC Contactor," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 400-417, March 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.2966516.
18. Andrușcă M., Adam M., Burlica R., Munteanu A. [et al.]. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). Iasi, Romania, 2016. P. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781317>.
19. Călin M. D., Helerea E. Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips // International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). Bucharest, Romania, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756156>.
20. Deac C. N., Adam M., Andrușcă M., Dragomir A. Aspects regarding contact resistance measurement // 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.
21. Gheorghită C. M., Adam M., Andrușcă M., Munteanu A. [et al.]. About contact resistance of the electrical equipment // International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, Romania, 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.
22. Gonzalez D., Hopfeld M., Berger F., Schaaf P. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2018. Vol. 8, N 6. P. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.
23. Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M. Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2019. Vol. 9, N 1. P. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.
24. Kim K., Joo H. W., Bae C. Y., Choi J. [et al.]. 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker // 5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Kitakyushu, Japan, 2019. P. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.
25. Lyuminarskaja E. S., Lyuminarsky I. E. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Moscow, Russia, 2018. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.
26. Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014). Dresden, Germany, 2014. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.
27. Shin D., Golosnoy I. O., Bull T. G., McBride J. W. Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices // 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST). Xi'an, China, 2017. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.
28. Shin D., McBride J. W., Golosnoy I. O. Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices // IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque, NM, USA, 2018. P. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.
29. Ye Z., Liu S., Zhao S. Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation // IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI). Changchun, China, 2023. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.

30. Луцкий В. А. Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры [Текст]: справочное издание / В. А. Луцкий. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев : Наук.думка, 1966. - 208 с.

#### Авторы публикации

**Петров Алмаз Радикович** – аспирант Казанского государственного энергетического университета. 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. ORCID\*: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. gracheva.i@bk.ru.

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

#### References

1. Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M., Logacheva A.G. Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(3):3-13. (In Russ.)
2. Voronin A.E., Peshekhonov N.E., Rybakov V.V. On the issue of assessing the reliability of power supply in structurally complex distribution electric networks. Izvestiya Tula State University, Technical sciences, 2020, no. 7, pp. 125-133. (In Russ.).
3. Budko P. A., Golyunov M. V., Allakin V. V. Improving the reliability of radio communication facilities of an automated radio center due to the timely detection of their parametric failures in the process of functional control. Systems of Control, Communication and Security, 2023, no. 2, pp. 204-227. (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-204-227.
4. Gracheva, E. I., Sadykov, R. R., Khusnutdinov, R. R., Alimova, A. N. Reliability and component of low-voltage displaying devices of internal electrical supply. KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN. 2019. 11(1(41)), pp. 3–9. (In Russian).
5. Ershov S. V., Demyanov D. V. Construction of mathematical models of reliability of the enterprise power supply system. Izvestiya Tula State University, Technical sciences, 2017, no. 12-1, pp. 118-125. (In Russ.).
6. Apollonsky S.M., Kuklev Y.V. Method of Restoring Strength Determination Test. Journal of Mining Institute. 2017. Vol.224, p. 235-239. (In Russian).
7. Petrov, A. R. et al. 2024. Improvement of the methodology for assessing power losses in in-plant power grids. Vestnik of MSTU, 27(4), pp. 511–520. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-4-511-520>.
8. Gulin, S.V. and Pirkin, A.G. (2022), "Integrated approach to evaluating the efficiency of complex electrotechnical equipment at AIC enterprises", Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University, vol.67, no. 2, pp. 145-154, (In Russ), doi: 10.24412/2078-1318-2022-2-145-154.
9. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-2-68-77>.
10. E. I. Gracheva, O. V. Naumov, A. V. Beloglazov, A. N. Gorlov and M. A. Mikhaylov, "Modeling the Reliability Characteristics of Contact Devices of Low-Voltage Grid," 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Ekaterinburg, Russia, 2020, pp. 84-87, doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281197.
11. W. Zhang, L. Qin, Y. Zhou, C. Yi and S. Li, "Reliability Assessment of Medium and Low Voltage Distribution Networks Considering Distributed Energy Sources," 2023 3rd International Conference on Energy Engineering and Power Systems (EEPS), Dali, China, 2023, pp. 271-275, doi: 10.1109/EEPS58791.2023.10257168.
12. N. Zhu, G. Zhai and Z. Guo, "Research on Contact Reliability Design of Electrical Connector Contact," 2019 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), Zhangjiajie, China, 2019, pp. 155-160, doi: 10.1109/QR2MSE46217.2019.9021171.
13. Y. Lozanov, "Assessment of the Technical Condition of Electric Contact Joints Using Thermography," 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, Bulgaria, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503060.
14. L. Hui, Z. Chen, F. Guo and G. Sun, "Modeling of the Friction Force in Sliding Electrical Contact with Mining Rules," 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, NM, USA, 2018, pp. 61-65, doi: 10.1109/HOLM.2018.8611778.

