

# АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СХЕМ ЦЕХОВЫХ СЕТЕЙ

В статье представлена классификация предохранителей, рубильников, автоматических и пакетных выключателей. Определены законы изменения вероятностных характеристик надежности исследуемых аппаратов, а также кабельных линий низкого напряжения. Определены виды функций изменения основных параметров надежности и показаны соответствующие графические зависимости. Проведено сравнение полученных результатов значений вероятности времени безотказной работы с требованиями ГОСТ и паспортными данными. Исследуемые вероятностные параметры низковольтных аппаратов и кабельных линий проверены на соответствие принятому закону распределения случайных величин.

**Ключевые слова:** система внутрицехового электроснабжения, вероятность времени безотказной работы, вероятность времени отказа, предохранитель, рубильник, автоматический выключатель, пакетный выключатель, кабельная линия.

**Введение.** В настоящее время, с развитием новых типов оборудования [1, 2], целесообразной становится разработка и уточнение имеющихся алгоритмов определения вероятностных параметров оборудования систем внутрицехового электроснабжения. В современных условиях, как правило, при отказах электроустановок производят их замену, а не проводят ремонты [3].

При этом актуальной является разработка алгоритмов и моделей для увеличения достоверности вероятностных оценок параметров надежности электроустановок и повышения качества эксплуатации систем внутрицехового электроснабжения [4, 5]. Как известно, режимы эксплуатации электрооборудования также влияют на надежность работы схем цеховых сетей [6, 7].

Научной новизной предлагаемой статьи является уточнение алгоритмов оценки надежности функционирования оборудования внутризаводского электроснабжения с использованием эксплуатационных данных [8–10].

Практическая значимость данной статьи состоит в разработке алгоритмов уточненной оценки характеристик надежности электроустановок низкого напряжения [11–13]. При этом проведен анализ расчетных и эксплуатационных данных исследуемой информации функциональных параметров работы и выхода из строя элементов оборудования цеховых сетей [14–16].

На рис. 1–4 представлена разработанная классификация основных характеристик предохраните-

лей, рубильников, автоматических и пакетных выключателей.

На рис. 5 приведена схема участка цеховой сети с установкой исследуемого электрооборудования:

- предохранителей ПР1–ПР4;
- рубильников Р1, Р2;
- автоматических выключателей АВ1–АВ5;
- пакетных выключателей ПВ1–ПВ5;
- кабельных линий КЛ1–КЛ11.

**Постановка задачи.** Для исследования проанализируем эксплуатационные характеристики низковольтных электроустановок:

- предохранителей ППН-33 (завода-изготовителя АО «Корневский завод низковольтной аппаратуры», Курская область, пгт Корнево);
  - рубильников РЕ19-41 («Курский электроаппаратный завод» (КЭАЗ), г. Курск);
  - автоматических выключателей ВА13 (КЭАЗ, г. Курск);
  - пакетных выключателей ПВ3-16 (ЕКФ, г. Москва);
- а также кабелей АВВГ-0,4 кВ (ЭКСПЕРТ-КАБЕЛЬ, г. Орел, г. Москва, г. Екатеринбург).

Вычислим значение вероятности времени безотказной работы —  $P(t)$  и значение вероятности времени появления отказа  $Q(t)$  [17]:

$$P(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{средн}} - t_u}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}, \quad (1)$$

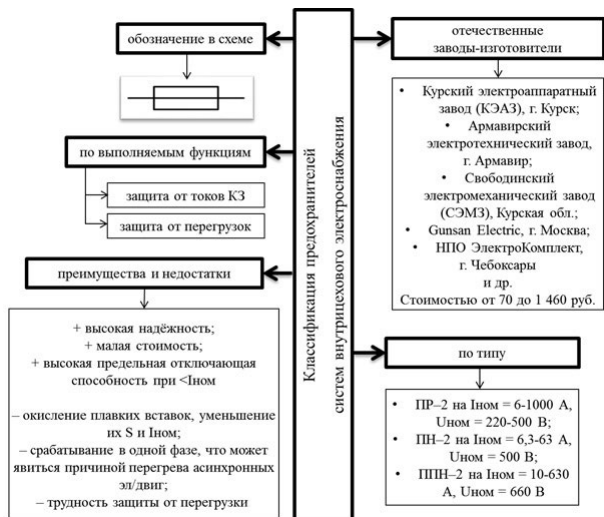


Рис. 1. Классификация низковольтных предохранителей систем внутризаводского электроснабжения

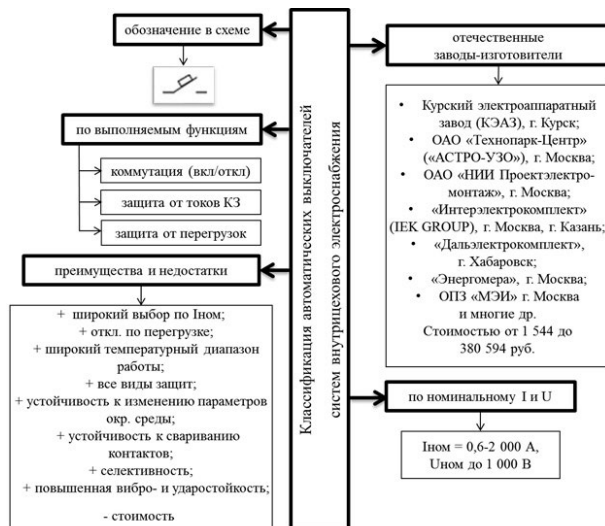


Рис. 3. Классификация автоматических выключателей систем внутризаводского электроснабжения

