

## ИЗМЕНЕНИЕ СРОКОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ МАЛОМАСЛЯНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

**Аннотация.** В настоящее время в связи с увеличением объемов грузоперевозок и существенным повышением массы поездов, когда в график движения включаются сдвоенные грузовые поезда массой 12000 тонн, значительно возрастают токовые нагрузки на выключатели фидеров контактной сети. Это приводит к преждевременному износу узлов выключателей, создает условия для частых коротких замыканий на фидерах контактной сети, что в свою очередь сокращает их коммутационный и механический ресурс. Такие условия приводят к увеличению количества отказов выключателей фидеров контактной сети.

В статье рассмотрены требования действующих нормативных документов по обслуживанию масляных выключателей фидеров контактной сети на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог. Выполнен статистический анализ отказов исследуемых выключателей за последние 20 лет на примере тяговых подстанций Восточно-Сибирской железной дороги. Результаты анализа показывают, что наиболее вероятен отказ указанных типов выключателей фидеров контактной сети в среднем через 6 лет.

Периодичность выполнения межремонтных испытаний, в ходе которых возможно установить наличие развивающегося дефекта какого-либо узла масляного выключателя, составляет согласно нормативной документации один раз в 12 лет. Анализ статистики отказов указывает на необходимость корректировки срока проведения межремонтных испытаний до одного раза в 6 лет. Это позволит предотвратить серьезные дефекты узлов масляных выключателей фидеров контактной сети, способные вызвать их отказы. Следовательно, надежность работы тяговых подстанций повысится, что приведет к повышению безопасности перевозочного процесса.

**Ключевые слова:** тяговая подстанция, масляные выключатели, фидеры контактной сети, периодичность сроков обслуживания.

## CHANGING THE TERMS OF MAINTENANCE OF LOW-OIL CIRCUIT BREAKERS OF THE CONTACT NETWORK FEEDERS

**Annotation.** Currently, due to the increase in freight traffic and a significant increase in the mass of trains, when double freight trains weighing 12,000 tons are included in the schedule, the current loads on the switches of the feeders of the contact network significantly increase. This leads to premature wear of the switch assemblies, creates conditions for frequent short circuits on the feeders of the contact network, which in turn reduces their switching and mechanical life. Such conditions lead to an increase in the number of failures of the feeders of the contact network. The article considers the requirements of the current regulatory documents for the maintenance of oil circuit breakers of contact network feeders at traction substations of electrified railways. A statistical analysis of the failures of the studied switches over the past 20 years has been performed on the example of traction substations of the East Siberian Railway. The results of the analysis show that the failure of these types of feeder switches of the contact network is most likely after an average of 6 years.

The frequency of performing inter-repair tests, during which it is possible to establish the presence of a developing defect of any oil switch assembly, is, according to the regulatory documentation, once every 12 years. Analysis of failure statistics indicates the need to adjust the duration of the overhaul tests to once every 6 years. This will prevent serious defects in the nodes of the oil switches of the contact network feeders, which can cause their failures. Consequently, the reliability of traction substations will increase, which will lead to an increase in the safety of the transportation process.

**Keywords:** traction substation, oil switches, contact network feeders, frequency of service periods.

## Введение

В настоящее время для электрооборудования тяговых подстанций актуальна проблема продления срока службы [1-6]. На многих тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог до сих пор в эксплуатации находится большое количество маслonaполненных выключателей, требующих обслуживания с определенной периодичностью [7-8], в том числе и проведения межремонтных испытаний для оценки состояния узлов выключателя и своевременного выявления дефектов, способных вызвать серьезные повреждения этих аппаратов.

Особенно важно своевременное обслуживание масляных выключателей фидеров контактной сети (ФКС) в связи с существенно возросшими токовыми нагрузками от тяжеловесных поездов [9-10] и частыми коммутациями вследствие необходимости отключения токов короткого замыкания в контактной сети станций и деповских путей [11-12].

## Периодичность обслуживания выключателей ФКС тяговых подстанций

Согласно правил содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения [13], периодичность выполнения текущего ремонта, тепловизионного обследования, межремонтных испытаний, испытаний изоляционного масла для масляных выключателей проводится в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Периодичность выполнения

Виды элементов	Периодичность выполнения			
	Текущий ремонт	Тепловизионное обследование	Межремонтные испытания	Испытания изоляционного масла
Масляные выключатели, не оборудованные средствами постоянного технического диагностирования				
Маломасляные выключатели серии ВМУЭ -27,5 кВ и ВМК-27,5 кВ	1 раз в 2 года	1 раз в 2 года	1 раз в 12 лет	1 раз в 4 года

В таблице 2 представлены причины отказов исследуемых выключателей и виды ТО, при которых возможно их выявление.

