

Комплексная методика диагностирования фарфоровых покрышек электрооборудования и опорно-стержневых изоляторов

А.Ю. Бардушко, М.И. Крапивин, Е.Ю. Пузина✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

Резюме

Поддержание надежного состояния фарфоровой изоляции является ключевым фактором в обеспечении бесперебойной работы электроустановок. Недостаточное финансирование в последние 10–15 лет привело к увеличению числа отказов оборудования в системах электроснабжения. Старение и износ фарфоровых изоляторов без своевременной диагностики и обслуживания могут привести к серьезным авариям. Традиционные методы контроля, такие как визуальный осмотр и измерение сопротивления изоляции, не всегда позволяют выявить скрытые дефекты, особенно в условиях эксплуатации под напряжением. В этой связи актуальными становятся неразрушающие методы диагностики, помогающие оценивать функционал изоляторов без их демонтажа. Состояние изоляции напрямую зависит от срока ее службы и качества проводимой диагностики, поэтому необходимо внедрять более эффективные методы контроля. Несмотря на высокую надежность изоляторов, суровые эксплуатационные условия требуют применения современных методик проверки оборудования. Один из таких методов – ультразвуковая диагностика, позволяющая обнаруживать трещины и другие дефекты в фарфоровых изоляторах и покрышках. Также используются тепловизионный контроль, акустический и виброакустический методы диагностики, метод фуксиновой пробы и т.д. Однако их применение по отдельности не решает задачу моментального выявления дефектов изоляции, следовательно, нужно разработать комплексный метод исследования, который позволит на ранней стадии увидеть опасные дефекты в изоляции оборудования и собственно изоляторов с целью обеспечения надежной работы электроустановок.

Ключевые слова

диагностика, фарфоровые изоляторы, фарфоровые покрышки, электроэнергетика, методы диагностирования

Для цитирования

Бардушко А.Ю. Комплексная методика диагностирования фарфоровых покрышек электрооборудования и опорно-стержневых изоляторов / А.Ю. Бардушко, М.И. Крапивин, Е.Ю. Пузина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2(86). С. 10–23. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).10-23.

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.03.2025 г.; поступила после рецензирования: 18.03.2025 г.; принята к публикации: 20.03.2025 г.

Comprehensive diagnostic technique for porcelain covers of electrical equipment and support-rod insulators

A.Yu. Bardushko, M.I. Krapivin, E.Yu. Puzina✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

Abstract

Maintaining a reliable condition of porcelain insulation is a key factor in ensuring the smooth operation of electrical installations. Insufficient funding in the last 10–15 years has led to an increase in the number of equipment failures in power supply systems. Aging and wear of porcelain insulators without timely diagnostics and maintenance can lead to serious accidents. Traditional control methods, such as visual inspection and insulation resistance measurement, do not always reveal hidden defects, especially under energized operating conditions. In this regard, non-destructive diagnostic methods that allow assessing the condition of insulators without dismantling them become relevant. The condition of the insulation directly depends on its service life and the quality of the diagnostics performed. Therefore, it is necessary to implement more effective methods for monitoring the condition of the insulation. Despite the high reliability of the insulators, severe operating conditions require the use of modern equipment testing methods. One of such methods is ultrasonic diagnostics, which allows detecting cracks and other defects in porcelain insulators and covers. Diagnostic methods such as thermal imaging control, acoustic method, vibro-acoustic, fuchsin test method and others are also used. However, the use of these methods separately does not allow to detect all types of insulation defects at once. Therefore, it is necessary to develop a comprehensive diagnostic method that will allow to detect dangerous defects in the insulation of equipment and the insulators themselves at an early stage, which is necessary to ensure reliable operation of electrical installations.

Keywords

diagnostics, porcelain insulators, porcelain covers, electric power industry, diagnostic methods

For citation

Bardushko A.Yu., Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Kompleksnaya metodika diagnostirovaniya farforovykh pokryshek elektrooborudovaniya i oporno-sterzhnevyykh izolyatorov [Comprehensive diagnostic technique for porcelain covers of electrical equipment and support-rod insulators]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. Vol. 86. No. 2. Pp. 10–23. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).10-23.

Article Info

Received: March 5, 2025; Revised: March 18, 2025; Accepted: March 20, 2025.

Введение

В настоящее время для контроля состояния фарфоровых покрышек высоковольтного оборудования и опорно-стержневых изоляторов в условиях эксплуатации используется множество различных методов, существенно отличающихся как по методологическому подходу, так и по техническому исполнению. Своевременная диагностика играет важную роль, так как, например, выход из строя покрышек может привести к серьезным последствиям из-за высокой стоимости и критической значимости поврежденного оборудования. В частности, на железнодорожном транспорте это способно нарушить нормальный режим работы системы тягового электроснабжения и снизить ее пропускную способность [1–6].

Традиционные методы контроля состояния изоляции, такие как визуальный осмотр, не всегда позволяют выявить скрытые дефекты, особенно в условиях эксплуатации под напряжением. В этой связи актуальными становятся неразрушающие методы диагностики, позволяющие оценивать состояние изоляторов без их вывода из эксплуатации. Например, виброакустический метод, применяемый под рабочим напряжением, позволяет обнаруживать трещины и другие дефекты в теле фарфора и местах крепления изоляторов [7–9].

Исследования авторов показали [9–11], что акустико-эмиссионный контроль зарекомендовал себя как эффективный способ выявления дефектов в опорно-стержневых изоляторах. Этот метод основан на регистрации акустических сигналов, возникающих при развитии трещин и других повреждений в материале изолятора. Его применение позволяет своевременно обнаруживать потенциально

опасные дефекты и предотвращать аварийные ситуации.

Важно отметить, что разрушение фарфоровых изоляторов может происходить не только из-за электрических, но и механических воздействий. Лабораторные исследования показывают, что механические повреждения, такие как удары или вибрации, могут приводить к трещинам и последующему выходу из строя изоляторов [10–14].

Таким образом, применяемые методы диагностики изоляции позволяют выявить отдельные виды дефектов фарфоровых покрышек и изоляторов.

Целью данной работы является разработка комплексной методики диагностики фарфоровой изоляции для своевременного обнаружения всех возможных видов дефектов и предотвращения отказов оборудования с фарфоровыми покрышками и опорно-стержневых изоляторов.

Постановка задачи исследования

Перед началом разработки основных положений комплексной методики диагностики изоляции необходимо провести анализ отказов оборудования с фарфоровыми покрышками и опорно-стержневых изоляторов за последние годы для того, чтобы выявить наиболее часто встречающиеся виды дефектов, определиться с причинами их возникновения.

