

УДК 534.6.08
doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА

К. В. Фролов¹, Л. М. Инаходова²

^{1,2} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
¹riksot@mail.ru, ²inahodova@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важной составляющей жизнеспособности электрического оборудования является своевременная диагностика его основных узлов, позволяющая продлить срок службы и снизить затраты на его эксплуатацию. Диагностика комплектных распределительных устройств может осуществляться как в испытательных лабораториях, так и в условиях эксплуатации на подстанциях с использованием различного диагностического оборудования. От эффективности работы диагностических устройств зависит качество функционирования подстанций и бесперебойное электроснабжение потребителей электроэнергии. В настоящее время существует множество методов диагностирования электрического оборудования для выявления повреждений на ранней стадии развития дефекта. Использование устройств на основе акустического метода позволяет осуществлять раннюю диагностику для предупреждения аварийной ситуации на подстанции. Целью работы является определение параметров акустического шума, позволяющих обнаружить возникновение дефекта электрооборудования. Актуальность темы обусловлена необходимостью бесперебойного электроснабжения потребителей и минимизацией затрат на эксплуатацию электрооборудования. *Материалы и методы.* Исследования основываются на применении методов спектрального анализа с использованием преобразования Фурье и вейвлет-преобразования применительно к задачам определения информационных параметров акустического шума. *Результаты.* Представлены обзор и краткий анализ акустических исследований исправных и неисправных комплектных распределительных устройств, описание изменения информационных параметров акустического шума. *Выводы.* Представленные экспериментальные исследования акустических шумов и определение их информационных параметров могут быть использованы при создании информационно-измерительной системы диагностики комплектных распределительных устройств для выявления предаварийных состояний электрооборудования в составе комплектных распределительных устройств.

Ключевые слова: акустический шум, параметры акустического шума, диагностика комплектных распределительных устройств, вейвлет-преобразование, спектральный анализ

Для цитирования: Фролов К. В., Инаходова Л. М. Экспериментальное исследование информационных параметров акустического шума // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 25–31. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-3

EXPERIMENTAL STUDY OF INFORMATION PARAMETERS OF ACOUSTIC NOISE

K.V. Frolov¹, L.M. Inakhodova²

^{1,2} Samara State Technical University, Samara, Russia
¹riksot@mail.ru, ²inahodova@mail.ru

Abstract. *Background.* An important component of the viability of electrical equipment is the timely diagnosis of its main components, which allows to extend the service life and reduce the cost of its operation. Diagnostics of complete switchgear can be carried out both in testing laboratories and in operating conditions at substations using various diagnostic equipment. The quality of substation operation and uninterrupted power supply to electricity consumers depend on the efficiency of diagnostic devices. Currently, there are many methods for diagnosing electrical equipment to detect damage at an early stage of defect development. The use of devices based on the acoustic method allows for early diagnosis to prevent an emergency situation at the substation. The purpose of the work is to determine the parameters of acoustic noise, allowing to detect the occurrence of an electrical defect. The relevance of the topic is due to the need for uninterrupted power supply to consumers and minimizing the cost of operating electrical equipment. *Materials and methods.* The research is based on the application of spectral analysis methods using the Fourier transform and the wavelet

transform in relation to the tasks of determining the information parameters of acoustic noise. *Results.* An overview and a brief analysis of acoustic studies of serviceable and faulty complete switchgear are presented, as well as a description of changes in the information parameters of acoustic noise. *Conclusion.* The presented experimental studies of acoustic noise and the determination of their information parameters can be used to create an information and measurement diagnostic system for complete switchgear to identify pre-emergency conditions of electrical equipment as part of complete switchgear.

Keywords: acoustic noise, acoustic noise parameters, diagnostics of complete switchgear, wavelet transform, spectral analysis

For citation: Frolov K.V., Inakhodova L.M. Experimental study of information parameters of acoustic noise. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):25–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-3

Введение

Непрерывная подача электроэнергии является необходимостью для функционирования производственных предприятий, а также для обеспечения комфортного проживания граждан. От надежности электроэнергетических установок зависит оптимальное использование финансовых ресурсов страны и обеспечение государственной безопасности. Утвержденные требования к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок определяют правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Так, одним из важнейших компонентов современных электросетей является электрическая подстанция, включающая в себя комплектные распределительные устройства [1, 2]. Они предназначены для распределения электрической энергии переменного трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц и номинальным напряжением 6, 10 кВ.

