

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Е.Л. Рыжова**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I  
Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

Использование комплексных систем технической диагностики электротехнической продукции на всех этапах ее жизненного цикла является одним из современных направлений развития техники. В настоящее время создаются сложные автоматизированные системы контроля технического состояния оборудования. Многие научные коллективы уделяют большое внимание проверке надежности электрооборудования тягового подвижного состава железных дорог, а также систем технической диагностики и ремонта. И все же проблема повышения надежности и prolongation срока службы электрических машин актуальна и сегодня, требует дальнейшего внимания, приобрела в последние годы большое социально-экономическое значение для железнодорожного транспорта и представляет научный и практический интерес. Показателем надежности электрооборудования является состояние его изоляции, которая в процессе эксплуатации электрической машины стареет, ухудшаются ее свойства и снижается диэлектрическая прочность. Изменения влажности окружающей среды и резкие перепады температуры часто сопровождаются конденсацией влаги на поверхности изоляции, что вызывает электрические пробой, носящие необратимый характер. Таким образом, доля отказов электрооборудования тягового подвижного состава из-за ухудшения состояния изоляции очень высока и наблюдается тенденция к общему снижению их надежности. В статье представлены методы оценки состояния изоляции тяговых двигателей, показаны усовершенствованные методы диагностики параметров изоляции тяговых электрических машин за счет внедрения инновационных технических средств. Описаны структура и схема инновационной автоматизированной системы комплексной диагностики состояния изоляции тяговых двигателей, и алгоритмы ее работы.

**Ключевые слова:** диагностика, износ, изоляция, инновационные технологии, надежность, отказ, тяговый электродвигатель.

**Для цитирования:** Рыжова, Е.Л. Инновационные технологии определения состояния изоляции тяговых электрических машин // Интеллектуальная Электротехника. 2022. № 1. С. 116-127. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_116

# INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR DETERMINING INSULATION CONDITION OF TRACTION ELECTRIC MACHINES

**E. L. Ryzhova**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0001-7984-2558 e-mail: elena-astanovskaja@rambler.ru

**Abstract.** The use of complex systems of technical diagnostics of electrical products at all stages of its life cycle is one of the modern directions of technology development. Currently, complex automated systems for monitoring the technical condition of equipment are being created. Many research teams pay great attention to checking the reliability of electrical equipment of traction rolling stock of railways, as well as technical diagnostics and repair systems. Nevertheless, the problem of increasing the reliability and extending the service life of electric machines is still relevant today, requires further attention, has acquired great socio-economic importance for railway transport in recent years and is of scientific and practical interest. An indicator of the reliability of electrical equipment is the state of its insulation, which ages during the operation of an electric machine, its properties deteriorate and the dielectric strength decreases. Changes in ambient humidity and sudden temperature changes are often accompanied by condensation of moisture on the insulation surface, which causes electrical breakdowns that are irreversible. Thus, the share of failures of electric equipment of traction rolling stock due to deterioration of the insulation condition is very high and there is a tendency to a general decrease in their reliability. The article presents methods for assessing the insulation condition of traction motors, shows improved methods for diagnosing the insulation parameters of traction electric machines through the introduction of innovative technical means. The structure and scheme of an innovative automated system for complex diagnostics of the insulation condition of traction motors and algorithms of its operation are described.

**Keywords:** diagnostics, failure, innovative technologies, insulation, reliability, traction motor, wear.

**For citation:** E.L. Ryzhov, “Innovative technologies for determining insulation condition of traction electric machines”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 116-127, 2022. DOI: 10.46960/2658-6754\_2022\_1\_116

## I. Введение

За последние несколько десятилетий тяговое машиностроение развивалось с целью увеличения коэффициента использования машин, их нагрузки. В современном виде теория надежности электрических машин и устройств тягового подвижного состава начала изучаться сравнительно недавно. При этом одновременно стали интенсивно разрабатываться и внедряться новые виды материалов, в том числе и изоляционных. Тем не менее,

запас прочности тяговых электрических машин (ТЭД), а вместе с тем, и устойчивости к различным воздействиям постепенно снижались. На изоляцию обмоток ТЭД воздействуют погодные условия (температура, влажность), электрические и магнитные поля, загрязнения от железнодорожного пути, динамические воздействия (переменные нагрузки, вибрации, тряска). Состояние межвитковой изоляции ТЭД – один из основных факторов, определяющих его надежность и влияющих на его работу. Поэтому оценка качества изоляции электродвигателей требует особого подхода, критериев и набора методов [1-3].