Авторами данной работы собрана статистика по отказам оборудования с фарфоровыми покрышками и опорно-стержневых изоляторов, используемых на одной из российских железных дорог, за период с 1996 г. по 2024 г. (табл. 1). Для наибольшей наглядности представим данные по отказам в виде диаграммы Парето (рис. 1).

Таблица 1. Отказы различных видов фарфоровой изоляции
Table 1. Failures of various types of porcelain insulation

Год Year	Наименование распределительного устройства, кВ Name of distribution device, kV	Виды отказов оборудования и изоляторов Types of equipment and insulator failures
1996	27,5	Разрушение нижнего изолятора выключателя ВВФ-27,5 Destruction of the lower insulator of the VVF-27,5 switch
1998	35	Взрыв ввода МВ-35 Explosion of the MV-35 bushing
2005	220	Пробой изоляции ввода ВМТ-220 кВ Breakdown of the insulation of the VMT-220 kV bushing
	110	Повреждение фарфоровой крышки ВМТ-110 Damage to the porcelain cover of the VMT-110
	27,5	Полное разрушение ТФЗМ-35А Complete destruction of the TFZM-35A
2006	27,5	Повреждение ввода выключателя ВВУ-27,5 Damage to the bushing of the VVU-27.5 switch
2007	10	Повреждение ввода ВМ-10 Т-1 фазы «А» Damage to the VM-10 T-1 bushing of phase «A»
	27,5	Излом опорного изолятора ШР 1 с.ш. фазы «С» Fracture of the support insulator of the ShR 1 s.sh. phase «C»
	110	Повреждение ввода 110 кВ В-110 Т-4. Damage to the 110 kV input V-110 T-4
	10	Перекрытие проходного изолятора ИП-10 ввода ВМ-10 Т-1 фазы «А» Flashover of the IP-10 feedthrough insulator of the VM-10 T-1 input of phase «A»
	27,5	Излом нижнего изолятора РНДЗ-27,5 Fracture of the lower insulator RNDZ-27,5
	110	Повреждение ввода 110 кВ выключателя В-110 Т-4 Damage to the 110 kV input V-110 T-4
	27,5	Излом нижнего изолятора РНДЗ-27,5 Fracture of the lower insulator RNDZ-27,5
	27,5	Излом опорного изолятора ШР 1 с.ш. фазы «С» Fracture of the support insulator SR 1 N.I. phase «C»
2008	110	Повреждение колонки изолятора РС-110. Damage to the column of the insulator RS-110
2009	27,5	Повреждение МВ фидера № 1 Damage to the MV feeder No 1
2010	27,5	Круговая трещина фарфоровой крышки ВМУЭ-27,5 Circular crack of the porcelain cover VMUE-27,5
2011	35	Повреждение ТН ЗНОМ-35-54 Damage to the VT ZNOM-35-54
	220	Разрушение верхней рубашки высоковольтного ввода СВ-220 фазы «С» в ст. 1 с.ш. Destruction of the upper jacket of the high-voltage bushing SV-220 phase «C» in st. 1 N.I.
	220	Разрушение верхней рубашки ввода СВ-220 фазы «С» Destruction of the upper jacket of the SV-220 phase «C» bushing
2012	110	Разрушение вводов фазы «С» МКП-110 Destruction of the phase «C» bushings MKP-110
2014	27,5	Круговая трещина фарфоровой крышки ВБН-27,5 Circular crack of the porcelain cover VBN-27,5
	110	Отключение МВ-110 кВ вследствие разрушения ввода Disconnection of MV-110 kV due to bushing destruction
	110	Излом изолятора типа ИОС-400

		Fracture of the IOS-400 type insulator
2015	27,5	Разгерметизация камеры и разрушение фарфора ВВУ-27,5 Depressurization of the chamber and destruction of the porcelain VVU-27,5
	27,5	Повреждение фарфоровой изоляции ТТ 27,5 кВ Damage to the porcelain insulation of the 27,5 kV CT
	27,5	Излом колонки изолятора ШР-2ФКС Fracture of the column of the ShR-2FKS insulator
	110	Излом оголовника фазы «А» в сторону ВЛ Fracture of the phase «A» head towards the overhead line
2016	27,5	Повреждение высоковольтного ввода выключателя ВБЭТ-27,5 Damage to the high-voltage bushing of the VBET-27.5 circuit breaker
	27,5	Разрушение фарфоровой изоляции ОПН-27,5-2ТН желтой фазы Destruction of the porcelain insulation of the OPN-27,5-2TN yellow phase
	110	Излом колонки разъединителя 110 кВ Fracture of 110 kV disconnector column
	27,5	Излом колонки разъединителя ШР-1-27, повлекшее повреждение ячейки РУ-27,5 Fracture of SR-1-27 disconnector column, resulting in damage to RU-27,5 cell
	110	Лопнула рубашка изоляции полюса ВМТ-110 2Т Insulation jacket of VMT-110 2T pole burst
	220	Разрушение ОПН-220 1Т «С» Destruction of OPN-220 1T «C»
	35	Излом колонки разъединителя 2 РП Fracture of 2 RP disconnector column
2017	27,5	Повреждение выключателя ВКУ-27,5 Damage to VKU-27,5 circuit breaker
	110	Излом колонки изолятора разъединителя ЛР-110 Fracture of LR-110 disconnector insulator column
	110	Излом опорного изолятора ЛР-110 Fracture of LR-110 support insulator
	35	Излом по верхнему фланцу опорного изолятора ИОС-35-500 м/р ШС-4 Fracture along the upper flange of the IOS-35-500 support insulator m/r SHS-4
2018	110	Излом колонки изолятора разъединителя ЛР-110 Fracture of LR-110 disconnector insulator column
	10	Разрушение изолятора средней фазы ТР-10 2Т Destruction of the middle phase insulator TR-10 2T
	35	Разрушение изолятора ФСФ-70 Failure of FSF-70 insulator
2019	10	Разрушение опорного изолятора ввода 10 кВ 2Т Failure of 10 kV input support insulator 2T
	220	Излом верхней колонки изолятора фазы «С» РП-1-220 Fracture of upper column of phase «C» insulator RP-1-220
	220	Повреждение колонки изолятора ШР-1-220 2Т Damage to column of insulator ШР-1-220 2T
2019	10	Разрушение опорного изолятора на вводе 10 кВ 2Т Failure of support insulator at 10 kV input 2T
	10	Перекрытие изоляции В-10 Flashover of insulation V-10
	110	Излом изолятора разъединителя ЛР-110 Fracture of disconnector insulator LR-110
	220	Разрушение фазы «А» ВМТ-220 Failure of phase «A» VMT-220
	35	Перекрытие изоляции ТТ 35 кВ Flashover of 35 kV TT insulation
	110	ТФЗМБ-110 300/5 TFZMB-110 300/5