Комплектные распределительные устройства поставляются в виде металлического шкафа со встроенным электрооборудованием, включающим в себя измерительные приборы, управляющие контуры, автоматику и релейную защиту [3]. Все элементы комплектных распределительных устройств требуют проведения диагностических работ во время эксплуатации. Одними из таких высоковольтных устройств являются высоковольтные изоляторы. Высоковольтные изоляторы подвергаются электродинамическим и механическим воздействиям, что приводит к деградации диэлектрических поверхностей, а также возникновению дефектов и, как следствие, к выходу из строя. Установлено, что при возникновении дефектов высоковольтных изоляторов возникают дуговые и частичные разряды, вызванные пробоем изолирующей среды под воздействием приложенного электрического напряжения [4, 5].

Непрерывный мониторинг состояния изоляции комплектных распределительных устройств является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить бесперебойное электроснабжение потребителей электроэнергии [6, 7]. В настоящее время в диагностике высоковольтного оборудования широко применяются системы на основе контактных методов. К их основным недостаткам можно отнести, во-первых, необходимость личного присутствия оператора на объекте вблизи опасного для жизни высоковольтного оборудования, во-вторых, низкая периодичность поступления данных о характеристиках оборудования с труднодоступных подстанций, в-третьих, необходимость вывода из эксплуатации аппаратов электрооборудования для монтажа компонентов систем диагностики. В настоящей работе предлагается использовать бесконтактный акустический метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации звукового шума, возникающего при появлении дуговых и частичных разрядов [8].

Материалы и методы

Испытания проводились на ячейках КРУ, расположенных в испытательной лаборатории завода АО «ГК "Электроцит" – ТМ Самара». Для реализации акустического метода было разработано устройство, регистрирующее звуковые колебания по двум каналам в диапазоне от 100 Гц до 80 МГц [9]. Двухканальный метод фиксации акустического шума обусловлен необходимостью учета воздействия акустического шума, находящегося за пределами ячейки КРУ. Акустические колебания регистрировались внутри ячейки КРУ через канал 1, а также снаружи ячейки КРУ через канал 2. Структурная схема реализации метода представлена на рис. 1.

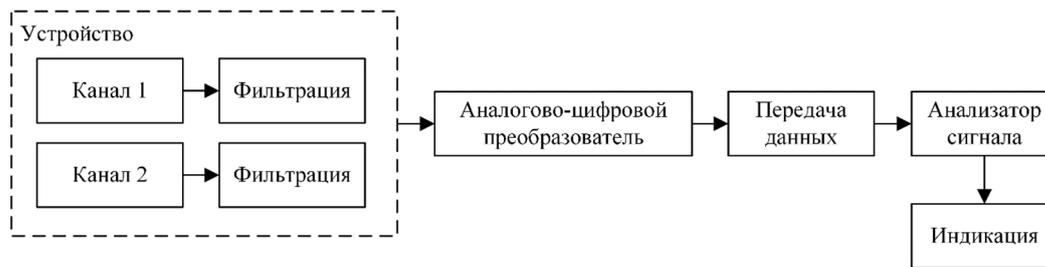


Рис. 1. Структурная схема реализации акустического метода

Устройство было поочередно установлено в ячейках КРУ с исправными и дефектными элементами (изоляторы, трансформатор тока). Сбор акустического шума проводился в нескольких точках в среднем и нижнем отсеках комплектного распределительного устройства, также производилась регистрация внешнего шума за пределами ячейки КРУ. Измерения акустического шума проводились при напряжениях от 10 до 45 кВ с шагом 5 кВ. При напряжении более 45 кВ происходил пробой изоляции, что приводило к отключению установки. Сигнал с устройства передавался на персональный компьютер через аналогово-цифровой преобразователь с разрядностью 14 бит и частотой дискретизации 5 МГц.

Результаты

В целях исследования информационных параметров акустического шума проведено более 200 замеров длительностью 1–2 мин. На каждом полученном сигнале наблюдается явление интерференции, при этом складывающиеся волны имеют разные частоты, амплитуды, фазы и результирующая кривая сигнала имеет достаточно сложный вид (рис. 2).