### **II. Объект и методика**

Надежность изоляции тяговых электродвигателей позволяет работать электрооборудованию электровозов безаварийно. В связи с комплексным воздействием на машины электротягового подвижного состава тепловых, электромагнитных, механических и климатических факторов, уровень их повреждаемости при эксплуатации высок и снижается за счет конструктивно-технологических мероприятий при изготовлении и ремонте. При этом необходим периодический контроль состояния изоляции для поддержания надежности электрооборудования, исключения внезапных пробоев изоляции, ухудшение ее свойств. В ходе проверок при обнаружении ухудшения состояния изоляции обмоток, ТЭД подвергается плано-предупредительному ремонту. При этом реальные условия эксплуатации не учитываются, а профилактика и ремонт ведутся по времени наработки. Стоимость капитального ремонта с необходимостью замены изоляции обмоток двигателя увеличивается в несколько раз, если произошел пробой изоляции из-за несвоевременной фиксации изменения ее свойств [3]. Старение изоляции происходит неодинаково и зависит от условий эксплуатации ТЭД. Для электродвигателя с небольшим или средним пробегом, как правило, производство среднего ремонта оказывается достаточным, т.е. чистки, пропитки и сушки изоляции обмотки. Поэтому для предотвращения внезапных отказов электрооборудования необходима текущая диагностика параметров электродвигателей, дающая возможность прогнозирования их технического состояния в интервалах между плановыми ремонтами. Заблаговременная подготовка тяговых электродвигателей к исключению возможной аварийной ситуации, грозящей не только выходом его из строя, но и финансовыми потерями, обеспечивает контроль электрических, механических и тепловых показателей ТЭД в условиях эксплуатации. Анализ статистики выходов из строя ТЭД указывает, что около 40 % отказов тягового электродвигателя возникает из-за изменения структуры изоляционных слоев, и, в конечном счете, электрического пробоя электроизоляции обмоток, являющихся одной их самых отказоопасных областей в его структуре [4, 5].

В настоящее время для диагностики электрических машин и электрооборудования локомотивов применяют традиционные технические средства: мегаомметры, стенды для контроля электрического сопротивления изоляции между витками обмоток и катушками якоря, амперметры, вольтметры, мосты постоянного тока универсального измерения. Состояние электрической изоляции, механические повреждения открытых участков неизолированных проводников определяют измерением активного сопротивления относительно корпуса методом падения напряжения измерительным мостом или методом «амперметр-вольтметр» мегомметром, и сравнивают его с действующими нормами. Для определения запаса электрической прочности межвитковой изоляции якорных обмоток в течение определенного времени производят ее испытание повышенным напряжением, при котором могут развиваться частичные разряды до момента пробоя. При этом сопротивление относительно корпуса не должно быть ниже установленной нормы. Если во время определения прочности изоляции произошло ее пробоя или перекрытия разрядами, полученные результаты испытаний принимают удовлетворительными [6, 7].

Чтобы избежать принятия ошибочного решения о замене тягового двигателя, а вместо этого восстановить его изоляцию, необходима оценка состояния степени ее увлаженности по коэффициенту абсорбции. Сегодня степень увлажнения изоляции с высокой точностью оценивают, а также определяют сопротивление изоляции с помощью специальных универсальных переносных приборов диагностирования, электронных мегомметров, позволяющих измерять не только сопротивление, но и качество пропитки изоляции. Для объективной оценки состояния изоляции используют прибор, работающий на основе метода сравнения емкостей изоляции, определенных при различных частотах приложенного напряжения, которым измеряют абсорбционную емкость, а также специальные приборы контроля влажности. Данные устройства позволяют быстро обнаружить и устранить неисправность, выявить характер снижения изоляционных свойств контролируемой изоляции [6, 8, 9].