2020	10	Повреждение верхнего опорного изолятора РС-11 Damage to upper support insulator RS-11
	110	Трещина в нижней рубашке фазы С ВМТ-110 Crack in lower jacket of phase C VMT-110
	27,5	Разрушение изоляции ТН-35 Insulation failure TN-35
	110	Повреждение высоковольтного ввода выключателя МКП-110 Damage to high-voltage input of circuit breaker MKP-110
2021	110	Излом изолятора ШР-110 Insulator failure ShR-110
	110	Повреждение высоковольтного ввода МКП-110 Damage to high-voltage input MKP-110
	110	Разрушение несущей части изолятора ОД-110 2Т Destruction of supporting part of insulator OD-110 2T
	2×27,5	Излом изолятора разъединителя ЛР ФТС-3 Insulator failure of disconnector LR FTS-3
	10	Повреждение проходного изолятора в ячейке В-10 Damage to bushing insulator in cell B-10
2022	110	Излом опорного изолятора типа ОНС-110/600 на разъединителе РП-1-220 фазы «А» Fracture of support insulator type ONS-110/600 on disconnector RP-1-220 phase «A»
	35	Повреждение ВБПС-35 по причине перекрытия полюса Damage to VBPS-35 due to pole overlap
2023	35	Излом у нижнего фланца изолятора ОНС-35/500 Fracture at lower flange of insulator ONS-35/500
2024	110	Повреждение опорного изолятора ОНС-110/600 Damage to the support insulator ONS-110/600
	220	Разрушение высоковольтного ввода фазы «А» В-220 Destruction of the high-voltage input of phase «A» B-220
	10	Излом колонки изолятора РС-11 фазы «А» Fracture of the column of the insulator RS-11 of phase «A»
	27,5	Скол оголовника изолятора обходного разъединителя ОР-40 Chipping of the head of the insulator of the bypass disconnector OR-40
	27,5	Скол оголовника изолятора обходного разъединителя ОР-39 Chipping of the head of the insulator of the bypass disconnector OR-39
	110	Трещина у основания опорного изолятора фазы «В» ЛР-110 Crack at the base of the support insulator of phase «B» LR-110
	110	Излом опорно-стержневого изолятора ИОС-110-400 Fracture of the support-rod insulator IOS-110-400
	110	Течь масла по нижнему фланцу изолятора полюса фазы «А» СВ-110 Oil leak along the lower flange of the pole insulator of phase «A» SV-110

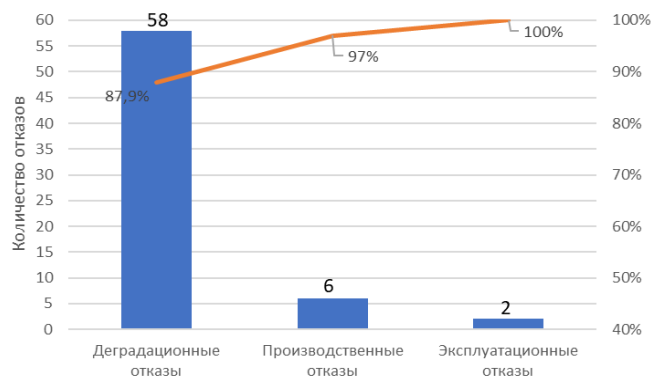


Рис. 1. Анализ отказов фарфоровой изоляции

Fig. 1. Analyses of porcelain insulation failures

Диаграмма (см. рис. 1) явным образом доказывает, что основной причиной отказов оборудования с фарфоровыми покрышками и опорно-стержневых изоляторов является старение изоляции, так как на деградационные отказы приходится 87,9 % отказов от их общего числа. Следовательно, необходимо для предотвращения серьезных последствий таких отказов осуществлять своевременную качественную диагностику фарфоровой изоляции. При этом с

целью обнаружения всех возможных видов дефектов нужно разработать комплексную методику диагностики на базе наиболее эффективных ее методов.

Сравнительный анализ методов диагностики

Для выявления наиболее эффективных методов диагностики выполнено их сравнение по ряду критериев (табл. 2).

Таблица 2. Сравнение методов диагностики

Table 2. Comparison of diagnostic methods

Наименование метода Name of the method	Суть метода (кратко) The essence of the method (briefly)	Вид выявляемого дефекта Type of defect detected	Достоинства Advantages	Недостатки Disadvantages
Визуальный контроль Visual inspection	Визуальный осмотр покрышек (изоляторов) на наличие видимых повреждений Visual inspection of tires (insulators) for visible damage	Наружные трещины External cracks	Метод наименее затратный, более легкий в усвоении и применении The method is the least expensive, easier to learn and apply	Большое влияние человеческого фактора, невозможность выявления внутренних дефектов Large influence of the human factor, the inability to detect internal defects
Ультразвуковой неразрушающий контроль (прибор УДС2ВФ-ЦИВОМ-ЭП) Ultrasonic non-destructive testing (device UDS2VF-TSIVOM-EP)	Выявление сколов и трещин в полости изолятора с помощью ультразвуковых волн, направленных через материал, регистрируемых и анализируемых для выявления дефектов Detection of chips and cracks in the insulator cavity using ultrasonic waves directed through the material, recorded and analyzed to detect defects	Выявление как микроскопической пористости фарфора, так и макроскопических дефектов «опасных» сечений Detection of both microscopic porosity of porcelain and macroscopic defects of «dangerous» cross-sections	Метод эффективен, позволяет на начальном этапе выявить скрытые дефекты, что может предотвратить серьезные аварии на энергообъекте The method is effective, it allows you to identify hidden defects at the initial stage, which can prevent serious accidents at the power facility	Не рассчитан на выявление околоповерхностных макроскопических дефектов и усталостных дефектов Is not designed to detect about-surface macroscopic defects and fatigue defects
Акустическая эмиссия (прибор ПАК-3М) Acoustic emission (PAK-3M device)	Основан на регистрации нарушения так называемого «эффекта Кайзера» при повторном нагружении дефектного изолятора [7]	Усталостные повреждения в изоляторах Fatigue damage in insulators	Высокая степень выявления дефектов, возможность определения остаточной несущей способности High degree of detection of defects, the	Требуется времени и трудоемко, возможно ухудшение характеристик Requires time and labor, and the characteristics may deteriorate