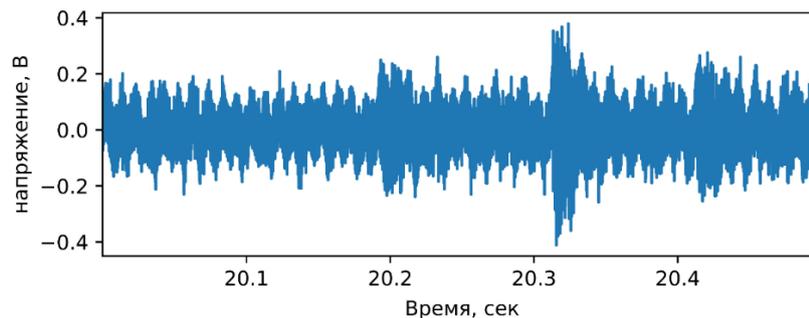


Рис. 2. Амплитудно-временное представление сигнала

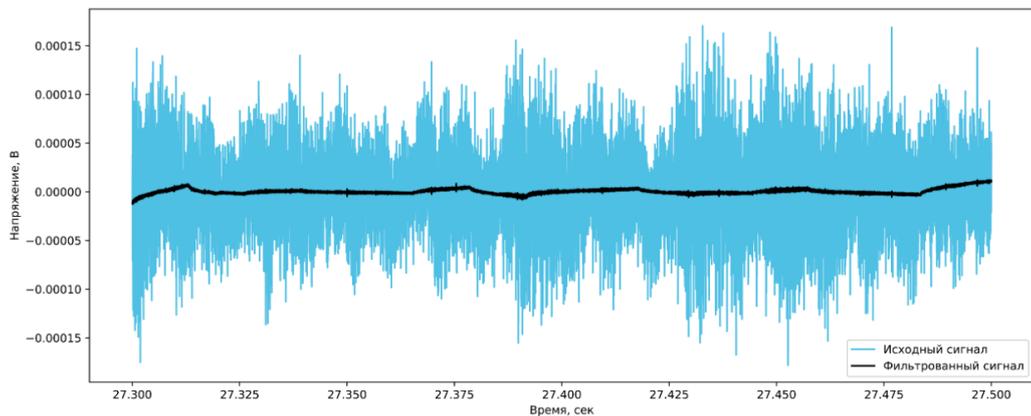
Полученный сигнал $u(t)$ представляет собой стохастический процесс, включающий в себя информативную $u_{ин}(t)$ и случайную $u_{сл}(t)$ составляющие:

$$u(t) = u_{ин}(t) + u_{сл}(t).$$

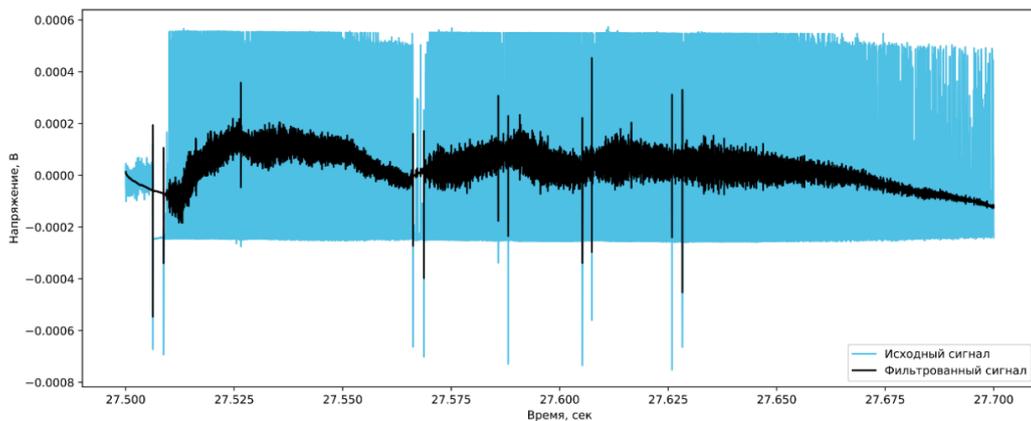
Информативная составляющая выделяется путем использования вейвлет-фильтрации, включающей в себя три этапа: прямое вейвлет-преобразование (декомпозиция); вычисление коэффициентов разложения сигнала; обратное вейвлет-преобразование (реконструкция) с использованием рассчитанных коэффициентов [10–12]. Для анализа полученного сигнала разработана программа на языке программирования Python с использованием математических библиотек numpy, SciPy, PyWavlets, scikit-image. Вейвлет-фильтрация осуществлена через вейвлеты Добеши [13]. Достаточно эффективными оказались вейвлеты db2 со следующими наборами весовых вейвлет-коэффициентов [14]:

$$h_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}.$$

На рис. 3 показаны единичные фрагменты длительностью 0,3 с для исправного и дефектного КРУ с выделением информативной составляющей фильтрованного сигнала $u_{ин}(t)$ и исходного сигнала $u(t)$.