15. V. Romanov, A. Kazantsev and A. Batishchev, "Reducing Transient Resistance in Contact Connections of Electrical Installations in Oil Industry," *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 75-79, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906745.
16. Derevyankin P. G., Frolov V. Ya., Gorchakov S. L. Analysis of erosion processes of electrical contacts manufactured by plasma spraying technology // *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*. St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020. P. 622–625. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIconRus49466.2020.9039012>.
17. K. Li *et al.*, "Electrical Performance Degradation Model and Residual Electrical Life Prediction for AC Contactor," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 400–417, March 2020, doi: 10.1109/TCPMT.2020.2966516.
18. Andrușcă M., Adam M., Burlica R., Munteanu A. [et al.]. Considerations regarding the influence of contact resistance on the contacts of low voltage electrical equipment // *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. Iasi, Romania, 2016. P. 123–128. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781317>.
19. Călin M. D., Helerea E. Aspects regarding testing of electromagnetic contactors sensitivity to voltage dips // *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*. Bucharest, Romania, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISFEE51261.2020.9756156>.
20. Deac C. N., Adam M., Andrușcă M., Dragomir A. Aspects regarding contact resistance measurement // *8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2019.8759784>.
21. Gheorghită C. M., Adam M., Andrușcă M., Munteanu A. [et al.]. About contact resistance of the electrical equipment // *International Conference on Modern Power Systems (MPS)*. Cluj-Napoca, Romania, 2017. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MPS.2017.7974439>.
22. Gonzalez D., Hopfeld M., Berger F., Schaaf P. Investigation on contact resistance behavior of switching contacts using a newly developed model switch // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 8, N 6. P. 939–949. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2791839>.
23. Hadziefendic N., Kostic N., Trifunovic J., Kostic M. Detection of poor contacts in low-voltage electrical installations // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 9, N 1. P. 129–137. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2882626>.
24. Kim K., Joo H. W., Bae C. Y., Choi J. [et al.]. 3D simulation of air arc in the molded case circuit breaker // *5th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*. Kitakyushu, Japan, 2019. P. 239–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2019.8928799>.
25. Lyuminarskaja E. S., Lyuminarsky I. E. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on transition resistance // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Moscow, Russia, 2018. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728710>.
26. Ruempler C., Zacharias A., Stammberger H. Low-voltage circuit breaker arc simulation including contact arm motion // *The 27th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2014)*. Dresden, Germany, 2014. P. 1–5. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6857183>.
27. Shin D., Golosnoy I. O., Bull T. G., McBride J. W. Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low-voltage switching devices // *4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST)*. Xi'an, China, 2017. P. 213–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2017.8188830>.
28. Shin D., McBride J. W., Golosnoy I. O. Arc modeling to predict arc extinction in low-voltage switching devices // *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Albuquerque, NM, USA, 2018. P. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611712>.
29. Ye Z., Liu S., Zhao S. Design and implementation of the simulation system of low-voltage distribution network based on real-scene simulation // *IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*. Changchun, China, 2023. P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10177008>.
30. Lutskiy V. A. Calculation of reliability and efficiency of radio-electronic equipment [Text]: reference edition / V. A. Lutskiy. - 2nd ed., rev. and supplement. - Kiev: Nauk.dumka, 1966. - 208 pp.

#### Authors of the publication

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

© Петров А.Р., Грачева Е.И., Абдуллазянов Э.Ю.

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

**Edvard Yu. Abdullazyanov** – Kazan State Power Engineering University.

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

**Получено** **24.02.2025 г.**

**Отредактировано** **03.03.2025 г.**

**Принято** **27.03.2025 г.**