	It is based on recording violations of the so-called «Kaiser effect» during repeated loading of a defective insulator [7]		ability to determine the residual load-bearing capacity	
Метод фуксиновой пробы (прибор ЦВД-250-3) Fuchsin test method (CVD-250-3 device)	Метод фуксиновой пробы под давлением (ФПД) используется на образцах, отобранных из разрушенных изоляторов The fuchsin pressure test method is used on samples taken from destroyed insulators	Внутренние повреждения полости покрышек и изоляторов Internal damage to the cavity of tires and insulators	Возможность выявления причины разрушения изолятора The ability to identify the cause of insulator failure	Полный разбор оборудования, требует времени, невозможность проверки покрышек и изоляторов, находящихся в работе Complete analysis of equipment, requires time, the inability to check tires and insulators that are in operation
Виброакустический метод (метод вынужденных колебаний) (прибор МИК-1) Vibroacoustic method (forced vibration method) (MIK-1 device)	Определяется по оценке спектральной плотности мощности (СПМ) реакции изолятора на воздействие случайной вибрации с плоским спектром It is determined by evaluating the power spectral density of the insulator response to random vibration with a flat spectrum	Остаточная несущая способность Residual load-bearing capacity	Не требует много времени, возможность диагностирования под напряжением Does not require much time, the ability to diagnose under voltage	Необходимо обучение персонала для корректной интерпретации результатов исследования Personnel training is required for correct interpretation of the study results
Тепловизионный метод (прибор Prism DS) Thermal imaging method (Prism device DS)	Выявление дефектов высоковольтного оборудования, вызывающих изменение температуры дефектных элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного излучения Detection of defects in high-voltage equipment that cause changes in the temperature of defective elements and, as a result, changes in the intensity of infrared radiation	Коронарные разряды, пробой внутренней полости покрышки Coronary discharges, breakdown of the inner cavity of the tire	Оборудование не нужно выводить в ремонт и обесточивать. Выявляет как наружные, так и внутренние дефекты Equipment does not need to be taken out for repair and deenergized. It detects both external and internal defects	Использовать можно только в вечернее и ночное время. Информацию об остаточной несущей способности изолятора не дает Can only be used in the evening and at night. Information about the residual load-bearing capacity of the insulator is not provided

Визуально-акустический метод (визуально-акустический дефектоскоп NL-камера) Visual-acoustic method (visual-acoustic flaw detector NL-camera)	Выявление наружных и внутренних коронарных разрядов за счет направленных ультразвуковых микрофонов [8] Detection of external and internal coronary discharges using directional ultrasound microphones [8]	Наружные и внутренние коронарные разряды External and internal coronary discharges	Оборудование не нужно выводить в ремонт и обесточивать. Выявляет как наружные, так и внутренние дефекты Do not need to be repaired or de-energized. Detects both external and internal defects	Не дает информацию о механических повреждениях изолятора и его остаточной несущей способности Does not provide information about mechanical damage to the insulator and its residual load-bearing capacity
---	---	---	---	---

Анализ данных (см. табл. 2) свидетельствует о том, что ни один из существующих методов диагностики изоляции не позволяет получить полную информацию обо всех возможных дефектах одновременно. В связи с этим наиболее эффективным решением является применение комплексного подхода, включающего несколько методов контроля.

Визуальный осмотр помогает обнаружить до 40 % внешних трещин, ультразвуковая неразрушающая диагностика позволяет выявить скрытые дефекты, а тепловизионный или визуально-акустический метод обеспечивают обнаружение как внешних, так и внутренних повреждений, причем без необходимости отключения оборудования [15–18].

При этом использование тепловизионного метода отличается следующим:

- обеспечивается существенная достоверность результатов за счет минимальной погрешности применяемых диагностических приборов;
- не оказывается влияние на состояние объекта обследования, т.е. является одним из методов неразрушающего контроля;
- не требуется предварительная подготовка обследуемого оборудования.

В случае применения метода ультразвукового неразрушающего контроля (УЗНК) обеспечивается:

- меньшие финансовые затраты ввиду более низкой стоимости реализации данного метода;
- отсутствие опасного влияния на специалиста, выполняющего обследование объекта;
- удобство применения приборов в связи с их небольшими габаритами;
- отсутствие значительной погрешности результатов;
- не приводит к разрушению объекта исследования [19, 20].

Комплексная методика диагностики

Разработка предложений авторами по комплексному методу осуществлялась поэтапно. При оценочном исследовании имеющихся методов диагностики проведен ряд экспериментов, в ходе которых использовались различные приборы, необходимые для осуществления отдельных методов диагностики. Итоги диагностики с применением ультрафиолетового дефектоскопа показаны на рис. 2. При использовании такого метода высока вероятность фиксации камерой прибора разрядов, находящихся на достаточно большом расстоянии от изолятора, что говорит о невысокой точности данного метода.

При проведении эксперимента тепловизионной камерой (рис. 3) зафиксировать пробой по поверхности изолятора существенно сложнее, однако появляется возможность выявить внутренние дефекты: при длительном протекании тока по внутренней поверхности изолятора происходит его нагрев, который можно зафиксировать при применении данного метода.

Прибором для ультразвукового неразрушающего контроля УДС2ВФ-ЦИВОМ-ЭП (рис. 4) продиагностирован ряд фарфоровых крышек и опорно-стержневых изоляторов. Большое количество насадок для прибора и обширный диапазон частот ультразвуковых волн позволяют максимально точно локализовать повреждение, выявить малейшие сколы и микротрещины внутри изолятора.

Прибор для акустической диагностики МЕТАКОН-ЭКСПРЕСС (рис. 5) позволяет достаточно быстро проверить состояние изолятора, однако его низкая универсальность (можно диагностировать только опорно-стержневые изоляторы на 220 кВ определенных марок), а также невысокая достоверность результатов диагностирования (при проведении экспериментов прибор неоднократно на одном и том

же образце выдавал различную оценку его состояния) показали, что он неэффективен при проверке изоляторов различных видов.

Недостатки ультрафиолетового метода устраняются в NL-камере, приборе для визуально-акустического контроля (рис. 6). За счет наличия 144 направленных микрофонов данным прибором можно максимально точно установить место возникновения разрядов, а программное обеспечение дает возможность

быстро определить тип разрядов и построить частотную характеристику.