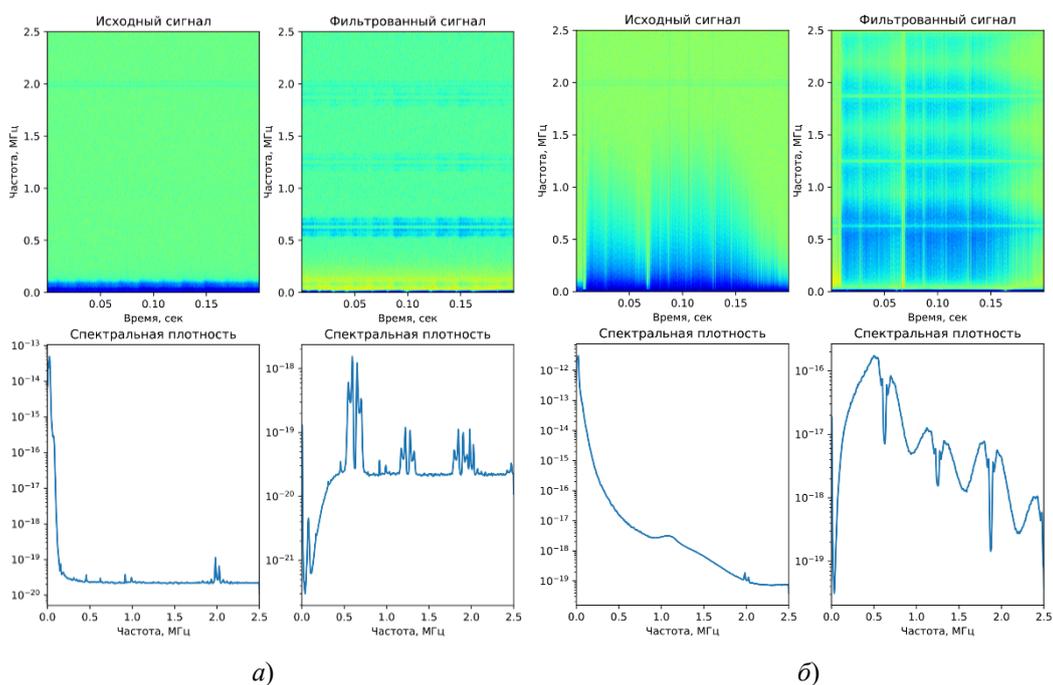
а)



б)

Рис. 3. Исходный и фильтрованный сигналы исправного (а) и дефектного (б) КРУ

Для получения частотных характеристик сигнала использовался спектральный анализ, позволяющий судить о наличии дефекта в частотном представлении, так как во временном представлении сигнал слабо информативен. На рис. 4 изображены спектрограммы и спектральные плотности исходного и фильтрованного сигналов исправного и дефектного КРУ.



а)

б)

Рис. 4. Спектрограммы и спектральные плотности сигналов исправного (а) и дефектного (б) КРУ

При исследовании множества фрагментов сигнала в различных условиях работы КРУ было выявлено, что характерным свойством полученных спектрограмм проведенных замеров служит экспоненциальный характер распределения спектральной плотности сигналов (рис. 5):

$$P(f) = ae^{-bf},$$

где a, b – коэффициенты распределения спектральной плотности; f – частота сигнала.