Правильность количественной и качественной оценок надежности тягового электродвигателя зависит не только от выбранных методов диагностирования, но и от контролируемых дискретных и основных аналоговых параметров, отражающих техническое состояние ТЭД. Для обеспечения надежности и определения ресурса работы узлов ТЭД, разработан автоматизированный комплекс диагностирования параметров, объединенных в общую систему с учетом их взаимозависимостей. Все параметры контролируются приборами и датчиками, которые передают информацию в ЭВМ, где она преобразуется из аналоговой формы в цифровую, распределяется в

определенной последовательности с помощью бесконтактных коммутаторов и демультимплексоров, выполненные в виде больших интегральных микросхем, увеличивающих скорость обработки информации. В блоки памяти заносится база данных с достоверной и исчерпывающей информацией на основе статистических данных о техническом состоянии каждого диагностируемого объекта. Для определения объективной зависимости характера нарастания износа от множества параметров применяют диагностические алгоритмы, основанные на результатах экспериментальных исследований [8, 9]. Таким образом, данная методика контроля технического состояния тяговых электродвигателей дает возможность повышать их надежность при эксплуатации, собирать и накапливать информацию об изменении параметров двигателя для прогнозирования ресурса работы ТЭД.

### III. Результаты исследования

Для перехода от системы обслуживания тяговых двигателей по пробегу к оценке по их фактическому техническому состоянию необходимы новые объективные, более содержательные методы оценки состояния изоляции. Разрушающие способы контроля технического состояния изоляции электромашин приводят к ее повреждению, сокращению срока службы тяговых двигателей, аварийным остановам и чрезмерным затратам на ремонт. В настоящее время разработаны и успешно развиваются неразрушающие методы контроля степени износа изоляции обмоток, основанные на измерении абсорбционной емкости, геометрической емкости, коэффициента поляризации, тангенса угла диэлектрических потерь, частичных разрядов температурного поля. Для определения этих параметров используются приборы ПКВ-7, МИК-2500, мост переменного тока Р5026, датчик частичных разрядов М4201, томограф ИРТИС-2000 и др. [8].

Контролируя частичные разряды (ЧР) в электрической изоляции ТЭД, можно предотвратить до 80 % отказов электродвигателей, задолго до их возникновения. На значительное ухудшение состояния изоляции указывает изменения интенсивности пиковых значений ЧР вследствие влияния окружающей среды и условий работы двигателя. Таким образом, анализируя частичные разряды можно на ранних этапах диагностики развития пробоя во времени предупредить ухудшение диэлектрических свойств изоляции [10, 11]. В качестве диагностической характеристики при определении степени неоднородности изоляции используют коэффициент абсорбции, который дает объективную оценку состояния изоляции, поскольку учитывает заряд поглощения. Выявление ухудшения свойств изоляции путем измерения ее сопротивления мегомметром и секундомером не позволяет определить коэффициент абсорбции электрической машины. Как показали ис-

следования, о старении изоляции без ее разрушения, можно судить по характеру поляризационных процессов. Определение обобщенного индекса поляризации (ТPI), применяемого в качестве характеристики процессов в изоляционных промежутках, является эффективным способом определения состояния изоляции ТЭД. Данный метод позволяет получить достоверную информацию о состоянии изоляционных промежутков посредством количественных параметров ТPI, времени восстановления и возвратного напряжения, коэффициентов диэлектрической абсорбции и разряда [12].

Исследования показали, что о старении изоляции можно судить по характеру поляризационных процессов, а именно по величине возвратного напряжения и напряжения саморазряда. Установлено, что возвратное напряжение снижается при износе изоляции, при увеличении пробега и повышается после пропитки и сушки обмотки. Определение этого параметра, основанного на явлении абсорбции, является надежным критерием оценки состояния изоляции, позволяющим продлить ресурс изоляции ТЭД до следующего ремонта.