На основании информации, полученной при анализе методов и проведении ряда экспериментов, авторами данного исследования разработана комплексная методика диагностики, которая включает в себя применение визуального, тепловизионного, визуально-акустического методов и ультразвукового неразрушающего контроля. Общая структура методики показана на рис. 7.

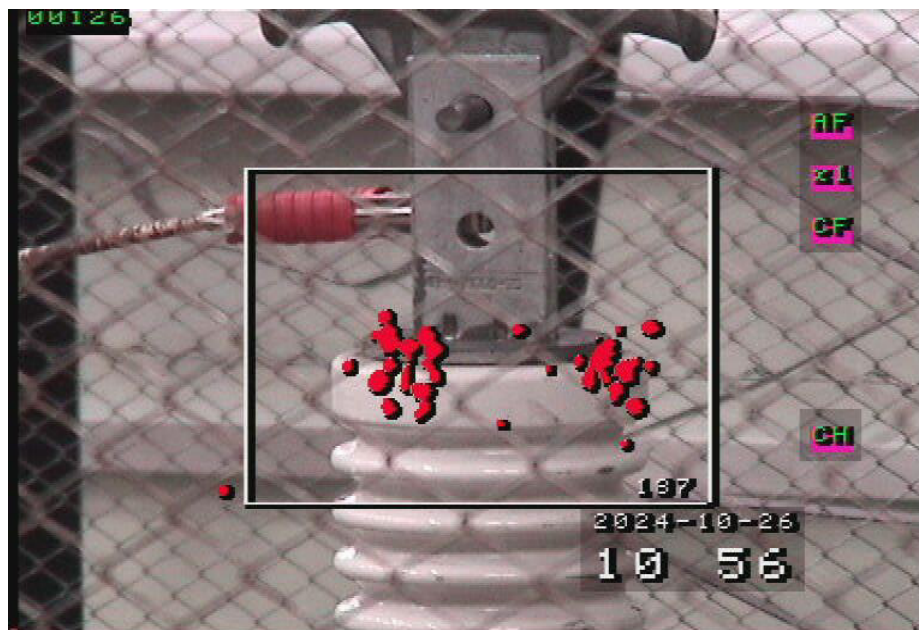


Рис. 2. Ультрафиолетовая камера

Fig. 2. Ultraviolet chamber

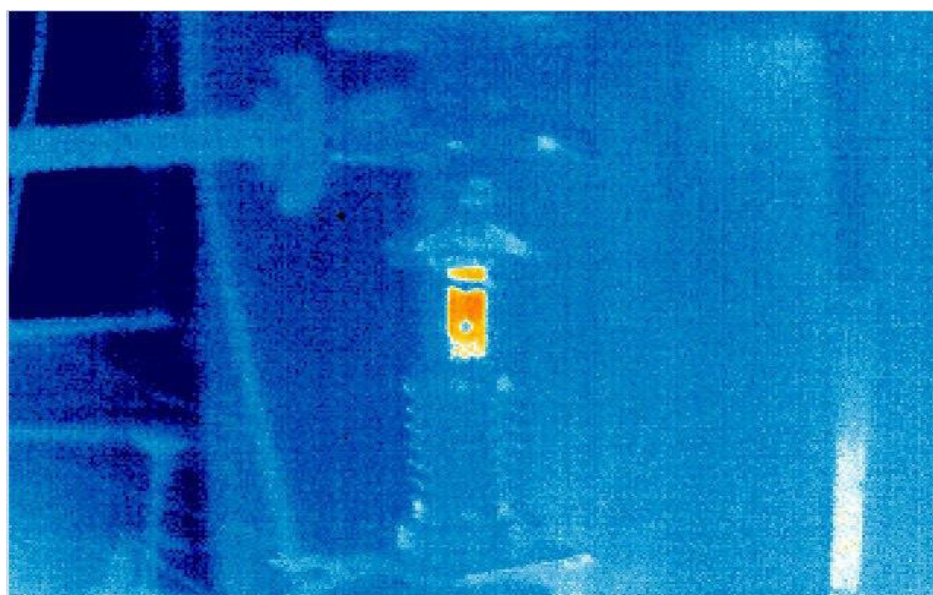


Рис. 3. Применение тепловизионного метода

Fig. 3. Application of the thermal imaging method

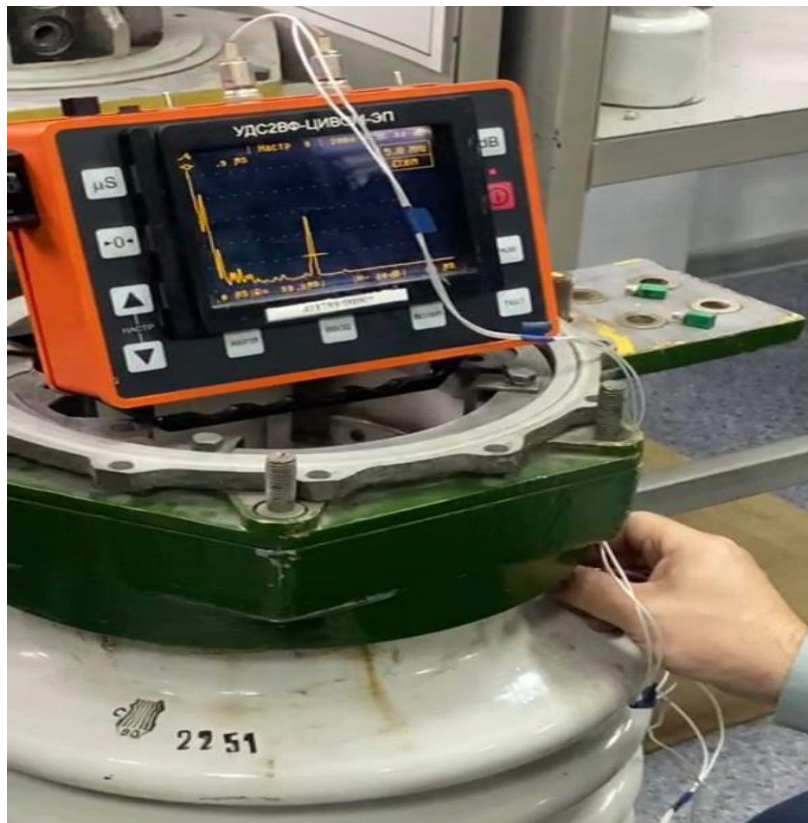


Рис. 4. Ультразвуковой неразрушающий контроль
Fig. 4. Ultrasonic non-destructive testing