Таблица 2 – Причины отказов и виды ТО для их обнаружения

Причина повреждения	Виды ТО, позволяющие обнаружить причину повреждения
Механический износ привода	Текущий ремонт и межремонтные испытания
Разрегулировка	
Неисправность цепей управления	
Увлажнение элементов	
Нарушение контакта	
Неудовлетворительная эксплуатация	
Перегорание включающих и отключающих катушек	
Некачественный ремонт	Внешний осмотр
Внешнее механическое повреждение и механический износ и старение	
Повреждение высоковольтных вводов	
Близкое короткое замыкание	
Вандализм	
Ухудшения изоляционных свойств масла	Хим. анализ

Согласно представленных в таблицах 1 и 2 данных видим, что основные виды повреждений развиваются по причинам, которые возможно выявить в ходе проведения межремонтных испытаний, периодичность выполнения которых достаточно велика – 1 раз в 12 лет. Поэтому целесообразно выполнить анализ статистики отказов масляных выключателей ФКС за большой промежуток времени с целью проверки необходимости корректировки данной периодичности.

## Оценка необходимости изменения сроков технического обслуживания

### маломасляных выключателей ФКС

С целью оценки необходимости изменения сроков технического обслуживания маломасляных выключателей ФКС выполнен статистический анализ данных по отказам выключателей на тяговых подстанциях Восточно-Сибирской железной дороги за последние 20 лет.

Серия реализаций случайной величины времени наработки до отказа, называется объемом выборки. Для вынесения заключений относительно вероятностей необходима математическая обработка выборки [14-15].

Выборку случайной величины удобно представить в виде гистограммы. Гистограммой называется график плотности распределения, представленный в виде прямоугольников, высота которых пропорциональна частоте появления в выборке, а по оси абсцисс отложены соответствующие значения случайной величины.

Данные по выборке приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные по выборке отказов

Время, мес.	Порядковый номер отказа															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Наработка между отказами	15	1	10	7	5	1	1	6	6	1	4	2	5	11	1	8
Время, мес.	Порядковый номер отказа															
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Наработка между отказами	6	5	1	5	5	12	8	10	7	6	8	5	7	13	8	1

Разбиваем выборку на интервалы  $k$

$$k = 5 \ln\left(\frac{N}{10}\right), \quad (1)$$

где  $N$  – число отказов.

$$k = 5 \ln\left(\frac{27}{10}\right) = 5,66.$$

Ширина интервалов  $\Delta X$  находится по формуле

$$\Delta X = \frac{(X_{max} - X_{min})}{k}, \quad (2)$$

где  $X_{max}$ ,  $X_{min}$  – максимальное и минимальное значение соответственно.

$$\Delta X = \frac{(15-1)}{5,66} = 2,47.$$

Рассчитываем границы интервалов случайной величины времени наработки до отказа.

$$\begin{aligned} X_1 &= X_{min} = 1; \\ X_2 &= X_1 + \Delta X = 1 + 2,47 = 3,47; \\ X_3 &= X_2 + \Delta X = 3,47 + 2,47 = 5,95; \\ X_4 &= X_3 + \Delta X = 5,95 + 2,47 = 8,42; \\ X_5 &= X_4 + \Delta X = 8,42 + 2,47 = 10,09; \\ X_6 &= X_5 + \Delta X = 10,09 + 2,47 = 13,37; \\ X_7 &= X_6 + \Delta X = 13,37 + 2,47 = 15,85. \end{aligned}$$

При разбиении представленной выборки на интервалы определена ширина интервалов, равная 2,47, и рассчитаны границы интервалов случайной величины времени наработки до отказа, которые составили соответственно: 1; 3,47; 5,95; 8,42; 10,9; 13,37; 15,85.