Измерив напряжения саморазряда, можно рассчитать параметры изоляции тяговых электродвигателей, которые существенно различаются в зависимости от степени ее старения. В ходе эксперимента получены зависимости постоянной времени и величины заряда от пробега. Данные зависимости показали, что с ростом пробега значения постоянной времени для изоляции уменьшаются. Также происходит уменьшение заряда при увеличении пробега. Таким образом, в результате исследований установлено, что все составляющие напряжения саморазряда изоляции ТЭД изменяются в зависимости от срока их эксплуатации. Следовательно, по величине напряжения саморазряда также можно оценить качество изоляции ТЭД [13-15]. Предложенные в ходе эксперимента критерии являются надежными для оценки состояния изоляции, и поэтому целесообразно внедрять инновационные технологии и приборы, позволяющие производить такую оценку, на заводах по ремонту электровозов и в локомотивных депо сети железных дорог. Для контроля изоляции по характеристикам абсорбции в филиале РГО-ТУПС в Нижнем Новгороде созданы приборы, которые, помимо измерения сопротивления изоляции, также измеряют напряжение саморазряда, возвратное напряжение, постоянную времени изоляции и ее электрическую емкость. Все устройства защищены авторским правом [14].

С учетом потребностей рынка коллективом авторов [3] разработан и внедрен портативный прибор «Кедр» (рис. 1) для контроля изоляции ТЭД и комплексного восстановления и ремонта электрооборудования подвижного состава.

Устройство «Кедр» может использоваться для контроля большой номенклатуры электрических машин, так как позволяет измерять сопротивление изоляции и коэффициент поглощения при трех значениях испытательного напряжения. В отличие от обычного мегомметра «Кедр» имеет цифровую индикацию, автоматический выбор пределов измерения, не большую массу. Авторы запатентованного устройства награждены золотой медалью за разработку и внедрение новых технологий ремонта и обслуживания транспорта. Таким образом, применение новых методов оценки состояния изоляции позволяет перейти от системы ремонта по пробегу к системе ремонта по реальному техническому состоянию, что повысит надежность тяговых электродвигателей и снизит эксплуатационные расходы за счет экономии дефицитных обмоточных и изоляционных материалов [3].



**Рис. 1. Прибор для контроля изоляции «Кедр»**

**Fig. 1. Insulation control device «Kedr»**

На основании анализа существующих методов оценки состояния изоляции электрических машин предложена инновационная автоматизированная система комплексного диагностирования изоляции (АСКДИ) тяговых двигателей, позволяющая определить степень ее увлажненности с учетом конструктивных особенностей и условий эксплуатации ТЭД с целью прогнозирования наработки на отказ (рис. 2).

При оценке состояния изоляции предлагается применить комплекс методов для определения всех параметров, позволяющих диагностировать наличие коротких замыканий между витками и определить общее состояние межвитковой и корпусной изоляций при отсутствии явных повреждений. Сложность использования АСКДИ электродвигателей заключается в том, что жесткие пределы оценки качества изоляции на основе заданных параметров нельзя определить заранее, так как они во многом зависят от конструкции конкретного типа электродвигателя. Несмотря на сложность использования и высокую стоимость, комплексный подход к определению состояния изоляции ТЭМ, используемый в системе диагностики, позволяет

повысить объективность результатов испытаний, прогнозировать техническое состояние изоляции и научно планировать ремонтно-профилактические мероприятия. Предлагаемая система комплексного диагностирования изоляции имеет необходимый потенциал для применения в процессе технического обслуживания и диагностики подвижного состава [2, 5, 16].