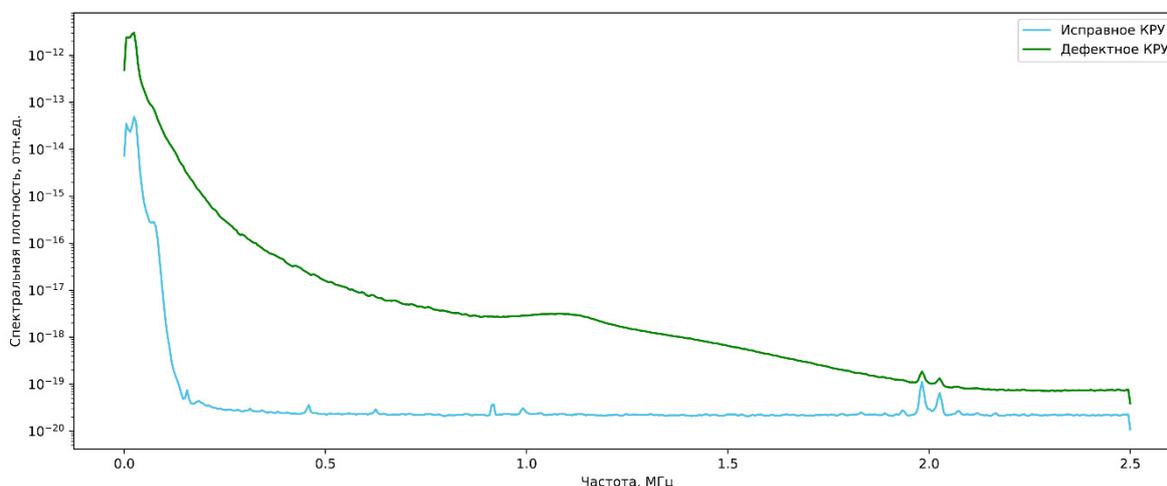


Рис. 5. Распределения спектральной плотности сигналов

Общим критерием по отношению ко всему множеству спектрограмм сигналов дефектных КРУ в сравнении с исправными КРУ является снижение значения коэффициента спектральной плотности b более чем в 10 раз.

Заключение

Проведенный анализ результатов экспериментального исследования информационных параметров акустического шума показал, что акустические сигналы КРУ в исправном состоянии имеют достаточно низкую спектральную плотность на частотах выше 0,2 МГц, в то же время при наличии дефекта в устройстве спектральная плотность на тех же частотах значительно увеличивается. Данный факт позволит выявлять дефектные состояния исследуемого электрооборудования, а также разработать информационно-измерительную систему для предотвращения аварийных ситуаций в энергосистемах.

Список литературы

1. Красник В. В. Эксплуатация электрических подстанций и распределительных устройств : производ.-практ. пособие. М. : ЭНАС, 2016. 319 с.
2. Дорошев К. И. Комплектные распределительные устройства напряжением 3–35 кВ. М. : Энергия, 1969. 103 с.
3. Комплектные распределительные устройства КРУ // Производственное объединение «ВЭЛТА». URL: <https://po-velta.ru/production/komplektnye-raspre-delitelnye-ustroystva-kru> (дата обращения: 18.03.2024).
4. Мягких К. Ю., Иванов Д. А., Галиева Т. Г. [и др.]. Визуализация и локализация дефектов изоляции высоковольтного оборудования акустическим методом // Электроэнергия. Передача и распределение. 2024. № 1. С. 2–9.
5. Инаходова Л. М., Фролов К. В. Исследование звукового излучения контактных соединений распределительных устройств подстанций // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 4. С. 26–32. doi: 10.53015/18159958_2021_4_26
6. Голенищев-Кутузов А. В., Ахметвалеева Л. В., Еникеева Г. Р. [и др.]. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 2. С. 117–127. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127
7. Патент 2764962 С1 Российская Федерация. Способ и система планирования профилактического обслуживания и ремонта технологического оборудования на основе акустической диагностики

- с применением нейронных сетей / Власов А. В., Киселев А. В., Михайлов Д. М. № 2021117490 ; заявл. 16.06.2021 ; опубл. 24.01.2022.
8. Фролов К. В., Инаходова Л. М. Метод определения неисправности электрических изоляторов // Энергетика будущего – цифровая трансформация : сб. тр. III Всерос. науч.-практ. конф. (г. Липецк, 14–15 декабря 2022 г.). Липецк : Липецк. гос. техн. ун-т, 2022. С. 48–52.
 9. Патент 2815081 C1 Российская Федерация. Устройство защиты от дуговых и частичных разрядов / Инаходова Л. М., Цынаева А. А., Фролов К. В. № 2023122367 ; заявл. 29.08.2023 ; опубл. 11.03.2024.
 10. Козырев А. А. Метод, модели и алгоритмы обработки информации при регистрации и принятии решений об аварийных процессах в системах электропитания : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2015. 24 с.
 11. Файфер Л. А. Анализ нестационарных сигналов с помощью вейвлет-преобразования // Молодой ученый. 2016. № 14. С. 182–186.
 12. Файфер Л. А. Применение вейвлет-преобразования для идентификации высокочастотных составляющих // Молодой ученый. 2016. № 14. С. 186–189.
 13. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам : пер. с англ. М. : Изд-во «РХД», 2001. 450 с.
 14. Нагорнов О. В. Вейвлет-анализ в примерах : учеб. пособие. М. : НИЯУ МИФИ, 2010. 120 с.