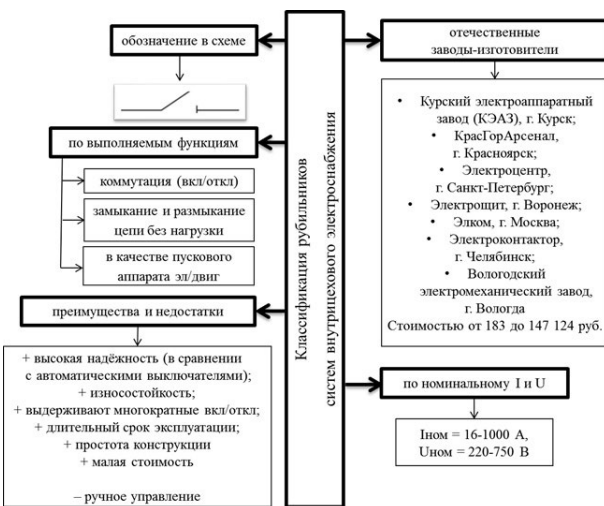


Рис. 2. Классификация рубильников систем внутризаводского электроснабжения

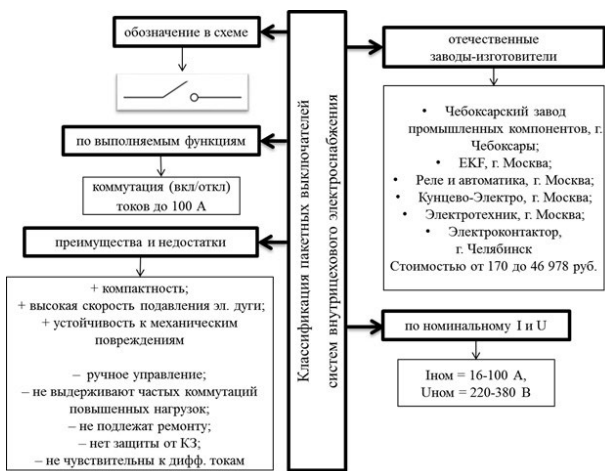


Рис. 4. Классификация пакетных выключателей систем внутризаводского электроснабжения

$$Q(t) = 1 - P(t) = \frac{\int_0^t e^{-\frac{(t_i - T_{срелн})^2}{2\sigma_{скв}^2}} dt}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{скв}}, \quad (2)$$

где  $t_u$  — значение времени экспериментального исследования, г.;

$T_{срелн}$  — значение среднего времени наработки до выхода из строя электрооборудования, г.;

$\sigma_{скв}$  — значение среднеквадратического отклонения времени наработки до выхода из строя, г.;

$F$  — значение функции Лапласа.

Экспериментальные значения величин функций  $P^*(t_i)$  и  $Q^*(t_i)$ :

$$P^*(t_i) = \frac{N_{общ} - n_{i,сум}(t)}{N_{общ}}, \quad (3)$$

$$Q^*(t_i) = 1 - P^*(t_i) = \frac{n_{i,сум}(t)}{N_{общ}}, \quad (4)$$

где  $n_{i,сум}(t)$  — суммарная величина вышедших из строя единиц оборудования, шт.;

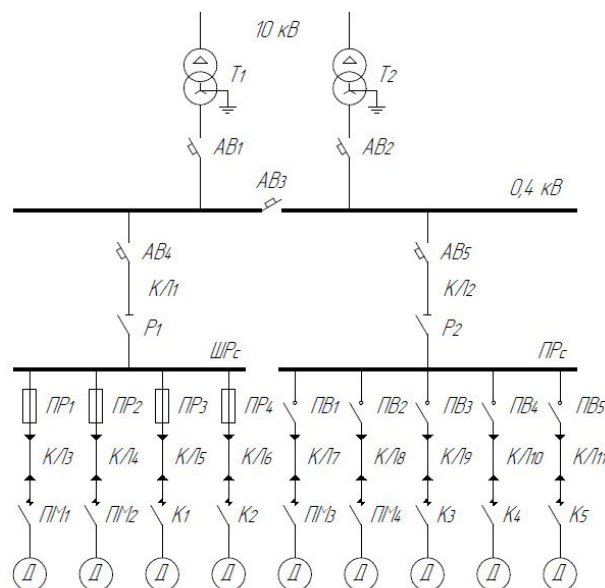


Рис. 5. Схема участка цеховой сети

$N_{\text{общ}}$  — значение суммарной величины исследуемых единиц оборудования, шт.

Для предохранителей ППН-33,  $I_{\text{ном}} = 2-160$  А значение времени исследования принимаем  $t_u = 16$  лет, число вышедших из строя единиц оборудования — 190, число наблюдаемых единиц оборудования — 281. Вычислим  $P_{np}^*(t_i)$  и  $Q_{np}^*(t_i)$ :

$$P_{np}^*(t = 1...4) = \frac{281-0}{281} = 1,000$$

$$Q_{np}^*(t = 1...4) = \frac{0}{281} = 0,000$$

$$P_{np}^*(t = 5) = \frac{281-1}{281} = 0,996$$

$$Q_{np}^*(t = 5) = \frac{1}{281} = 0,004$$

$$P_{np}^*(t = 6) = \frac{281-2}{281} = 0,993$$

$$Q_{np}^*(t = 6) = \frac{2}{281} = 0,007$$

$$P_{np}^*(t = 7) = \frac{281-4}{281} = 0,986$$

$$Q_{np}^*(t = 7) = \frac{4}{281} = 0,014$$

$$P_{np}^*(t = 8) = \frac{281-7}{281} = 0,975$$

$$Q_{np}^*(t = 8) = \frac{7}{281} = 0,025$$

Данные вычислений представлены в табл. 1. Тогда время средней наработки на отказ [17]:

$$\bar{T}_{\text{средн.нр}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{общ.нр}}} t_{i\text{нр}}}{N_{\text{общ.нр}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{общ.нр}}} n_{i\text{нр}} \cdot t_{\text{ср}i}}{N_{\text{общ.нр}}}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{общ.нр}}$  — общее число всех исследуемых предохранителей, шт.;

$n_{i\text{нр}}$  — величина отказавших предохранителей на  $i$ -ом интервале.