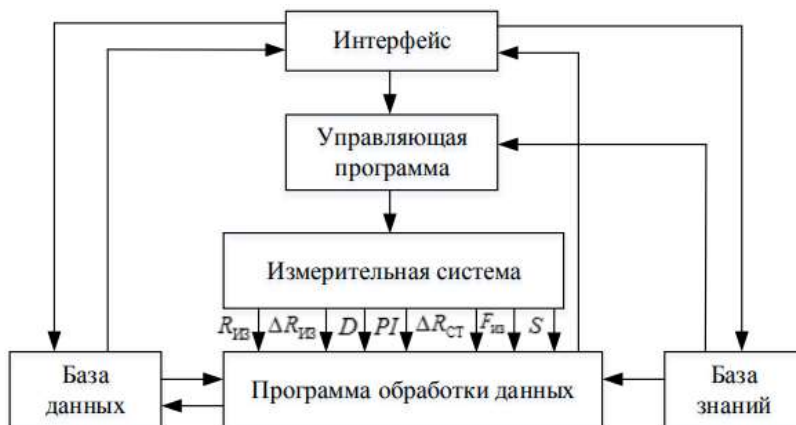


Рис. 2. Структурная схема АСКДИ

Fig. 2. Block diagram of the automated system for complex diagnostics of insulation

#### IV. Заключение

Минимизация всех производственных затрат за счет системного анализа процессов обеспечения безаварийной и надежной работы тяговых электрических машин с использованием для этой цели инновационных технологий является необходимым условием эффективной работы железнодорожного транспорта. Для перехода от системы плановых ремонтов к новой системе обеспечения исправности по текущему техническому состоянию необходимы современные технологии и приборы, созданные на основе комплекса высоконадежных и научно обоснованных средств обнаружения неисправностей и объективной оценки состояния изоляции ТЭД. Появившиеся в последние годы инновационные технологии являются хорошим примером в модернизации системы профилактического контроля состояния изоляции оборудования, но отсутствие нормативного и методического обеспечения, не позволяют использовать приборы диагностики с требуемой эффективностью. Анализ методов и средств диагностирования показывает



необходимость устранения недостатков методов оценки состояния изоляции тяговых электромашин за счет внедрения автоматизированной комплексной системы диагностирования изоляции электродвигателей, алгоритм работы которой сочетает в себе несколько взаимодополняющих методов с измерением нескольких параметров изоляции для определения наиболее вероятных видов и причин выявленных и прогнозируемых повреждений изоляции. Именно в комплексной системе заложены большие резервы повышения эффективности эксплуатации ТЭД. Основное отличие и новизна предложенного алгоритма диагностирования изоляции ТЭД заключается в том, что он позволяет учитывать взаимное влияние диагностических характеристик на состояние объекта и оценивать техническое состояние изоляции электродвигателя с единой методологической точки зрения. Актуальность использования АСКДИ подтверждается соответствием ее компонентов приоритетам в развитии науки и техники, основным положениям Энергетической стратегии России на период до 2035 года.

Несмотря на актуальность, перечисленные задачи решаются медленно, так как процессы деградации изоляции электрических машин довольно сложно поддаются математическому описанию и зависят от многочисленных факторов, в том числе, связаны с необходимостью проведения испытаний (в том числе и разрушающих) на дорогостоящем оборудовании. Внедрение системы комплексной диагностики технического состояния электрооборудования требует создания больших баз данных для анализа динамики состояния изоляции и реализации экспертного прогноза [17]. Решение этих задач определяется правильной организацией управления качеством производства, эксплуатации и ремонта электрических машин, применением комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции в системе технического обслуживания ТЭД с применением инновационных технологий.

© Рыжова Е.Л., 2022

*Поступила в редакцию 11.02.2022*

*Received 11.02.2022*

### **Библиографический список**

- [1] Бегиев А.И., Тихонов В.А. Диагностическое оборудование для проверки якорей и статоров электродвигателей // Ремонт & Сервис. 2009. № 1. С. 58-62.
- [2] Харламов В.В., Шкодун П.К., Шестаков И.В. Тестирование межвитковой изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя по методу волнового отклика // Известия Транссиба. 2015. № 2 (22). С. 39-45.