Рис. 5. Акустический контроль
Fig. 5. Acoustic control

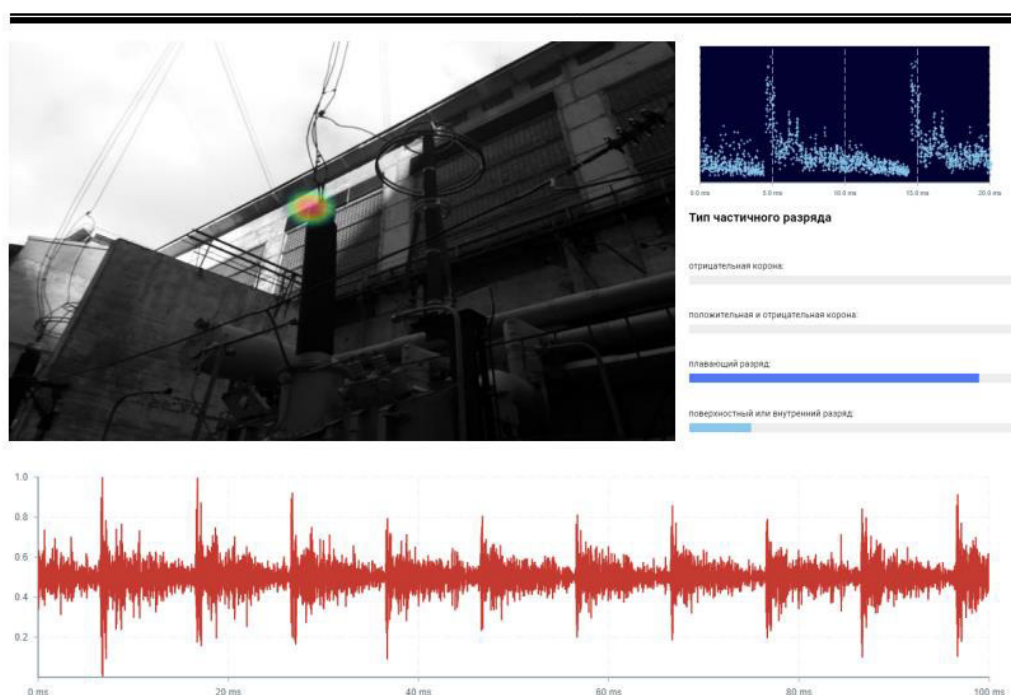


Рис. 6. Визуально-акустический контроль

Fig. 6. Visual and acoustic control

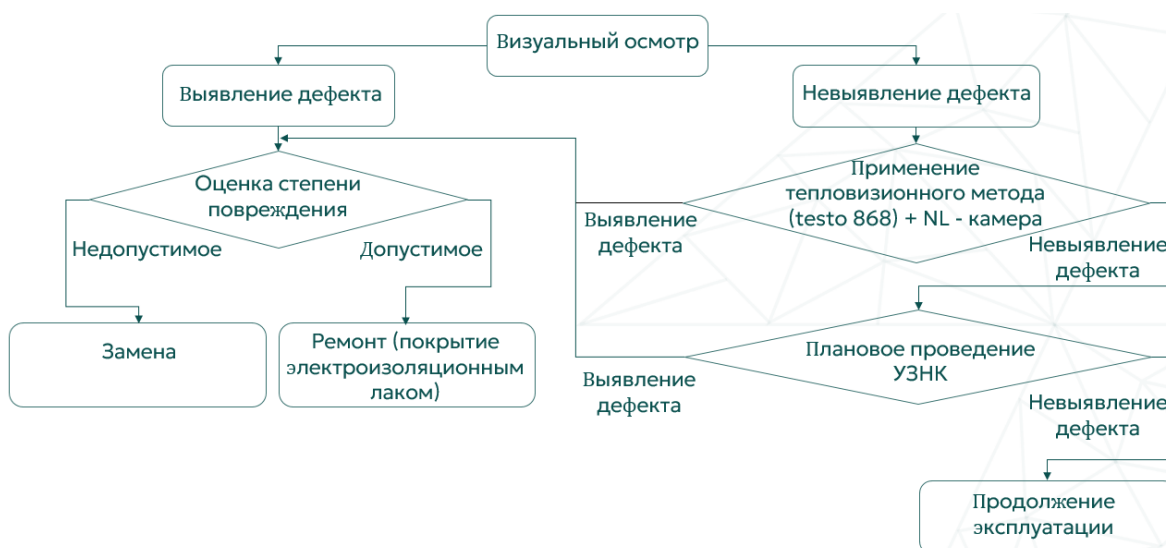


Рис. 7. Структурная схема комплексной диагностики

Fig. 7. Structural diagram of complex diagnostics

Согласно этой методике (см. рис. 7) процесс диагностики будет проходить поэтапно. Первый этап заключается в визуальном осмотре. По его результатам будет принято решение либо об отсутствии необходимости дальнейшего диагностирования в случае выявления явных видимых поверхностных дефектов изоляции и вынесено заключение по замене покрывки или изолятора, либо, при наличии допустимых по-

верхностных дефектов, будут рекомендованы частичный ремонт или использование более глубокого метода диагностирования.

В последнем случае на втором этапе, согласно разработанной методике, должно быть выполнено тепловизионное обследование. Его результаты при выявлении дефекта выводят на тот же путь, что соответствует первому этапу с учетом оценки степени повреждения. В случае

же невыявления дефекта нужно в плановом порядке через определенный период времени применить такой метод диагностики, как УЗНК. При выявлении дефекта вновь уходим по пути первого этапа, при невыявлении приходим к заключению об отсутствии дефектов в изоляции и возможности продолжения эксплуатации оборудования с фарфоровыми крышками или опорно-стержневыми изоляторами.

Считаем, что существенным достоинством данной методики будет рост количества выявляемых дефектов при незначительном увеличении времени диагностики. Внедрение разработанной методики приведет к сокращению числа отказов оборудования и изоляторов, предотвратит ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителям, повысит надежность работы электроустановок.

Заключение

Для повышения надежности работы систем электроснабжения, в том числе и на элек-

трифицированных железных дорогах, необходимо внедрять современные методы неразрушающего контроля фарфоровых изоляторов и крышек оборудования, проводить регулярные диагностические мероприятия и учитывать влияние как электрических, так и механических факторов на состояние изоляции. С целью реализации поставленных задач предлагается использовать на практике разработанную комплексную методику диагностирования изоляции. Это позволит своевременно выявлять и устранять дефекты, предотвращая аварийные ситуации и обеспечивая стабильную работу энергетических систем [18–20].