Не рассматривая первые 6 лет наблюдений (т.к. число вышедших из строя предохранителей за каждый год примерно равно нулю), вычислим величину среднеквадратического отклонения параметра времени безотказной работы [17]:

$$\sigma_{\text{сквнр}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(t_{i\text{нр}} - T_{\text{средн.нр}})^2}{t}}. \quad (6)$$

Таблица 1

Результаты исследования работоспособности предохранителей ППН-33 за интервал наблюдений = 16 годам

| Интервал наблюдений, $t_i$ , годы | Общее число аппаратов, шт.                       |   |                        | Значение функций распределения вероятностей по эксплуатационным данным        |                                |
|-----------------------------------|--|---|------------------------|---|--------------------------------|
|                                   | вышедших из строя за каждый год наблюдений $n_i$ | общее число неработоспособных $n_{i,\text{сум}}(t)$ | работоспособных, $I_i$ | $P_{np}^*(t_i)$   | $Q_{np}^*(t_i)$                |
|                                   |  |   |                        | $P_{np}^*(t_i) = \frac{N_{\text{общ}} - n_{i,\text{сум}}(t)}{N_{\text{общ}}}$ | $Q_{np}^*(t_i) = 1 - P^*(t_i)$ |
| 1                                 | 0  | 0   | 281                    | 1,000   | 0,000                          |
| 2                                 | 0  | 0   | 281                    | 1,000   | 0,000                          |
| 3                                 | 0  | 0   | 281                    | 1,000   | 0,000                          |
| 4                                 | 0  | 0   | 281                    | 1,000   | 0,000                          |
| 5                                 | 1  | 1   | 280                    | 0,996   | 0,004                          |
| 6                                 | 1  | 2   | 279                    | 0,993   | 0,007                          |
| 7                                 | 2  | 4   | 277                    | 0,986   | 0,014                          |
| 8                                 | 3  | 7   | 274                    | 0,975   | 0,025                          |
| 9                                 | 5  | 12  | 269                    | 0,957   | 0,043                          |
| 10                                | 8  | 20  | 261                    | 0,929   | 0,071                          |
| 11                                | 16   | 36  | 245                    | 0,872   | 0,128                          |
| 12                                | 22   | 58  | 223                    | 0,794   | 0,206                          |
| 13                                | 25   | 83  | 198                    | 0,705   | 0,295                          |
| 14                                | 31   | 114   | 167                    | 0,594   | 0,406                          |
| 15                                | 39   | 153   | 128                    | 0,456   | 0,544                          |
| 16                                | 37   | 190   | 91                     | 0,324   | 0,676                          |

Для предохранителей ППН-33:

$$\bar{T}_{\text{средн.нр}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{общ}}} n_{i, \text{нр}} \cdot t_{\text{средн.нр}}}{N_{\text{общ.нр}}} = \frac{7 \cdot 2 + 8 \cdot 3 + 9 \cdot 5 + 10 \cdot 8 + 11 \cdot 16 + 12 \cdot 22 + 13 \cdot 25 + 14 \cdot 31 + 15 \cdot 39 + 16 \cdot 37}{190} = \frac{2539}{190} = 13,3$$

$$\sigma_{\text{скв.нр}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(t_{i, \text{нр}} - T_{\text{средн.нр}})^2}}{n}} = \sqrt{\frac{\sqrt{(7-13,3)^2} + \sqrt{(8-13,3)^2} + \sqrt{(9-13,3)^2} + \sqrt{(10-13,3)^2} + \sqrt{(11-13,3)^2} + \sqrt{(12-13,3)^2} + \sqrt{(13-13,3)^2} + \sqrt{(14-13,3)^2} + \sqrt{(15-13,3)^2} + \sqrt{(16-13,3)^2}}{16}} = 3,1$$

Таким образом, по результатам вычислений  $\sigma_{\text{скв.нр}} = 3$  года;  $T_{\text{средн.нр}} = 13$  лет.

Теоретическая функция вероятности времени безотказной работы рассчитывается по формулам (1) – (2). Определим  $P_{\text{нр}}(t)$  и  $Q_{\text{нр}}(t)$  для предохранителей ППН-33:

$$P_{\text{нр}}(t = 1) = \frac{F(5,4)}{F(5,769)} = \frac{1,000}{1,000} = 1,000$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 1) = 0,000 ;$$

$$P_{\text{нр}}(t = 5) = \frac{F(3,8)}{F(5,769)} = \frac{1,000}{1,000} = 1,000$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 5) = 0,000 ;$$

$$P_{\text{нр}}(t = 7) = \frac{F(3,1)}{F(5,769)} = \frac{0,999}{1,000} = 0,999$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 7) = 1 - 0,999 = 0,001 ;$$

$$P_{\text{нр}}(t = 8) = \frac{F(2,7)}{F(5,769)} = \frac{0,996}{1,000} = 0,996$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 8) = 1 - 0,996 = 0,004 ;$$

$$P_{\text{нр}}(t = 9) = \frac{F(2,3)}{F(5,769)} = \frac{0,989}{1,000} = 0,989$$

$$Q_{\text{нр}}(t = 9) = 1 - 0,989 = 0,011 .$$

Таблица 2

Результаты оценок характеристик надежности для предохранителей ППН-33

| Интервал наблюдений, $t_i$ годы | Значение $\frac{T_{\text{средн}} - t}{\sigma_{\text{скв}}}$ | Значение функции $F\left(\frac{T_{\text{средн}} - t}{\sigma_{\text{скв}}}\right)$ | $\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}$ | $F\left(\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}\right)$ | Функция распределения  |                               |
|---------------------------------|---|---|--|--|--|-------------------------------|
|                                 |   |   |  |  | $P_{\text{нр}}(t)$   | $Q_{\text{нр}}(t)$            |
|                                 |   |   |  |  | $P_{\text{нр}}(t) = \frac{F\left(\frac{T_{\text{средн}} - t_i}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}{F\left(\frac{T_{\text{средн}}}{\sigma_{\text{скв}}}\right)}$ | $Q_{\text{нр}}(t) = 1 - P(t)$ |
| 1                               | 5,4   | 1,000   | 5,769  | 1,000  | 1,000  | 0,000                         |
| 2                               | 5,0   | 1,000   |  |  | 1,000  | 0,000                         |
| 3                               | 4,6   | 1,000   |  |  | 1,000  | 0,000                         |
| 4                               | 4,2   | 1,000   |  |  | 1,000  | 0,000                         |
| 5                               | 3,8   | 1,000   |  |  | 1,000  | 0,000                         |
| 6                               | 3,5   | 1,000   |  |  | 1,000  | 0,000                         |
| 7                               | 3,1   | 0,999   |  |  | 0,999  | 0,001                         |
| 8                               | 2,7   | 0,996   |  |  | 0,996  | 0,004                         |
| 9                               | 2,3   | 0,989   |  |  | 0,989  | 0,011                         |
| 10                              | 1,9   | 0,973   |  |  | 0,973  | 0,027                         |
| 11                              | 1,5   | 0,938   |  |  | 0,938  | 0,062                         |
| 12                              | 1,2   | 0,876   |  |  | 0,876  | 0,124                         |
| 13                              | 0,8   | 0,779   |  |  | 0,779  | 0,221                         |
| 14                              | 0,4   | 0,650   |  |  | 0,650  | 0,350                         |
| 15                              | 0,0   | 0,500   |  |  | 0,500  | 0,500                         |
| 16                              | -0,4  | 0,350   |  |  | 0,350  | 0,650                         |

