



УДК 621.311

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ НИЗКОВОЛЬТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ДАННЫМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Е.И. Грачева<sup>1</sup>, Р.Р. Садыков<sup>2</sup>, Р.Р. Хуснутдинов<sup>1</sup>, Р.Э. Абдуллазянов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет, г.Казань, Россия

<sup>2</sup>Приволжские электрические сети, Филиал ОАО «Сетевая компания», Россия  
khrr@yandex.ru

**Резюме:** В статье представлен алгоритм оценки параметров надежности – вероятности времени работоспособного состояния электрических аппаратов на основании статистических данных об отказах автоматических выключателей, установленных в цепях управления и защиты таких потребителей, как компрессоры, насосы и вентиляторы на промышленных предприятиях. Исследованы теоретическая и статистическая функции вероятности безотказной работы автоматических выключателей в зависимости от срока и режимов эксплуатации. Определен вид распределения параметров надежности низковольтных аппаратов на примере автоматов ВА-57. Получены аналитические и графические зависимости основных показателей надежности.

**Ключевые слова:** статистический анализ, автоматический выключатель, магнитный пускатель, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

**DOI:**10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18.

**Для цитирования:** Грачева Е.И., Садыков Р.Р., Хуснутдинов Р.Р., Абдуллазянов Р.Э. Исследование параметров надежности низковольтных коммутационных аппаратов по эксплуатационным данным промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 10-18. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18.

## INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF RELIABILITY OF LOW VOLTAGE COMMUTATION DEVICES ON OPERATING DATA OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

E.I. Gracheva<sup>1</sup>, R.R. Sadykov<sup>2</sup>, R.R. Khusnutdinov<sup>1</sup>, R.E. Abdullazyanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan state power university, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Privolzhsky electrical networks, Branch of JSC "Grid Company"  
khrr@yandex.ru

**Abstract:** The article presents an algorithm for estimating reliability parameters - probability of failure-free operation time and failure rate of low-voltage switching devices based on statistical data on failures of circuit breakers installed in control and protection circuits of such consumers as compressors, pumps and fans in industrial enterprises. The theoretical and statistical functions of the probability of the failure-free operation time of automatic circuit breakers depending on the service life and the number of operation cycles have been investigated and a hypothesis has been

*put forward and confirmed on the normal distribution law of the random variable (probability of failure-free operation of automatic circuit breakers) using the "agreement criteria" - the Kolmogorov test and Pearson's criterion.*

**Keywords:** *automatic circuit breaker, magnetic starter, probability of failure-free operation, failure rate.*

**For citation:** *E.I. Gracheva, R.R. Sadykov, R.R. Khusnutdinov, R.E. Abdullazyanov. Investigation of the parameters of reliability of low voltage commutation devices on operating data of industrial enterprises. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2019. vol. 21. № 1-2. 10-18. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-10-18.*

### **Введение**

В системах промышленного электроснабжения низковольтные коммутационные аппараты (автоматические выключатели, магнитные пускатели и т.д.) являются массовыми элементами, к которым предъявляются высокие требования относительно показателей надёжности. В электрических системах внутризаводского электроснабжения для низковольтного оборудования характерны два общеизвестных вида отказов: как внезапных, так и износных. Для оценки работоспособности электрических аппаратов применяются проверки на механическую и электрическую стойкость выборочного числа образцов [1–3]. При испытании аппаратов возникают ситуации, когда определенная часть испытываемых образцов не отказала за период наблюдения. В таких случаях необходимо проводить статистический анализ выборок, для которых характерно отсутствие сведений о моментах отказа в части (или одного из) контролируемых объектов. Такое явление носит название цензурированных выборок, а данные, получаемые в результате испытаний выборки, называются цензурированными [4]. Отметим, что для таких выборок необходимо применять специфические методы оценки показателей надёжности и проверки статистических гипотез, которые, как правило, сложнее традиционных методов математической статистики. Особое значение анализ цензурированных выборок приобретает при оценке надёжности сложных и дорогостоящих технических устройств, а также изделий с дорогостоящими методами испытаний: именно к последним относятся коммутационные аппараты по причине продолжительности энергозатратности испытаний на износ [5–7]. При этом имеется возможность непосредственной оценки параметров и выявления вида закона надёжности по случайной выборке.