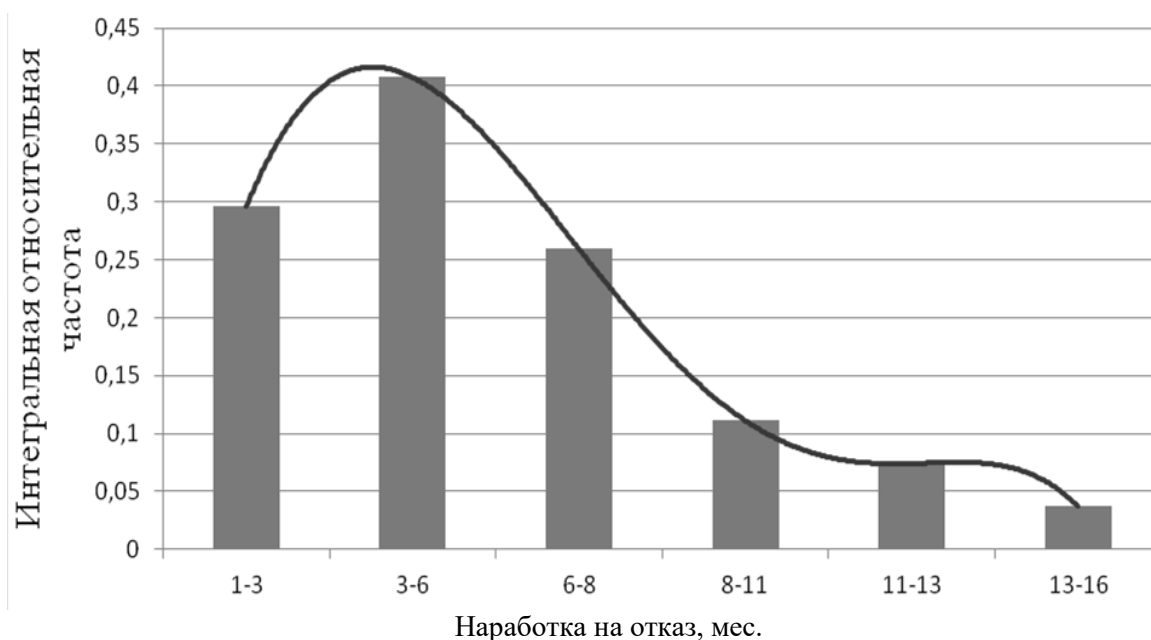
С учетом данных таблицы 3 рассчитано число попаданий (интервальная частота) реализаций случайной величины наработку до отказа в каждый интервал. При попадании какой-либо реализации на границу интервала относим ее к одному из ближайших интервалов. Определяем относительные частоты попаданий в интервал (интервальная относительная частота).

На основании этих данных получаем интервальный вариационный ряд, приведенный в таблице 4.

**Таблица 4 – Интервальный вариационный ряд**

Интервалы	1	2	3	4	5	6
Интервальная частота	8	11	7	3	2	1
Интервальная относительная частота	0,296	0,407	0,259	0,111	0,074	0,037

Графическая интерпретация вариационного ряда – гистограмма, показана на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Гистограмма распределения времени наработки до отказа**

Из гистограммы, изображённой на рисунке 1, видно, что функция времени наработки до отказа подчиняется закону Вейбулла, приближенному к нормальному закону распределения.

Определяем числовые характеристики вариационного ряда. Математическое ожидание – среднее значение случайной величины наработка до отказа

$$\mu = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_i. \quad (3)$$

Среднеквадратическое отклонение – разброс около среднего значения случайной величины наработки до отказа

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N - 1}} \quad (4)$$

По формулам (3) и (4) получили  $\mu = 6$  лет,  $\sigma = 4$  года.

Таким образом, математическое ожидание – среднее значение случайной величины наработки до отказа, составило 6 лет. Среднеквадратическое отклонение – разброс около среднего значения случайной величины наработки до отказа, составило 4 года.

### **Заключение**

По полученным значениям числовых характеристик, а также с учетом данных, приведенных в таблицах 1 и 2, можно предположить, что наиболее вероятная наработка до отказа масляных выключателей ФКС составляет 6 лет. Следовательно, необходимо сократить срок межремонтных испытаний с 12 лет до 6 лет с целью своевременного выявления развивающихся дефектов, предупреждения их развития для предотвращения отказов исследуемых выключателей. Внедрение данного предложения, в свою очередь, приведет к повышению надежности работы тяговых подстанций и продлению срока службы выключателей ФКС.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Пузина Е.Ю., Туйгунова А.Г., Худоногов И.А. Системы мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций. Иркутск, 2020. – 184 с.
2. Пузина Е.Ю. Оценка остаточного ресурса тяговых трансформаторов Северного хода ВСЖД. Транспорт-2013: труды международной научно-практической конференции.–Ростов-на-Дону: Изд-во РГУПС, 2013. С. 173-175.
3. Пузина Е.Ю. Целесообразность применения системы мониторинга силовых трансформаторов. Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2013. С.167-171.
4. Keyvan Firuzi, Mehdi Vakilian, B. Toan Phung, Trevor R. Blackburn, "Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features," Power Delivery IEEE Transactions on, vol. 34, no. 2, pp. 542–550, 2019.
5. Воронин В.В. Диагностические принципы в системах технического обслуживания. Информатика и системы управления. 2021. № 4 (70). С. 67-80.
6. Макашева С.И., Пинчуков П.С. Мониторинг состояния масляной изоляции тяговых трансформаторов на основе анализа растворенных газов. Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2021. № 2 (27). С. 57-62.
7. Попов А.Ю., Пузина Е.Ю., Кашин А.А. Сравнительный анализ выключателей для сетей класса 6-35 кВ. Техничко-экономические проблемы развития регионов. Материалы научно-практической конференции с международным участием. 2019. С. 162-171.
8. Y. Dang and W. Chen, "Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect," 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, pp. 1–4, 2018.
9. Шевердин И.Н., Шаманов В.И., Трофимов Ю.А. Влияние тяжеловесных поездов на рельсовые цепи и АЛС. Автоматика, связь, информатика. 2004. № 8. С. 24.
10. Cherepanov A, Kutsiy A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 2018. С. 8501734.
11. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers residual service life. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. 2019. С. 8743069.
12. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. 2019. С. 8867610.
13. Правила содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения. М.: ООО «Центр Инноваций и Развития «ТЕХИНФОРМ»», 2019. – 319 С.