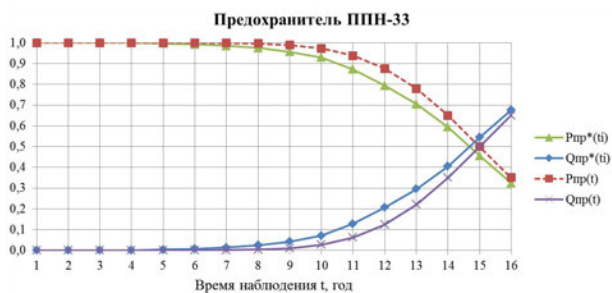


Рис. 6. Графические зависимости изменения во времени  $P_{пр}^*(t)$ ,  $Q_{пр}^*(t)$ ,  $P_{пр}(t)$ ,  $Q_{пр}(t)$  для предохранителей ППН-33

Данные вычислений приведены в табл. 2.

На рис. 6 даны графические зависимости изменения во времени  $P_{пр}^*(t)$ ,  $Q_{пр}^*(t)$ ,  $P_{пр}(t)$  и  $Q_{пр}(t)$  для предохранителей ППН-33.

**Результаты экспериментов.** По данным экспериментальных исследований и ГОСТ 17242-86, в интервале первых одиннадцати лет работы аппаратов (при паспортном сроке службы, равном десяти годам)  $P_{пр}(t)$  исследуемых предохранителей ППН-33 оценивается величиной, не менее 0,872, что показывает сохранение нормативных параметров в течение паспортного срока эксплуатации.

Таблица 3

Результаты исследований параметров отказов электрооборудования

| Тип и марка электроустановок    | Число неработоспособных $n$ , шт. | Общее число исследуемых образцов $N_{общ}$ , шт. | Интервал экспериментальных наблюдений $t_{наб}$ лет | Время средней наработки до отказа $T_{средн}$ лет | Значение среднеквадратического отклонения $\sigma_{ср}$ лет |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|---|
| Предохранитель ППН-33           | 190                               | 281  | 16  | 13  | 3   |
| Рубильник РЕ19-41               | 145                               | 162  | 23  | 20  | 3,6   |
| Автоматический выключатель ВА13 | 215                               | 281  | 15  | 13  | 2,5   |
| Пакетный выключатель ПВ3-16     | 117                               | 205  | 21  | 18  | 2,6   |
| Кабельная линия АВВГ-0,4 кВ     | 66                                | 73   | 35  | 30  | 1,6   |

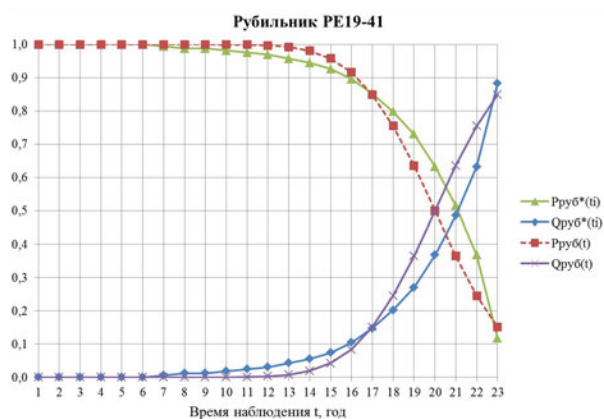


Рис. 7. Графические зависимости изменения во времени  $P_{руб}^*(t)$ ,  $Q_{руб}^*(t)$ ,  $P_{руб}(t)$ ,  $Q_{руб}(t)$  для рубильников РЕ19-41

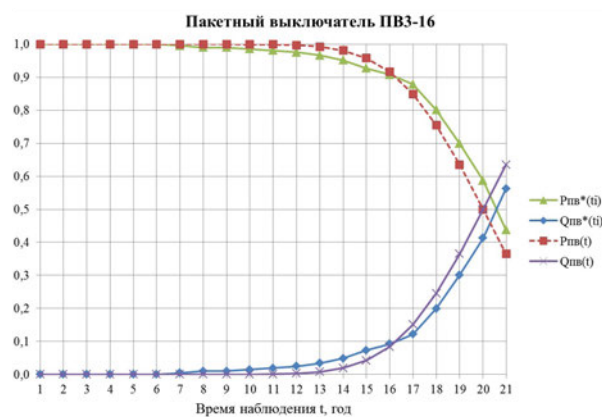


Рис. 9. Графические зависимости изменения во времени  $P_{пв}^*(t)$ ,  $Q_{пв}^*(t)$ ,  $P_{пв}(t)$ ,  $Q_{пв}(t)$  для пакетных выключателей ПВ3-16

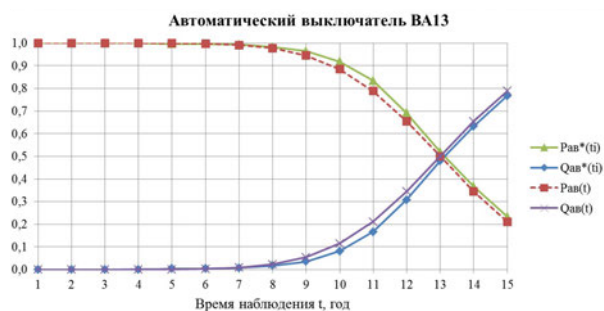


Рис. 8. Графические зависимости изменения во времени  $P_{ав}^*(t)$ ,  $Q_{ав}^*(t)$ ,  $P_{ав}(t)$ ,  $Q_{ав}(t)$  для автоматических выключателей ВА13