### **Исследование статистических данных об отказах низковольтных аппаратов**

Для анализа показателей надёжности в режимах эксплуатации использованы статистические данные Казанского промышленного предприятия ПАО «Органический синтез». Наблюдения ежегодно проводились за автоматами серии ВА-57.

Вероятность времени безотказности определяется по выражению

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (1)$$

где  $N_0$  – количество контролируемых образцов;  $n(t)$  – количество отказов элементов за рассматриваемый временной интервал [8].

В табл. 1 представлены результаты расчётов показателей надёжности автоматических выключателей по информации эксплуатационных служб.

Таблица 1

Результаты вычислений параметров надежности автоматов ВА-57

Номер $i$ -го интервала	Количество циклов, $z$	$\Delta t$ , ч	$n(\Delta t_i)$ , шт.	$\hat{P}(t)$	$\lambda(t)$ , ч <sup>-1</sup>
1	1500	0-17520	2	1	$0,040 \cdot 10^{-5}$
2	1250	17520-35040	2	0,98	$0,041 \cdot 10^{-5}$
3	1000	35040-52560	3	0,96	$0,062 \cdot 10^{-5}$
4	1000	52560-70080	4	0,95	$0,083 \cdot 10^{-5}$
5	1250	70080-87600	11	0,93	$0,236 \cdot 10^{-5}$
6	1100	87600-105120	25	0,9	$0,574 \cdot 10^{-5}$
7	1050	105120-122640	33	0,81	$0,858 \cdot 10^{-5}$
8	1000	122640-140160	39	0,7	$1,213 \cdot 10^{-5}$
9	1000	140160-157680	44	0,6	$1,769 \cdot 10^{-5}$
10	1000	157680-175200	54	0,47	$3,314 \cdot 10^{-5}$

На рис.1 показан график зависимости вероятности безотказности автоматов от времени эксплуатации и коммутационного ресурса.

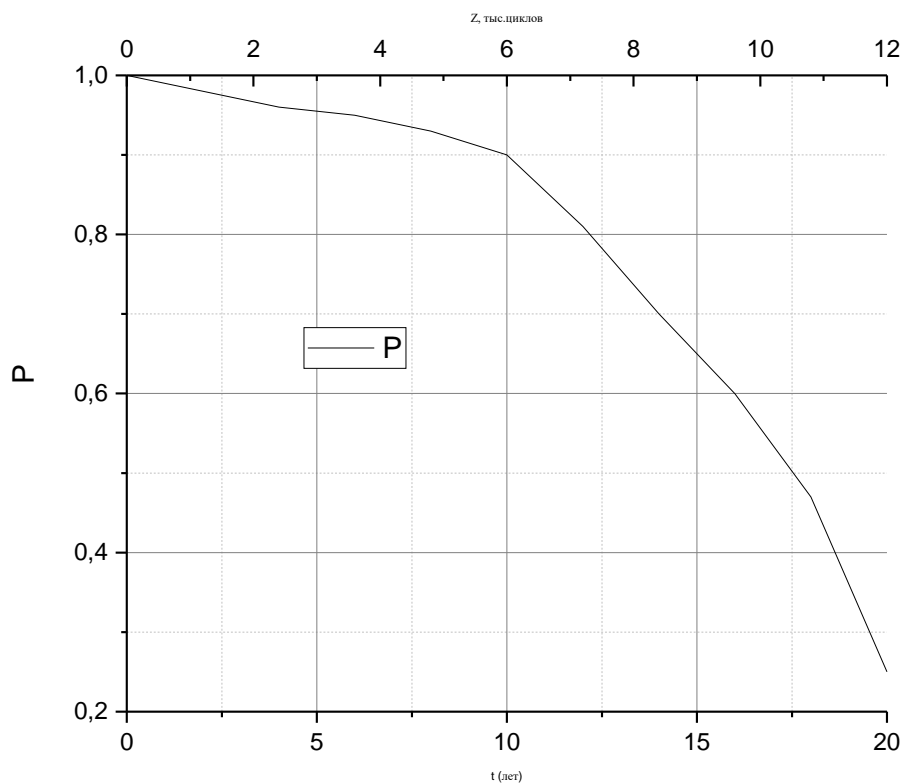


Рис.1. Зависимость вероятности безотказности работы автоматических выключателей от коммутационного ресурса и времени эксплуатации

Статистическая оценка интенсивности отказов имеет вид

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ср}} \cdot \Delta t_i}, \quad (2)$$

где  $n(\Delta t_i)$  – количество выхода из строя элементов на рассматриваемом временном интервале;  $N_{cp}$  – количество исправных элементов [9]. По полученным данным представлен график изменения интенсивности отказов  $\lambda(t)$  от отработанного ресурса автоматических выключателей ВА-57.