References

1. Krasnik V.V. *Ekspluatatsiya elektricheskikh podstantsiy i raspreditel'nykh ustroystv: proizvod.-prakt. posobie = Operation of electrical substations and switchgears : production.- practice. manual.* Moscow: ENAS, 2016:319. (In Russ.)
2. Doroshev K.I. *Komplektnye raspreditel'nye ustroystva napryazheniem 3-35 kV = Complete switchgears with a voltage of 3-35 kV.* Moscow: Energiya, 1969:103. (In Russ.)
3. Complete switchgear of the KRU. *Proizvodstvennoe ob"edinenie «VELTA» = Production association "VELTA".* (In Russ.). Available at: <https://po-volta.ru/production/komplektnye-raspreditelnye-ustroystva-kru> (accessed 18.03.2024).
4. Myagkikh K.Yu., Ivanov D.A., Galieva T.G. et al. Visualization and localization of insulation defects of high-voltage equipment by acoustic method. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electric power. Transmission and distribution.* 2024;(1):2–9. (In Russ.)
5. Inakhodova L.M., Frolov K.V. Investigation of sound radiation of contact connections of switchgear substations. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya = Vesti higher educational institutions of the Chernozem region.* 2021;(4):26–32. (In Russ.). doi: 10.53015/18159958_2021_4_26
6. Golenishchev-Kutuzov A.V., Akhmetvaleeva L.V., Enikeeva G.R. et al. Remote diagnostics of defects in high-voltage insulators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki = Proceedings of higher educational institutions. Energy problems.* 2020;22(2):117–127. (In Russ.). doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127
7. Patent 2764962 C1 Russian Federation. *Sposob i sistema planirovaniya profilakticheskogo obsluzhivaniya i remonta tekhnologicheskogo oborudovaniya na osnove akusticheskoy diagnostiki s primeneniem neyronnykh setey = Method and system for planning preventive maintenance and repair of technological equipment based on acoustic diagnostics using neural networks.* Vlasov A.V., Kiselev A.V., Mikhaylov D.M. № 2021117490; appl. 16.06.2021; publ. 24.01.2022. (In Russ.)
8. Frolov K.V., Inakhodova L.M. Method for determining the malfunction of electrical insulators. *Energetika budushchego – tsifrovaya transformatsiya: sb. tr. III Vseros. nauch.-prakt. konf. (g. Lipetsk, 14–15 dekabr'ya 2022 g.) = Energetics of the future – digital transformation : sat. tr. III All-Russian Scientific and Practical Conference (Lipetsk, December 14-15, 2022).* Lipetsk: Lipetsk. gos. tekhn. un-t, 2022:48–52. (In Russ.)
9. Patent 2815081 C1 Russian Federation. *Ustroystvo zashchity ot dugovykh i chastichnykh razryadov = Protection device against arc and partial discharges.* Inakhodova L.M., Tsynaeva A.A., Frolov K.V. № 2023122367; appl. 29.08.2023; publ. 11.03.2024. (In Russ.)
10. Kozыrev A.A. Method, models and algorithms of information processing during registration and decision-making on emergency processes in power supply systems. PhD abstract. Volgograd, 2015:24. (In Russ.)
11. Fayfer L.A. Analysis of nonstationary signals using a wavelet transform. *Molodoy uchenyy = Young Scientist.* 2016;(14):182–186. (In Russ.)
12. Fayfer L.A. Application of the wavelet transform for identification of high-frequency components. *Molodoy uchenyy = Young Scientist.* 2016;(14):186–189. (In Russ.)
13. Dobeshi I. *Desyat' lektsiy po veyvletam: per. s angl. = Ten lectures on wavelets : translated from English.* Moscow: Izd-vo «RKhD», 2001:450. (In Russ.)
14. Nagornov O.V. *Veyvlet-analiz v primerakh: ucheb. posobie = Wavelet analysis in examples : textbook.* Moscow: NIYaU MIFI, 2010:120. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Кирилл Владимирович Фролов

аспирант,
Самарский государственный технический
университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: riksot@mail.ru

Kirill V. Frolov

Postgraduate student,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

Лолита Меджидовна Инаходова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизированных
электроэнергетических систем,
Самарский государственный технический
университет
(Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)
E-mail: inahodova@mail.ru

Lolita M. Inakhodova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of automated electric power systems,
Samara State Technical University
(244 Molodogvardeyskaya street, Samara, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 21.03.2024

Поступила после рецензирования/Revised 19.04.2024

Принята к публикации/Accepted 15.05.2024