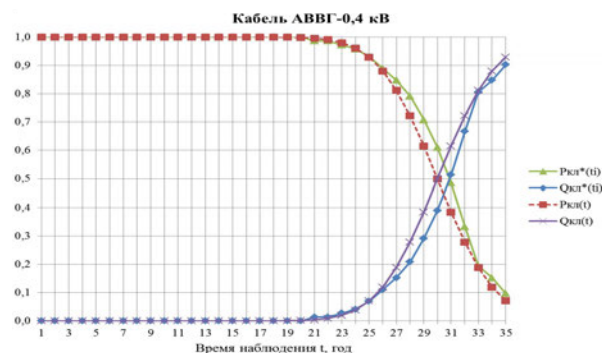


Рис. 10. Графические зависимости изменения во времени  $P_{кл}^*(t)$ ,  $Q_{кл}^*(t)$ ,  $P_{кл}(t)$ ,  $Q_{кл}(t)$  для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ



Результаты исследования параметров отказов электрооборудования представлены в табл. 3.

На рис. 7–10 представлены графики вероятностей времени безотказной работы и появления от-каза для:

- рубильников РЕ19-41 с  $I_{ном}$  до 1000 А;
- автоматических выключателей ВА13 с  $I_{ном} = 0,6–63$  А;
- пакетных выключателей ПВ3-16 с  $I_{ном} = 16–100$  А;

и кабелей АВВГ-0,4 кВ сечением  $S=2,5–240$  мм<sup>2</sup>.

Для рубильников РЕ19-41 интервал времени наблюдения равен  $t = 23$  года, число неработоспособных аппаратов за данный интервал — 145, общее число наблюдаемых — 162.

По данным экспериментальных исследований и ГОСТ 12434-83 в интервале первых пятнадцати лет работы (при паспортном сроке службы аппаратов, равном десяти годам)  $P_{рвс}(t)$  исследуемых рубильников РЕ19-41 оценивается величиной не менее 0,975, что показывает сохранение нормативных параметров в течение паспортного срока эксплуатации.

Для автоматических выключателей ВА13 время наблюдения принято равным 15 годам, количество отказавших элементов за данный интервал — 215, общее количество рассматриваемых элементов — 281.

Данные рис. 8 показывают, что, в соответствии с ГОСТ 12434-83 и ГОСТ 9098-78, вероятность безотказной работы автоматических выключателей ВА13 остается не ниже 0,8 в течение 11 лет, что подтверждает сохранение данного параметра для паспортного срока службы аппаратов, равного 10 годам.

Для пакетных выключателей ПВ3-16 интервал времени наблюдения составил  $t=21$  год, число неработоспособных за данный интервал — 117, общее число исследуемых — 205.

Для пакетных выключателей, по результатам исследований и по данным ГОСТ 12434-83  $P_{рв}(t)$ , оценивается величиной, равной не менее 0,908 в интервале первых шестнадцати лет работы (при паспортном значении 0,8), что показывает сохранение данного параметра допустимому значению для паспортного периода эксплуатации в пять лет).

Для кабелей АВВГ-0,4 кВ в интервале исследования  $t=35$  годам число неработоспособных линий составляет 66 при общем их числе, равном 73.

Для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ по результатам исследований и данным ГОСТ-12434-83  $P_{рв}(t)$  оценивается величиной не менее 0,847 в интервале первых 27 лет работы (при паспортном значении срока эксплуатации в 25 лет), что показывает соответствие данного параметра допустимой величине для нормативного периода эксплуатации.

**Алгоритм проверки установленного закона распределения исследуемых параметров электрооборудования.** Используя критерий Колмогорова, рассчитаем расхождение между теоретическими и экспериментальными данными  $D_n$ :

$$D_n = |Q_{np}(t_i) - Q_{np}(t)|. \quad (7)$$

Вычислим случайную величину:

$$y_n = D_n \sqrt{n} = |Q_{np}(t_i) - Q_{np}(t)| \cdot \sqrt{n}, \quad (8)$$

где  $n$  — число неработоспособных электроустановок за исследуемый период.

Рассчитаем расхождение результатов и случайную величину у 1...16 для предохранителей ППН-33:

$$D_{1,2,3,4} = |0,000 - 0,000| = 0,000$$

$$y_{1,2,3,4} = 0,000 \cdot \sqrt{190} = 0,000;$$

Таблица 4

Результаты проверки вероятности времени появления отказов предохранителей ППН-33 по критерию Колмогорова

| Интервал наблюдений, $t_i$ , годы | Экспериментальные результаты расчета $Q_{np}^*(t_i)$ | Теоретические результаты расчета $Q_{np}(t)$ | Расхождение $D_n =  Q_{np}^*(t_i) - Q_{np}(t) $ | Случайная величина $y_n = D_n \sqrt{n}$ | Значение функции $P(y_n)$ |
|-----------------------------------|--|--|---|---|---------------------------|
| 1                                 | 0,000  | 0,000  | 0,000   | 0,000                                   | 1,000                     |
| 2                                 | 0,000  | 0,000  | 0,000   | 0,000                                   | 1,000                     |
| 3                                 | 0,000  | 0,000  | 0,000   | 0,000                                   | 1,000                     |
| 4                                 | 0,000  | 0,000  | 0,000   | 0,000                                   | 1,000                     |
| 5                                 | 0,004  | 0,000  | 0,004   | 0,048                                   | 1,000                     |
| 6                                 | 0,007  | 0,000  | 0,007   | 0,094                                   | 1,000                     |
| 7                                 | 0,014  | 0,001  | 0,013   | 0,182                                   | 1,000                     |
| 8                                 | 0,025  | 0,004  | 0,021   | 0,294                                   | 0,999                     |
| 9                                 | 0,043  | 0,011  | 0,032   | 0,444                                   | 0,988                     |
| 10                                | 0,071  | 0,027  | 0,044   | 0,606                                   | 0,855                     |
| 11                                | 0,128  | 0,062  | 0,066   | 0,912                                   | 0,377                     |
| 12                                | 0,206  | 0,124  | 0,082   | 1,132                                   | 0,147                     |
| 13                                | 0,295  | 0,221  | 0,074   | 1,027                                   | 0,243                     |
| 14                                | 0,406  | 0,350  | 0,055   | 0,764                                   | 0,604                     |
| 15                                | 0,544  | 0,500  | 0,044   | 0,613                                   | 0,845                     |
| 16                                | 0,676  | 0,650  | 0,026   | 0,364                                   | 0,999                     |