#### Исследование вида распределения показателей надежности автоматов В-57

По виду графиков на рис. 1 и 2 предполагаем нормальный вид распределения показателей надежности автоматов ВА-57 [10–11].

На рис. 3 показаны графики зависимости вероятности безотказности автоматов ВА-57 от срока работы, построенные по результатам расчетов и эксплуатационной информации. Из графиков видно, что в течение паспортного срока службы автоматов (10–12 лет), вероятность безотказной работы не снижается менее чем до значения  $P = 0,85$ , что соответствует ГОСТ на низковольтные коммутационные аппараты [9].

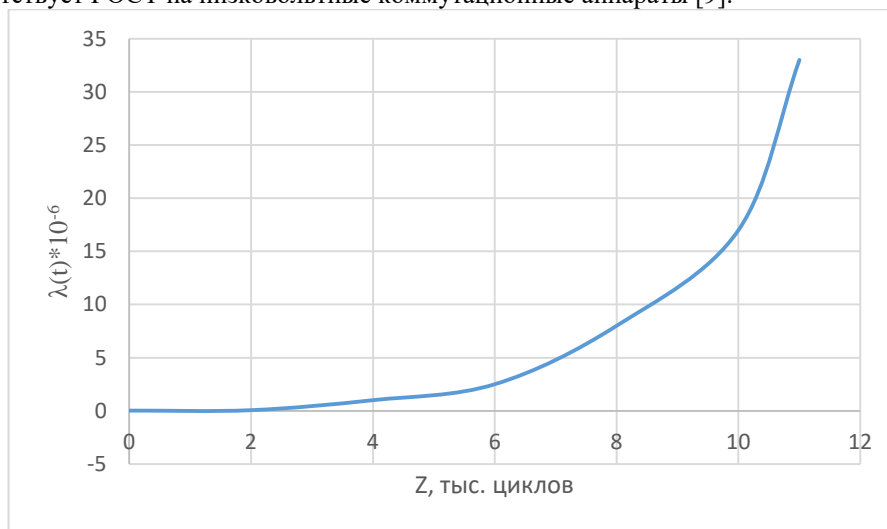


Рис. 2. График изменения  $\lambda(t)$  от отработанного ресурса автоматов ВА-57

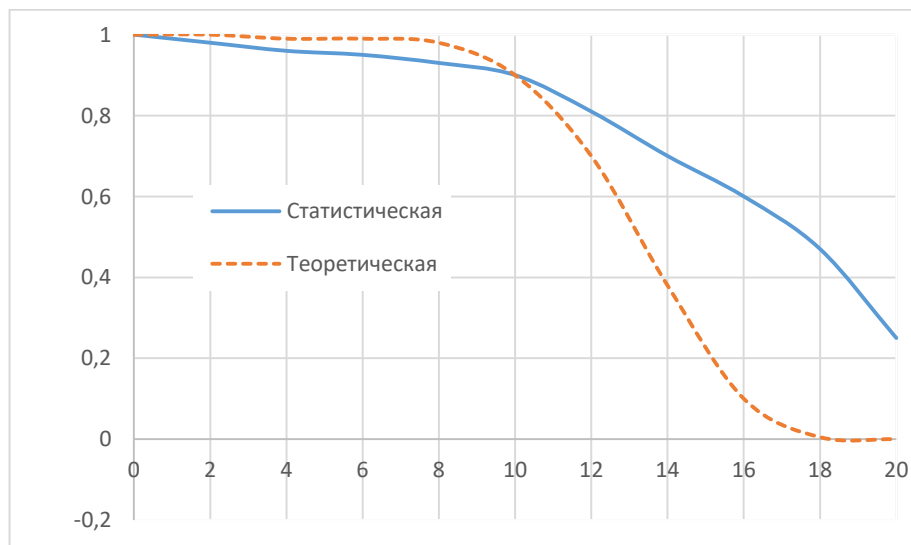


Рис. 3. Зависимость вероятности безотказной работы от времени эксплуатации для автоматических выключателей ВА-57