- [3] Головаш А.Н., Ридигер Е.В., Шушарин А.В. Алгоритмы и технические средства для контроля изоляции электрических машин и аппаратов подвижного состава // Омский научный вестник. 2005. №1 (30). С. 144-145.
- [4] Красновская С.Н., Ридель Э.Э., Черепашенец Р.Г. Текущий ремонт и техническое обслуживание электровозов постоянного тока. М.: Транспорт, 1989. – 408 с.
- [5] Харламов В.В., Шкодун П.К., Шестаков И.В. Оценка технического состояния изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава // Всерос. техн. конф. с междунар. участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов». Ноябрь 13, 2014, Омск, Россия. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2014. С. 211-222.
- [6] Бервинов В.И. Техническое диагностирование локомотивов. М.: УМК МПС России, 1998. – 190 с.
- [7] Методические указания по применению средств технической диагностики к реостатным испытаниям. М.: ЦВНТИТ МПС РФ, Транспорт, 2001. – 115 с.
- [8] Совершенствование системы ремонта тягового подвижного состава на базе внедрения аппаратно-программных комплексов и средств технической диагностики. Локомотивы и локомотивное хозяйство. Ремонт локомотивов. М.: ЦНТИЭИ МПС, 2000.
- [9] Кишшт Н.В., Герасимова Г.Н., Кац М.А. Диагностика электрических цепей. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
- [10] IEC TS 60034-27-2:2012. Rotating electrical machines – Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, 2012. – 55 p.
- [11] Renforth L., Foxall M., Giussani R., Raczy T. On-line partial discharge (OLPD) insulation condition monitoring solutions for rotating high voltage (HV) machines // proc. 3rd Petroleum & Chemical Industry Committee (PCIC) Middle East, Feb. 9-10, 2015, Abu Dhabi, UAE.
- [12] Крюков О.В., Милов В.Р., Шалашов И.В. Процедуры прогнозирования и принятия решений системе технического обслуживания и ремонта // Автоматизация в промышленности. 2010. № 8. С. 47-49.
- [13] Серебряков А.С. Методы и средства для диагностики изоляции электрических машин и аппаратов ее защиты: автореф. дис. докт. техн. наук, МИИТ, 2000.
- [14] Серебряков А.В., Крюков О.В., Титов В.Г. Прогнозирование технического состояния ветроэнергетических установок // Электротехника. 2017. № 1. С. 60-65.
- [15] Серебряков А.С. Оценка состояния корпусной изоляции тяговых двигателей по возвратному напряжению // Железнодорожный транспорт. 1999. № 2. С. 35-38.
- [16] Харламов В.В., Шкодун П.К., Шестаков И.В. Автоматизированная система комплексной диагностики состояния изоляции тяговых электродвигателей // Известия Транссиба. 2015. № 4 (24). С. 62-58.
- [17] Худоногов А.М., Лыткина Е. М., Дульский Е. Ю. Инновационная технология повышения надежности и продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 4 (36). С. 102-108.