14. В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
15. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х т./ Под общей ред. Ю.Н. Руденко. Т.2. Надежность электроэнергетических систем. Справочник/ Под ред. М.Н. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.

## REFERENCES

1. Puzina E.Yu., Tuigunova A.G., Khudonogov I.A. Monitoring systems for power transformers of traction substations. Irkutsk, 2020. –184 p.
2. Puzina E. Yu. Evaluation of the residual service life of the Northern route traction transformers East Siberian Railroad. Transport-2013: proceedings of the international scientific and practical conference. Rostov-on-don: RSUPS Publishing house, 2013, Pp. 173-175.
3. Puzina E.Y. Expediency of using a monitoring system for power transformers. Improving the efficiency of energy production and use in Siberia. Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. 2013. Pp.167-171.
4. Keyvan Firuzi, Mehdi Vakilian, B. Toan Phung, Trevor R. Blackburn, "Partial Discharges Pattern Recognition of Transformer Defect Model by LBP & HOG Features," Power Delivery IEEE Transactions on, vol. 34, no. 2, pp. 542–550, 2019.
5. Voronin V.V. Diagnostic principles in maintenance systems. Informatics and control systems. 2021. No. 4 (70). pp. 67-80.
6. Makasheva S.I., Pinchukov P.S. Monitoring of the oil insulation condition of traction transformers based on the analysis of dissolved gases. Transport of the Asia-Pacific region. 2021. No. 2 (27). pp. 57-62.
7. Popov A.Yu., Puzina E.Yu., Kashin A.A. Comparative analysis of switches for networks of class 6-35 kV. Technical and economic problems of regional development. Materials of the scientific and practical conference with international participation. 2019. pp. 162-171.
8. Y. Dang and W. Chen, Design of Oil-Immersed Apparatus Oil Velocity Measure System Based on the Ultrasonic Wave Doppler Effect. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, pp. 1–4, 2018.
9. Sheverdin I.N., Shamanov V.I., Trofimov Yu.A. The influence of heavy trains on rail chains and ALS. Automation, communications, computer science. 2004. No. 8. p. 24.
10. Cherepanov A, Kutsiy A. Modeling of tractive power supply systems for heavy-tonnage trains operation. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 2018. C. 8501734.
11. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Evaluation of short circuit currents effects on power transformers residual service life. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019. 2019. C. 8743069.
12. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. Proceedings – 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. 2019. C. 8867610.
13. Rules for the maintenance of traction substations, transformer substations and linear devices of the traction power supply system. Moscow: LLC "Center for Innovation and Development "TECH-INFORM", 2019 – 319 P.
14. V.V. Ershevich, A.N. Zeiliger, G.A. Illarionov and others; Edited by S.S. Rokotyana and I.M. Shapiro. Handbook on the design of electric power systems – 3rd ed., reprint. and additional - M.: Energoatomizdat, 1985. - 352 p.
15. Reliability of energy systems and their equipment. Reference book: In 4 volumes / Under the general editorship of Yu.N. Rudenko. Vol.2. Reliability of electric power systems. Sprvochnik/ Edited by M.N. Rozanov. - M.: Energoatomizdat, 2000. - 568 p.

### **Информация об авторах**

*Широков Сергей Александрович* - студент гр. СОД.1-18-2, специальность «Системы обеспечения движения поездов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: [gebelsru@mail.ru](mailto:gebelsru@mail.ru)

*Пузина Елена Юрьевна* – к. т. н., доцент кафедры Электроэнергетика транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, к. т. н., доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: [lena-rus05@mail.ru](mailto:lana-rus05@mail.ru)

### **Information about the author**

*Shirokov Sergei Aleksandrovich* – student g. SOD.1-18-2, specialty "Train traffic management Systems", Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: [gebelsru@mail.ru](mailto:gebelsru@mail.ru)

*Elena Yur'evna Puzina* – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: [lena-rus05@mail.ru](mailto:lana-rus05@mail.ru);