Для оценки несовпадения между видом теоретической зависимости и графиком, построенным по результатам эксплуатационных данных (рис. 3), используются критериальные положения Пирсона и Колмогорова [12–13]. Покажем применение нормального распределения для полученных значений эксплуатационной информации об отказах за наблюдаемыми элементами. Тогда плотность вероятности отказа и вероятности безотказной работы определяются следующим образом:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (4)$$

$$P(t) = 1 - Q(t), \quad (5)$$

где:  $m_t$  – мат ожидание ресурса до  $t_1$ ;  $\sigma$  – СКО ресурса от средней величины значения;  $T$  – рассматриваемый временной интервал испытаний.

Здесь  $\Phi$  – функция Лапласа.

Функция  $\Phi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$  табулирована в литературе [12].

Вероятность функции времени безотказности нормального закона распределения определяется

$$P(t) = \frac{\Phi\left(\frac{m_t - t}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{m_t}{\sigma}\right)}. \quad (6)$$

По информации энергетических служб ряда предприятий Казани: СКО наработки на отказ  $\sigma = 2,5 \text{ лет} = 21900 \text{ ч.}$ , величина среднего времени работоспособности составляет усредненную величину математического ожидания  $T_{\text{ср}} = m_t = 13 \text{ лет} = 113880 \text{ ч.}$  [14–15].

Подставим данные значения в выражение (6) для построения теоретической зависимости (рис.3). По критериальным положениям Колмогорова учитывается и оценивается наибольшая абсолютная величина разности между теоретической и опытной кривой.

Условие соответствия  $\Delta x > A(n, q)$  определяется формулой

$$\Delta x = \Delta F \sqrt{N}, \quad (7)$$

где  $\Delta F = \max |F^*(t) - F(t)|$  – максимальное расхождение между опытной и теоретической функциями [6];  $N$  – количество отказавших элементов.

Примем величину значимости  $\varepsilon$  равной 0,01 [8].

Из [8] следует:

$$A(N, \varepsilon) = A(10; 0,01) = 0,489.$$

Наибольшее расхождение между теоретической и опытной функциями происходит в период, равный 15-му году эксплуатации (рис. 3). Значение  $\Delta F$  при этом составляет:

$$\Delta F = \max |F^*(13140) - F(13140)| = 0,464,$$

где  $F^*(13140)$  – значение вероятности времени безотказности ВА-57 по эксплуатационной информации (1);  $F(13140)$  – значение вероятности времени безотказности ВА-57, вычисленное по выражению (6).

Подставим вычисленные данные в (7), найдем

$$\Delta x = 0,464 \cdot \sqrt{10} = 1,469 > 0,489.$$

Полученные результаты показали обоснованность применения нормального распределения для показателей надежности автоматов ВА-57.

Применение критериальных признаков  $\chi^2$  Пирсона позволяет найти меру расхождения:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta n_i - N p_i)^2}{N p_i}, \quad (8)$$

где  $k$  – количество интервалов экспериментального ряда;  $p_i$  – вероятность нахождения случайного параметра (вероятности времени безотказности) в  $i$ -ом интервале, полученная для теоретической кривой распределения;  $N$  – количество наблюдений.

Распределение  $\chi^2$  определяется числом степеней свободы:

$$s = k - z - 1, \quad (9)$$

где:  $z$  – количество определяемых параметров распределения.

Далее вычисляем промежуточные данные для расчета  $\chi^2$  (табл. 2). Тогда значения  $p_i$  соответствуют приращению функции распределения  $F(t)$  на  $i$ -ом интервале.