$$D_5 = |0,004 - 0,000| = 0,004$$

$$y_5 = 0,004 \cdot \sqrt{190} = 0,048 ;$$

$$D_6 = |0,004 - 0,003| = 0,001$$

$$y_6 = 0,001 \cdot \sqrt{190} = 0,014 ;$$

$$D_7 = |0,007 - 0,000| = 0,007$$

$$y_7 = 0,007 \cdot \sqrt{190} = 0,094 ;$$

$$D_8 = |0,025 - 0,004| = 0,021$$

$$y_8 = 0,021 \cdot \sqrt{190} = 0,294.$$

В табл. 4 приведены результаты проверки функции вероятности времени появления отказов предохранителей ППН-33 по критерию Колмогорова.

Исключим три значения функции за 11 – 13 годы наблюдения, где  $P(y_n)$  имеет минимальные значения, т.е. расхождение экспериментальных и теоретических результатов расчета  $>0,066$ . Полученные результаты (табл. 4) показывают, что наименьшее допустимое значение функции  $P(y_n) = P(0,764) = 0,604$ . Другие значения  $>0,845$ , что является удовлетворительным условием ( $>0,8$ ) при определении вида закона распределения исследуемых случайных величин в результате сравнения экспериментальных и теоретических функций.

Критерий Пирсона (или критерий  $\chi^2$ ) [18] применяется для проверки гипотезы  $H$  о том, что случайная величина подчиняется нормальному закону распределения [19]. При  $\chi^2 > \chi^2_{табл}$  гипотезу  $H$  отвергают, при  $\chi^2 \leq \chi^2_{табл}$  — гипотезу принимают.

При проверке по критерию Пирсона ( $\chi^2$ ) воспользуемся формулой [18, 19]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Q^*(t_i) - Q(t))^2}{Q(t)}, \quad (9)$$

где  $Q^*(t_i)$  — экспериментальные результаты расчета;  $Q(t)$  — теоретические результаты расчета.

Исключив первые шесть значений, где  $Q_{np}(t) = 0$ , получаем:

$$\begin{aligned} \chi^2_{np} = & \sum_{i=7}^{16} \frac{(0,014 - 0,001)^2}{0,001} + \frac{(0,025 - 0,004)^2}{0,004} + \\ & + \frac{(0,043 - 0,011)^2}{0,011} + \frac{(0,071 - 0,027)^2}{0,027} + \\ & + \frac{(0,128 - 0,062)^2}{0,062} + \frac{(0,206 - 0,124)^2}{0,124} + \\ & + \frac{(0,295 - 0,221)^2}{0,221} + \frac{(0,406 - 0,350)^2}{0,350} + \\ & + \frac{(0,544 - 0,500)^2}{0,500} + \frac{(0,676 - 0,650)^2}{0,650} = 0,628 \end{aligned}$$

Распределение  $\chi^2_{np}$  определяется числом степеней свободы [19]:

$$s = n - z - 1, \quad (10)$$

где  $z$  — число параметров распределения.

Для предохранителей ППН-33:  $s = 10 - 2 - 1 = 7$ , где  $z = 2$ , так как вычислялось два параметра надежности: время безотказной работы и время по-

явления отказа. Далее по справочной таблице [19] определим  $\chi^2_{табл,np} = 2,17$  (для  $z = 2$ , вероятности 0,95).

$$\chi^2_{np} \leq \chi^2_{табл,np} (0,628 \leq 2,17)$$

При проверке по критерию Пирсона имеем  $\chi^2_{np} \leq \chi^2_{табл,np}$ , следовательно, выборочные данные наблюдений достоверны, соответствуют нормальному закону распределения и согласуются с фактическими данными. Нет оснований отвергать гипотезу  $H$  о нормальности распределения.

Нормальный закон распределения можно считать верно подобранным и оптимальным для расчетов вероятности времени безотказной работы и вероятности времени появления отказов электрооборудования.

**Заключение.** В представленной статье показана разработанная классификация основных низковольтных коммутационных аппаратов — предохранителей, рубильников, автоматических и пакетных выключателей. Целесообразнее использовать автоматические выключатели по высокому уровню надежности и выполняемым функциям, которые, в свою очередь, могут заменить систему предохранитель, рубильник, пакетный выключатель. Автоматические выключатели также имеют широкую область применения, выпускаются отечественной промышленностью в большом ассортименте на  $I = 0,6 - 2000$  А, универсальны и функциональны.

Определены закономерности изменения значений  $P_{np}^*(t_i)$ ,  $Q_{np}^*(t_i)$ ,  $P_{np}(t)$  и  $Q_{np}(t)$  для предохранителей ППН-33;  $P_{руб}^*(t_i)$ ,  $Q_{руб}^*(t_i)$ ,  $P_{руб}(t)$ ,  $Q_{руб}(t)$  для рубильников РЕ19-41;  $P_{AB}^*(t_i)$ ,  $Q_{AB}^*(t_i)$ ,  $P_{AB}(t)$ ,  $Q_{AB}(t)$  для автоматических выключателей ВА13;  $P_{nb}^*(t_i)$ ,  $Q_{nb}^*(t_i)$ ,  $P_{nb}(t)$ ,  $Q_{nb}(t)$  для пакетных выключателей ПВ3-16 и  $P_{ка}^*(t_i)$ ,  $Q_{ка}^*(t_i)$ ,  $P_{ка}(t)$ ,  $Q_{ка}(t)$  для кабельных линий АВВГ-0,4 кВ.