## References

- [1] A.I. Begiev and V.A. Tikhonov, “Diagnosticheeskoe oborudovanie dlya proverki yakorej i statorov elektrodvigatelej [Diagnostic equipment for checking anchors and electric motors]”, *Remont & Servis [Repair & Service]*, no. 1, pp. 58–62, Jan. 2009 (in Russian).
- [2] V.V. Harlamov, P.K. Shkodun and I.V. Shestakov, “Traction engines turn-to-turn armature coil insulation testing process using the method of wave response readout”, *Izvestia Transsiba (Journal of Transsib Railway Studies)*, no. 2 (22), pp. 39-45, 2015 (in Russian).
- [3] A.N. Golovash, E.V. Ridiger and A.V. Shusharin, “The algorithm and technical means for checking of insulation in the electrical machines and apparatus of the rolling stock”, *The Journal Omsk Scientific Bulletin*, no. 1 (30), pp. 144-145, 2005.
- [4] S.N. Krasnovskaya, E.E. Riedel, R.G. Cherepashenets, *Tekushchij remont i tekhnicheskoe obsluzhivanie elektrovozov postoyannogo toka [Current repair and maintenance of DC electric locomotives]*. Moscow: Transport, 1989 (in Russian).
- [5] V.V. Kharlamov, P.K. Shkodun and I.V. Shestakov, “Evaluation of the technical condition of the insulation of traction motors of rolling stock”, in proc. *All-Russian. tech. conf. with intern. part. “Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov [Operational reliability of the locomotive fleet and increasing the efficiency of train traction]”*, Nov. 13, 2014, Omsk, Russia, pp. 211-222 (in Russian).
- [6] V.I. Bervinov. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie lokomotivov [Technical diagnostics of locomotives]*. Moscow: TMC Ministry of Railways of the Russian Federation, 1998 (in Russian).
- [7] *Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu sredstv tekhnicheskoy diagnostiki k reostatnym ispytaniyam [Methodological guidelines for the use of technical diagnostic tools for rheostatic tests]*. Moscow: CINET Ministry of Railways of the Russian Federation, Transport, 2001 (in Russian).
- [8] *Sovershenstvovanie sistemy remonta tyagovogo podvizhnogo sostava na baze vnedreniya apparatno-programmnyh kompleksov i sredstv tekhnicheskoy diagnostiki. Lokomotivy i lokomotivnoe hozyajstvo. Remont lokomotivov [Improvement of the traction rolling stock repair system based on the introduction of hardware and software complexes and technical diagnostics tools. Locomotives and locomotive facilities. Repair of locomotives]*. Moscow: CSTEI Ministry of Railways of the Russian Federation, 2000 (in Russian).
- [9] N.V. Kinsht, G.N. Gerasimova, M.A. Katz, *Diagnostika elektricheskikh cepej [Diagnostics of electrical circuits]*. Moscow: Energoatomizdat, 1983 (in Russian).
- [10] Rotating electrical machines – Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines, IEC TS 60034-27-2:2012, 2012.
- [11] L. Renforth, M. Foxall, R. Giussani and T. Raczy, “On-line partial discharge (OLPD) insulation condition monitoring solutions for rotating high voltage (HV) machines”, in proc. *3rd Petroleum & Chemical Industry Committee (PCIC) Middle East*, Feb. 9-10, 2015, Abu Dhabi, UAE.

- [12] V.R. Milov, I.V. Shalashov and O.V. Kryukov, “Procedury prognozirovaniya i prinyatiya reshenij sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta [Procedures for forecasting and decision-making system maintenance and repair]”, *Automation in Industry*, no. 8, pp. 47-49, 2010 (in Russian).
- [13] A.S. Serebryakov, “*Metody i sredstva dlya diagnostiki izolyacii elektricheskikh mashin i apparatov ee zashchity [Methods and means for diagnostics of isolation of electrical machines and devices of its protection]*”, D. Sci. (Eng.) thesis, MIIT, 2000 (in Russian).
- [14] A.V. Serebryakov, O.V. Kryukov and V.G. Titov, “Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya vetroenergeticheskikh ustanovok [Forecasting the technical condition of wind turbines]”, *Electrotechnics*, no. 1, pp. 60-65, 2017 (in Russian).
- [15] A.S. Serebryakov, “Ocenka sostoyaniya korpusnoj izolyacii tyagovykh dvigatelej po vozvratnomu napryazheniyu [Assessment of the condition of the hull insulation of traction motors by return voltage]”, *The Zheleznodorozhny Transport (Railway Transport)*, no. 2, pp. 35-38, 1999 (in Russian).
- [16] V.V. Harlamov, P.K. Shkodun and I.V. Shestakov, “Automated full-service system for traction machines insulation diagnostics”, *Izvestia Transsiba (Journal of Transsib Railway Studies)*, no. 4 (24), pp. 62-58, 2015 (in Russian).
- [17] A.M. Hudonogov, E.M. Lytkina and E.Yu. Dul'skiy, “Innovative technology of improving reliability and electric machines traction vehicles life extension”, *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, no. 4 (36), pp. 102-108, 2012.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Рыжова Елена Львовна**, кандидат технических наук, доцент Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Elena L. Ryzhova**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, Russian Federation