Таблица 2

Данные определения промежуточных значений

$F(t)$	$p_i$	$N p_i$	$(\Delta n_i - N p_i)^2$	$(\Delta n_i - N p_i)^2 / N p_i$
1,000	$4,498 \cdot 10^{-6}$	0,001	3,996	4094,136
1,000	$1,549 \cdot 10^{-4}$	0,034	3,867	115,257
0,998	0,002	0,397	6,776	17,070
0,979	0,019	4,055	0,003	0,001
0,885	0,094	20,484	89,939	4,391
0,698	0,186	40,462	239,082	5,909
0,359	0,399	73,573	1646,143	22,374
0,115	0,244	53,025	196,695	3,709
0,023	0,092	20,033	574,401	28,672
0,003	0,020	4,310	2469,132	572,933

По (8) вычисляем:

$$\chi^2 = 4094,136 + 115,257 + 17,070 + 0,001 + 4391 + 5,909 + 22,374 + 3,709 + 28,672 + 572,933 = 4864,452.$$

По определенному уровню значимости  $\varepsilon = 0,1$  по [8] находится  $\chi^2(N-1, \varepsilon) = \chi^2(9; 0,01) = 21,666$ . Сравнение  $\chi^2 > \chi^2(9; 0,01)$  показывает, что выборочные данные наблюдений соответствуют нормальному распределению и согласуются с фактическими данными.

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что анализ случайных выборок эксплуатационных данных об отказах низковольтной аппаратуры необходим для определения законов распределения параметров надежности. При этом в качестве исходной информации использованы эксплуатационные данные об отказах автоматических выключателей и выявлены зависимости изменения вероятности времени безотказности аппаратов от периода работы и ресурса аппаратов. Построены

теоретическая и статистическая функции вероятности безотказной работы аппаратов в зависимости от сроков эксплуатации и числа циклов срабатывания. Показано, что в течение паспортного срока эксплуатации автоматических выключателей (10–12 лет) вероятность безотказной работы аппаратов не снижается менее чем до  $P = 0,85$ , что соответствует действующему стандарту на низковольтные коммутационные аппараты ГОСТ 12434-83 «Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия». В результате обработки статистической информации об отказах определен вид распределения параметров надежности. По результатам статистических данных установлено, что после 17 лет эксплуатации вероятность безотказной работы автоматических выключателей составила 0,6, а к 20-му году эксплуатации снизилась до 0,2. По предлагаемому алгоритму проведены исследования для других видов низковольтных электрических аппаратов: магнитных пускателей, контакторов, предохранителей, пакетных выключателей и рубильников. При этом установлено, что среднее время наработки на отказ составляет: для магнитных пускателей и контакторов – 8 лет, для предохранителей 22 года, для рубильников и пакетных выключателей – 24 года. Режимы коммутаций для магнитных пускателей и контакторов – АС-3, АС-4. Наблюдения проводились за работой низковольтных аппаратов на ряде промышленных предприятий г. Казани. Отказы оборудования фиксировались ежегодно. Под наблюдением находилось около 250 образцов аппаратов каждого типа с различными номинальными токами. В результате вычислений и анализа установлено, что параметры надежности вышеперечисленных аппаратов подчиняются нормальному распределению. Проведенные исследования позволяют использовать данные результаты с целью корректировки сроков проведения планово-предупредительных ремонтов и своевременной замены низковольтного оборудования для повышения эффективности его эксплуатации.

#### Литература

1. Lei C., Tian W., Zhang Y., Jia R., Winter R. Probability-based circuit breaker modeling for power system fault analysis // Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 2017. - 7930815, pp. 979–984.
2. Tian Y., Zhang H. Research and Application of Risk Assessment for Power Equipment Based on Fault Feature Membership Function // Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus.- 2017.- 53(5), pp. 146–153.
3. Jia X., Yang D., Zheng W., Bi Y. Distribution network fault diagnosis method based on multi-factor hierarchical petri net // Dianwang Jishu/Power System Technology. - 2017.- 41(3), pp. 1015–1021.
4. Годжелло А.Г., Егоров Е.Г., Ращепкина Н.А., Иванова С.П. Статистический анализ надежности контактов магнитных пускателей в условиях малой выборки // Электротехника. 2002. № 2. С.37–40.
5. Кокс, Оукс. Анализ данных типа времени жизни. М.: Финансы и статистика, 1998.
6. Гук Ю.Б. и др. Теория и расчёт надёжности систем электроснабжения / под ред. Р.Я.Федосенко. М.: Энергия, 1970. 176 с.
7. Китушин В.Г. Надёжность энергетических систем. М.:Высшая школа, 1984.
8. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надёжность электроснабжения. Ростов-на-Дону: Терра Принт, 2017.
9. ГОСТ 12434-83. Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия. Юридическая фирма "Интернет и право". URL: <http://internet-law.ru/gosts/gost/29798/> (дата обращения: 13.04.2018).
10. Гук Ю.Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок. Л.:Энергоатомиздат, 1988. 565 с.
11. Дружинин Г.В. Надёжность устройств автоматики. М.:Наука, 1964, 565 с.
12. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения : учебное пособие для вузов.М.:Высшая школа, 2000.