При этом полученные данные рекомендуется использовать для корректировки регламентов проведения текущего обслуживания и капитальных ремонтов электроустановок.

Установлено, что параметры надежности исследуемого электрооборудования цеховых сетей при фактических режимах эксплуатации соответствуют паспортным срокам службы.

Проведенная проверка исследуемых случайных величин показала, что теоретические и эмпирические функции параметров надежности подчиняются нормальному закону распределения.

По критерию Колмогорова: допустимое значение функции  $P(y_n) > 0,845$ , что является удовлетворительным условием ( $>0,8$ ) при определении вида закона распределения исследуемых случайных величин в результате сравнения экспериментальных и теоретических функций. По критерию Пирсона:  $\chi^2_{np} \leq \chi^2_{табл,np}$  ( $0,628 \leq 2,17$ ), следовательно, нет оснований отвергать проверяемую гипотезу о соответствии нормальному закону распределения параметров.

#### Библиографический список

1. Сафин А. Р., Петров Т. И., Копылов А. М. Метод проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник КГЭУ. 2020. № 2 (46). С. 45–53. EDN: EUUONN.
2. Petrov T. I., Safin A. R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. 01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801016.

3. Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Горлов А. Н. [et al.]. Исследование качества функционирования электрических аппаратов низкого напряжения в составе электротехнических комплексов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2021. № 6. С. 3–15. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15.
4. Абрамкин Р. В. Модель функционирования узла связи при отказах элементов системы электроснабжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 177–182. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-177-182.
5. Луковенко А. С., Зеньков И. В. Методы расчета надежности системы электроснабжения // Вестник ИрГТУ. 2021. № 1 (156). С. 57–65. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-57-65.
6. 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.
7. Бык Ф. Л., Какоша Ю. В., Мышкина Л. С. Фактор надежности при проектировании распределительной сети // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. № 6. С. 43–54. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-43-54.
8. Виноградов А. В., Большев В. Е., Виноградова А. В. [и др.]. Техничко-экономические способы повышения эффективности систем электроснабжения сельских потребителей // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 47. С. 59–67. EDN: CDLHP.
9. Грачева Е. И., Наумов О. В., Садыков Р. Р. [и др.]. Моделирование параметров функциональных характеристик цеховых сетей // Технические науки — от теории к практике. 2015. № 12 (48). С. 105–114. EDN: VDWRQZ.
10. Шпиганович А. Н., Шпиганович А. А., Квашнина Г. В. Обеспечение надежности функционирования систем электроснабжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 12-3. С. 27–33. EDN: XDEJPP.
11. Fotuhi-Firuzabad M., Afshar S., Farrokhzad D. [et al.]. Reliability centered maintenance program initiation on electric distribution networks // 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, Korea (South). 2009. P. 1–4. DOI: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356922.
12. Gono R., Rusek S., Kratky M. [et al.]. Reliability analysis of electric distribution system // 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.
13. Xiaoyan S., Hangtian X. Analysis on influence factors of the reliability of electric power communication networks // 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). 2016. P. 49–52. DOI: 10.1109/ICEICT.2016.7879650.
14. Садыков Р. Р. Оценка надежности низковольтных цеховых сетей промышленного электроснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 5-6. С. 98–108.
15. Конохова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий // Библиотечка электротехника: прил. к журн. «Энергетик». Вып. 12 (36). Москва: Энергопрогресс: Энергетик, 2001. 93 с.
16. Котеленко С. В. Интеллектуальные решения низковольтного оборудования распределительных сетей // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 12. С. 69–71. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-69-72.
17. Петрова Р. М., Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И. [и др.]. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15, № 1 (57). С. 93–105.
18. Грачева Е. И., Садыков Р. Р., Хуснутдинов Р. Р. [и др.]. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2019. № 1-2. С. 13–17.
19. Иванова В. М., Калинина В. Н., Нешумова Л. А. [и др.]. Математическая статистика. Москва: Высшая школа, 1981. 371 с.

**ПЕТРОВА Рената Маратовна**, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань.

SPIN-код: 3243-4727

Адрес для переписки: 1998renata@mail.ru

**ГРАЧЕВА Елена Ивановна**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» КГЭУ, г. Казань.

SPIN-код: 2676-5593

AuthorID (РИНЦ): 692465

ORCID: 0000-0002-5379-847X

AuthorID (SCOPUS): 57211789327

Адрес для переписки: grachieva.i@bk.ru

#### Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023 г.

© Р. М. Петрова, Е. И. Грачева



## ALGORITHMS FOR ESTIMATING THE MAIN RELIABILITY PARAMETERS OF LOW-VOLTAGE EQUIPMENT OF SHOP-FLOOR NETWORK SCHEMES

The article presents the classification of fuses, breakers, circuit breakers and packet switches. The laws of change of probabilistic reliability characteristics of the studied devices, as well as low-voltage cable lines are determined. Types of functions of change of basic reliability parameters are determined and corresponding graphical dependences are shown. The comparison of the obtained results of the values of probability of failure-free operation time with the requirements of GOST and passport data is carried out. The investigated probabilistic parameters of low-voltage devices and cable lines are checked for compliance with the accepted law of distribution of random variables.

**Keywords:** power supply system, probability of uptime, probability of failure time, fuse, breaker, circuit breaker, packet breaker, cable line.