Для электрифицированных железных дорог основным результатом использования предложенной методики будет повышение уровня безопасности перевозочного процесса, сокращение расходов на замену поврежденного оборудования, стабильность обеспечения электроэнергией потребителей.

Список литературы

1. Хамматуллин Д.К. Методы контроля фарфоровых изоляторов высоковольтных разъединителей // *Мировая наука*. 2022. № 2 (59). С. 106–108.
2. Методы диагностирования электрооборудования / А.А. Манаенков, Д.В. Гурьянов, А.В. Чувишкин и др. // *Наука и образование*. 2021. Т. 4. № 2. URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_47110489_38929421.pdf (Дата обращения 28.02.2025).
3. Черепанов А.В., Бардушко А.Ю. Анализ режимов системы тягового электроснабжения на участке Зима – Гончарово при внедрении систем АБТЦ-МШ и «виртуальная сцепка» // *Молодая наука Сибири*. 2023. № 1 (19). С. 100–108. URL: <https://ojs.irsups.ru/index.php/mns/article/view/1073> (Дата обращения 18.03.2025)
4. Крапивин М.И., Пузина Е.Ю. Разработка предложений по устранению лимитирующих межподстанционных зон при развитии Восточного полигона // *Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2024*. С. 61–65.
5. Крапивин М.И., Куцкий А.П., Пузина Е.Ю. Разработка технических решений по увеличению пропускной способности системы тягового электроснабжения участка Восточного полигона // *Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. Сургут, 2024*. С. 180–186.
6. Бардушко А.Ю., Куцкий А.П. Повышение пропускной способности электрифицированного участка железной дороги Якурия – Киренга на перспективу // *Молодая наука Сибири*. 2023. № 4 (22). С. 182–193.
7. Вибрационный контроль механического состояния опорно-стержневых фарфоровых изоляторов звуковым и низкочастотным ультразвуковым методами / А.М. Гатауллин, А.А. Наумов, Д.Ф. Губаев и др. // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2008. № 1-2. С. 112–118.
8. Колмаков В.О., Калошина В.Г., Курчевский М.С. Система диагностики изоляции контактной сети по ультрафиолетовому излучению // *Аллея науки*. 2020. Т. 1. № 10 (49). С. 202–205.
9. Тепловизионный контроль изоляторов распределительных устройств и воздушных линий электропередач напряжением 0,4–220 кВ / А.Н. Шпиганович, А.Н. Мамонтов, К.А. Пушница и др. // *Вести высших учебных заведений Черного моря*. 2020. № 2 (60). С. 18–27.
10. Диагностика фарфоровых изоляторов по характеристикам частичных разрядов / А.М. Гатауллин, А.Н. Гавриленко, Ю.В. Писковацкий и др. // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2024. Т. 26. № 5. С. 19–30.
11. Галаган Р.М., Еременко В.С. Ультразвуковая система диагностики технического состояния фарфоровых изоляторов // *Вестн. Национал. техн. ун-та Украины «Киевский политехнический институт»*. Сер.: Приборостроение. 2011. № 42. С. 62–70.
12. Диагностика механического состояния опорно-стержневой фарфоровой изоляции высоковольтных разъединителей в условиях эксплуатации / В.Э. Вороничкин, И.Н. Дмитриев, А.В. Млотов и др. // *Энергия единой сети*. 2014. № 2 (13). С. 2–14.
13. Смирнов В.В., Скидан А.А., Кавун А.И. Анализ диагностики механического состояния опорно-стержневых изоляторов методом акустической эмиссии // *Энергетические установки и технологии*. 2019. Т. 5. № 1. С. 116–119.
14. Зарипов Д.К. Методы дистанционного контроля состояния многоэлементных изолирующих конструкций электрифицированных железных дорог : автореф. дис. . канд. техн. наук. Казань, 2006. 16 с.

15. Луковенко А.С. Система диагностики опорно-стержневой фарфоровой изоляции на цифровых подстанциях // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 6 (57). С. 106–111.
16. Дуля А.А. Технические средства и технология диагностирования подвесных фарфоровых тарельчатых изоляторов // Теория и практика современной науки. 2017. № 6 (24). С. 271–274.
17. Завидей В.И. Дистанционные методы и системы дефектоскопии высоковольтной изоляции электрооборудования по оптическому излучению // Новое в российской электроэнергетике. 2010. № 9. С. 5–12.
18. Кузнецов А.А., Кузьменко А.Ю. Методика дистанционного диагностирования подвесных фарфоровых изоляторов контактной сети постоянного тока // Известия Транссиба. 2019. № 1 (37). С. 64–72.
19. Рейх Е.Н., Сыченко В.Г., Ким Е.Д. Анализ методов и средств диагностирования для оценки состояния изоляторов контактной сети // Электрификация транспорта. 2012. № 4. С. 54–62.
20. Куценко С.М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта : дис. . канд. техн. наук. Иркутск, 2006. 143 с.