13. Gracheva E.I., Naumov O.V. Evaluation criteria of contact group technical state concerning electrical appliances // International Journal of pharmacy and Technology. 2016. №4. P. 27084–27091.
14. Gracheva E.I., Naumov O.V. Operating Mode Influence on Probability Characteristics of Electric Devices // Journal of engineering and applied sciences. 2016. № 11 (special issue 1). P. 2934–2938.
15. Sadykov R.R. Naumov O.V. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters. 2015. № 24.P. 45324-45330.

#### Авторы публикации

**Грачева Елена Ивановна** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email: grachieva.i@bk.ru.

**Садыков Руслан Рустемович** – начальник отдела Приволжские электрические сети, филиала ОАО «Сетевая Коспания». E-mail: ru059@mail.ru.

**Хуснутдинов Рустем Рауфович** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: khrr@yandex.ru.

**Абдуллазянов Рустем Эдвардович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

#### References

1. Lei C., Tian W., Zhang Y., Jia R., Winter R. Probability-based circuit breaker modeling for power system fault analysis // Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC. 2017. – 7930815. P. 979–984.
2. Tian Y., Zhang H. Research and Application of Risk Assessment for Power Equipment Based on Fault Feature Membership Function // Gaoya Dianqi/High Voltage Apparatus. 2017. 53(5). P. 146–153.
3. Jia X., Yang D., Zheng W., Bi Y. Distribution network fault diagnosis method based on multi-factor hierarchical petri net // Dianwang Jishu/Power System Technology. 2017. 41(3). P. 1015–1021.
4. Godjello A.G., Egorov E.G. Rashepkina N.A., Ivanova S.P. Statistical analysis of reliability of contacts of magnetic starters in conditions of small sample // Elektrotehnika. 2002. №2. P.37–40.
5. Koks, Ouks. Analysis of life-time type data. M.: Finances and Statistic, 1998.
6. GukYu.B. et al. Theory and calculation of reliability of power supply systems, ed. RY Fedosenko. M.: Energy, 1970. 176 p.
7. Kitushin V.G. Reliability of energy systems. M.: Vyshaya shkola, 1984.
8. Khorol'skiy V.YA., Taranov M.A. Reliability of power supply. Rostov-na-Donu: TerraPrint, 2017.
9. GOST 12434-83. Devices switching low-voltage. General specifications // Law firm "Internet and Law" URL: <http://internet-law.ru/gosts/gost/29798/> (Date of circulation: 04.14.2018).
10. GukYu.B. Analysis of reliability of electric power plants. L.: Energoatomizdat, 1988, 565p.
11. Druzhinin G.V. Reliability of automation devices. M.: Nauka, 1964. 565 p.
12. Venttsel' Ye.S., Ovcharov L.A., Theory of stochastic processes and its engineering applications: a textbook for high schools. M.: Vyshaya shkola, 2000.
13. Gracheva E.I., Naumov O.V. Evaluation criteria of contact group technical state concerning electrical appliances // International Journal of pharmacy and Technology. 2016. №4. P.27084–27091.
14. Gracheva E.I., Naumov O.V. Operating Mode Influence on Probability Characteristics of Electric Devices // Journal of engineering and applied sciences. 2016. № 11 (special issue 1). P.2934–2938.
15. Sadykov R.R. Naumov O.V. Determination of resistance change dependence for contact connections of low-voltage devices according to their nominal parameters. 2015. № 24.P. 45324-45330.



**Authors of the publication**

***Elena I. Gracheva*** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

***Ruslan R. Sadykov*** – JSC "Grid Company".

***Rustem R. Khusnutdinov*** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

***Rustem E. Abdullazyanov***. – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

***Поступила в редакцию***

***07 мая 2018 г.***