### References

1. Safin A. R., Petrov T. I., Kopylov A. M. Metod proyektirovaniya i topologicheskoy optimizatsii rotorov sinkhronnykh dvigateley s postoyannymi magnitami [Method of design and topological optimization of rotors of synchronous motors with permanent magnets] // Vestnik KGEU. *Bulletin of KSEU*. 2020. No. 2 (46). P.45–53. EDN: EUUONN. (In Russ.).
2. Petrov T. I., Safin A. R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization [Modification of the synchronous motor model for topological optimization] // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 178. 01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017801016. (In Engl.).
3. Abdullazyanov E. Yu., Gracheva E. I., Gorlov A. N. [et al.]. Issledovaniye kachestva funktsionirovaniya elektricheskikh apparatov nizkogo napryazheniya v sostave elektrotekhnicheskikh kompleksov [Research of the quality of functioning of low-voltage electric devices as a part of electrical complexes] // Izvestiya vuzov. *Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021. No. 6. P. 3–15. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-3-15. (In Russ.).
4. Abramkin R. V. Model' funktsionirovaniya uzla svyazi pri otkazakh elementov sistemy elektrosnabzheniya [The model of the functioning of the communication node in case of failures of elements of the power supply system] // Izvestiya TulGU. *Tekhnicheskkiye nauki. Izvestiya TulGU. Technical Science*. 2021. No. 12. P. 177–182. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-177-182. (In Russ.).
5. Lukovenko A. S., Zenkov I. V. Metody rascheta nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Methods for calculating the reliability of power supply systems] // Bulletin of ISTU. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021. No. 1 (156). P. 57–65. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-57-65. (In Russ.).
6. Afanasyev P. A., Ivakhnenko A. G. Verifikatsiya metodov ispytaniy nizkovol'tnogo oborudovaniya [Verification of low-voltage equipment test methods Izvestiya Tula State University] // Izvestiya TulGU. *Tekhnicheskkiye nauki. Izvestiya TulGU. Technical Science*. 2021. No. 12. P. 343–348. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-343-349. (In Russ.).
7. Byk F. L., Kakosha Yu. V., Myshkina L. S. Faktor nadezhnosti pri proyektirovanii raspredelitel'noy seti [Reliability factor in the design of a distribution network Power engineering: research, equipment, technology] // Izvestiya vuzov. *Problemy energetiki. Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2020. No. 6. P. 43–54. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-43-54. (In Russ.).
8. Vinogradov A. V., Bol'shev V. E., Vinogradova A. V. [et al.]. Tekhniko-ekonomicheskiye sposoby povysheniya effektivnosti sistem elektrosnabzheniya sel'skikh potrebiteley [Technical and economic ways to improve the efficiency of power supply systems for rural consumers] // Vestnik agrarnoy nauki Dona. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2019. No. 47. S. 59–67. EDN: CDLIHP. (In Russ.).
9. Gracheva E. I., Naumov O. V., Sadykov R. R. [et al.]. Modelirovaniye parametrov funktsional'nykh kharakteristik tsekhovykh setey [Parameters modeling of functional characteristics of shopfloor nets] // Tekhnicheskkiye nauki — ot teorii k praktike. *Technical Sciences — from Theory to Practice*. 2015. No. 12 (48). P. 105–114. EDN: VDWRQZ. (In Russ.).
10. Shpiganovich A. N., Shpiganovich A. A., Kvashnina G. V. Obespecheniye nadezhnosti funktsionirovaniya sistem elektrosnabzheniya [Operational reliability of power systems with a combined connection of the element] // Izvestiya TulGU. *Tekhnicheskkiye nauki. Izvestiya TulGU. Technical Science*. 2016. No. 12-3. P. 27–33. EDN: XDEJPP. (In Russ.).
11. Fotuhi-Firuzabad M., Afshar S., Farrokhzad D. [et al.]. Reliability centered maintenance program initiation on electric distribution networks // 2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Seoul, Korea (South). 2009. P. 1–4. DOI: 10.1109/TD-ASIA.2009.5356922. (In Engl.).
12. Gono R., Rusek S., Kratky M. [et al.]. Reliability analysis of electric distribution system // 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2011.5874842. (In Engl.).

13. Xiaoyan S., Hangtian X. Analysis on influence factors of the reliability of electric power communication networks // 2016 IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT). 2016. P. 49–52. DOI: 10.1109/ICEICT.2016.7879650. (In Engl.).

14. Sadykov R. R. Otsenka nadezhnosti nizkovol'tnykh tsekhovykh setey promyshlennogo elektrosnabzheni [Valuation of reliability of low voltage commercial networks of industrial power supply] // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2017. No. 5-6. P. 98–108. (In Russ.).

15. Konyukhova E. A., Kireyeva E. A. Nadezhnost' elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Reliability of power supply of industrial enterprises] // Bibliotekha elektrotehnika. *Library of Electrical Engineering*. Issue 12 (36). Moscow, 2001. 93 p. (In Russ.).

16. Konyukhova E. A., Kireyeva E. A. Nadezhnost' elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Intelligent solutions for low-voltage equipment of distribution networks] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. *Izvestiya TulGU. Technical Science*. 2021. No. 12. P. 69–71. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-69-72. (In Russ.).

17. Petrova R. M., Abdullazyanov E. Yu., Gracheva E. I. [et al.]. Issledovaniye veroyatnostnykh kharakteristik nadezhnosti elektrooborudovaniya vnutritsekhovykh sistem elektrosnabzheniya [Study of probability characteristics of reliability of electrical equipment in internal power supply systems] // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2023. Vol. 15, no. 1 (57). P. 93–105. (In Russ.).

18. Gracheva E. I., Sadykov R. R., Khusnutdinov R. R. [et al.]. Issledovaniye parametrov nadezhnosti nizkovol'tnykh kommutatsionnykh apparatov po ekspluatatsionnym dannym promyshlennykh predpriyatiy [Investigation of the reliability

parameters of low-voltage switching devices according to the operational data of industrial enterprises] // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2019. No. 1-2. P. 13–17. (In Russ.).

19. Ivanova V. M., Kalinina V. N., Neshumova L. A. [et al.]. Matematicheskaya statistika [Mathematical statistics]. Moscow, 1981. 371 p. (In Russ.).

---

**PETROVA Renata Maratovna**, Graduate Student of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan.

SPIN-code: 3243-4727

Correspondence address: 1998renata@mail.ru

**GRACHEVA Elena Ivanovna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, KSPEU, Kazan.

SPIN-code: 2676-5593

AuthorID (RSCI): 692465

ORCID: 0000-0002-5379-847X

AuthorID (SCOPUS): 57211789327

Correspondence address: grachieva.i@bk.ru

#### For citations

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.

Received July 17, 2023.

© R. M. Petrova, E. I. Gracheva