References

1. Khammatulin D.K. Metody kontrolya farforovykh izolyatorov vysokovol'tnykh raz''edinitelei [Methods of control of porcelain insulators of high-voltage disconnectors]. *Mirovaya nauka* [World science], 2022, no 2 (59), pp. 106–108.
2. Manaenkov A.A., Gur'yanov D.V., Chuvilkin A.V., Naidenov A.A. Metody diagnostirovaniya elektrooborudovaniya [Methods for diagnosing electrical equipment]. *Nauka i obrazovanie* [Science and education], 2021, Vol. 4, no 2. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_47110489_38929421.pdf (Accessed February 28, 2025).
3. Cherepanov A.V., Bardushko A.Yu. Analiz rezhimov sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya na uchastke Zima – Goncharovo pri vnedrenii sistem ABTTs-MSH i «virtual'naya stsepk» [Analysis of traction power supply system modes in the Zima – Goncharovo section during the implementation of the ABTC-MSH and virtual coupling systems]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 1 (19), pp. 100–108.
4. Krapivin M.I., Puzina E.Yu. Razrabotka predlozhenii po ustraneniyu limitiruyushchikh mezhpodstantsionnykh zon pri razviti Vostochnogo poligona [Development of proposals for the elimination of limiting substation zones in the development of the Eastern polygon]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Issledovanie i razvitie rel'sovogo i avtomobil'nogo transporta»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Research and development of rail and road transport»]. Ekaterinburg, 2024, pp. 61–65.
5. Krapivin M.I., Kutsyi A.P., Puzina E.Yu. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po uvelicheniyu propusknoi sposobnosti sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Vostochnogo poligona [Development of technical solutions to increase the capacity of the traction power supply system of the Eastern polygon site]. *Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy elektroenergetiki i telekommunikatsii Severa Rossii»* [Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference «Problems of electric power industry and telecommunications of the North of Russia»]. Moscow, 2024, pp. 180–186.
6. Bardushko A.Yu., Kutsyi A.P. Povyshenie propusknoi sposobnosti elektrifitsirovannogo uchastka zheleznoi dorogi Yakurim – Kirenga na perspektivu [Increasing the capacity of the electrified section of the Yakurim – Kirenga railway for the future]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no 4 (22), pp. 182–193.
7. Gataullin A.M., Naumov A.A., Gubaev D.F., Schmidt S.V. Vibratsionnyi kontrol' mekhanicheskogo sostoyaniya oporno-sterzhnevyykh farforovykh izolyatorov zvukovym i nizkochastotnym ul'trazvukovym metodami [Vibration control of the mechanical state of support-rod porcelain insulators by sound and low-frequency ultrasonic methods]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Bulletins of higher educational organizations. Energy problems], 2008, no 1-2, pp. 112–118.
8. Kolmakov V.O., Kaloshina V.G., Kurchevskii M.S. Sistema diagnostiki izolyatsii kontaktnoi seti po ul'traioletovomu izlucheniuyu [A system for diagnosing the insulation of a contact network by ultraviolet radiation]. *Alleya nauki* [Alley of Science], 2020, Vol. 1, no 10 (49), pp. 202–205.
9. Shpiganovich A.N., Mamontov A.N., Pushnitsa K.A., Kustov A.N. Teplovizionnyi kontrol' izolyatorov raspredelitel'nykh ustroystv i vozdukhnykh liniy elektroperedach napryazheniem 0,4-220 kV [Thermal imaging monitoring of switchgear insulators and overhead power lines with a voltage of 0,4-220 kV]. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya* [Bulletins of higher educational organizations of the Chernozem region], 2020, no 2 (60), pp. 18–27.
10. Gataullin A.M., Gavrilenko A.N., Piskovatskii Yu.V., Minkin A.S. Diagnostika farforovykh izolyatorov po kharakteristikam chastichnykh razryadov [Diagnostics of porcelain insulators based on partial discharge characteristics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Bulletins of higher educational organizations. Energy problems], 2024, Vol. 26, no 5, pp. 19–30.
11. Galagan R.M., Eremenko V.S. Ul'trazvukovaya sistema diagnostiki tekhnicheskogo sostoyaniya farforovykh izolyatorov [Ultrasonic diagnostic system for the technical condition of porcelain insulators]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy «Kievskii politekhnicheskii institut». Seriya: Priborostroenie* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series: Instrument engineering], 2011, no 42, pp. 62–70.
12. Vorotnitskii V.E., Dmitriev I.N., Mlotok A.V., Demin A.N. Diagnostika mekhanicheskogo sostoyaniya oporno-sterzhnevoi farforovoi izolyatsii vysokovol'tnykh raz''edinitelei v usloviyakh ekspluatatsii [Diagnostics of the mechanical condition of the support-rod porcelain insulation of high-voltage disconnectors under operating conditions]. *Energiya edinoy seti* [United Grid Energy], 2014, no 2 (13), pp. 2–14.
13. Smirnov V.V., Skidan A.A., Kavun A.I. Analiz diagnostiki mekhanicheskogo sostoyaniya oporno-sterzhnevyykh izolyatorov metodom akusticheskoi emissii [Analysis of diagnostics of the mechanical state of support-rod insulators by acoustic emission method]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* [Energy installations and technologies], 2019, Vol. 5, no 1, pp. 116–119.

14. Zaripov D.K. Metody distantsionnogo kontrolya sostoyaniya mnogoelementnykh izoliruyushchikh konstruktii elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Methods of remote monitoring of the condition of multi-element insulating structures of electrified railways]. Ph.D.'s theses. Kazan', 2006. 16 p.
15. Lukovenko A.S. Sistema diagnostiki oporno-sterzhnevoi farforovoi izolyatsii na tsifrovyykh podstantsiyakh [Diagnostic system of support-rod porcelain insulation at digital substations]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution], 2019, no 6 (57), pp. 106–111.
16. Dulya A.A. Tekhnicheskie sredstva i tekhnologiya diagnostirovaniya podvesnykh farforovykh tarel'chatykh izolyatorov [Technical means and technology of diagnostics of suspended porcelain plate insulators]. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki* [Theory and practice of modern science], 2017, no 6 (24), pp. 271–274.
17. Zavidei V.I. Distantsionnye metody i sistemy defektoskopii vysokovol'noi izolyatsii elektrooborudovaniya po optich-eskomu izlucheniyu [Remote methods and systems of flaw detection of high-voltage insulation of electrical equipment by optical radiation]. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike* [New in the Russian electric power industry], 2010, no 9, pp. 5–12.
18. Kuznetsov A.A., Kuz'menko A.Yu. Metodika distantsionnogo diagnostirovaniya podvesnykh farforovykh izolyatorov kontaktnoi seti postoyannogo toka [Methods of remote diagnosis of suspended porcelain insulators of a direct current contact network]. *Izvestiya Transsiba* [Bulletins of Transsib], 2019, no 1 (37), pp. 64–72.
19. Reikh E.N., Sychenko V.G., Kim E.D. Analiz metodov i sredstv diagnostirovaniya dlya otsenki sostoyaniya izolyatorov kontaktnoi seti [Analysis of diagnostic methods and tools for assessing the condition of contact network insulators]. *Elektrifikatsiya transportu* [Electrification of transport], 2012, no 4, pp. 54–62.
20. Kutsenko S.M. Razrabotka distantsionnoi diagnostiki lineinoi izolyatsii kontaktnoi seti zheleznodorozhnogo transporta [Development of remote diagnostics of linear isolation of the contact network of railway transport]. Ph.D.'s theses. Irkutsk, 2006. 143 p.

Информация об авторах

Бардушко Александр Юрьевич, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: aleksandr.bardushko@yandex.ru.

Крапивин Михаил Иванович, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: mihail.krapivin03@gmail.com.

Пузина Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Information about the authors

Aleksandr Yu. Bardushko, Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: aleksandr.bardushko@yandex.ru.

Mikhail I. Krapivin, Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: mihail.krapivin03@gmail.com.

Elena Yu. Puzina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.