

Рыжова Е. Л., Ким К. К., Иванов С. Н.
E. L. Ryzhova, K. K. Kim, S. N. Ivanov

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ

EVALUATION OF TRACTION MOTOR RELIABILITY BASED ON THE STATE OF WINDING ELECTRICAL INSULATION

Рыжова Елена Львовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский проспект, д. 9; тел. 8(812)457-81-42. E-mail: toe@pgups.ru.

Elena L. Ryzhova – PhD in Engineering, Associate Professor, Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: toe@pgups.ru.

Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский проспект, д. 9; тел. 8(812)457-81-42. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Konstantin K. Kim – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: snivanov57@mail.ru.

Sergey N. Ivanov – Dr. Sc., Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: snivanov57@mail.ru.

Аннотация. Эксплуатация тяговых электрических двигателей показывает, что основной процент дефектов обусловлен износом изоляции обмоток, от характера которого в основном зависят показатели надёжности и долговечности всего двигателя. Усовершенствование изоляционных систем и технологий их изготовления позволяет существенно улучшить эксплуатационные параметры изоляции обмоток двигателей. Для тяговых двигателей на ряд ближайших лет можно прогнозировать применение на основе термостойких (слюда-ных) пропиточных составов терморезистивной изоляции, слюдяной бумаги с высокой пористостью при одновременном улучшении качества технологических процессов изготовления изоляции. Создание усовершенствованных изоляционных систем тяговых двигателей с использованием эпоксидного компаунда без отвердителя перспективно при включении отвердителя в пропитываемую систему. Применение эпоксидно-полиарилатных компаундов вызывает определённый интерес в случае неодинакового содержания компонентов в виде волокнистых связующих плёнок, исключая полиарилатную связующую компоненту.

Summary. The operation of traction electric motors shows that the main percentage of defects is caused by the wear of the winding insulation, the nature of which mainly determines the reliability and durability of the entire engine. The improvement of insulation systems and their manufacturing technologies makes it possible to significantly improve operational parameters of motor winding insulation. For traction engines in the coming years, it is possible to predict the use of thermosetting insulation based on heat-resistant (mica) impregnating compounds, mica highly porous paper, while improving the quality of technological processes for the manufacture of insulation. The creation of advanced insulation systems of traction motors using an epoxy compound without a hardener is promising when the hardener is included in the impregnated system. The use of epoxy-polyarylate compounds is of particular interest in the case of unequal content of components in the form of fibrous binder films, excluding the polyarylate binder component.

Ключевые слова: надёжность электрических машин, тяговый двигатель, электрооборудование, отказы, изоляция обмоток, электрическая прочность, термостойкость, электроизоляционные материалы.

Key words: reliability of electric machines, traction motor, electrical equipment, failures, winding insulation, electrical strength, heat resistance, electrical insulation materials.

УДК 679.743.1

Введение. Пригодность для эксплуатации и надёжность электрических машин – главные условия для их широкого применения в различных системах электротехнических комплексов. Определить надёжность локомотивов и оценить ресурс и/или техническое состояние работы подвижного состава возможно путём количественного анализа отказов отдельных элементов структурной схемы рассматриваемого объекта, который показывает, что определяющим и наиболее часто повреждаемым элементом являются именно тяговые электродвигатели, являющиеся максимально нагруженной частью силовой установки электровоза. За последние несколько десятилетий резко обострилась важнейшая научно-техническая проблема повышения надёжности тяговых двигателей (ТД), хотя она всегда являлась объектом особого внимания как проектировщиков оборудования, так и эксплуатационного персонала, что объективно связано со следующими причинами:

- увеличение сложности отдельных узлов и элементов ТД;
- интенсивность режимов работы и экстремальность условий работы ТД (высокие скорости, температуры, частоты вращения, плотности тока и давления, вибрация, перепад температур и т. д.);
- повышение требований к качеству работы и выполняемым ТД функциям (высокая точность, эффективность, экономическая и техническая цена отказа и т. д.);
- исключение контроля человеком функционирования ТД и его элементов из-за полной или частичной их автоматизации [1–6].

Надёжность тяговых двигателей напрямую связана с их отказами, которые подразделяются по следующим признакам:

- конструкционные, т. е. отказы из-за несовершенства, а в ряде случаев отклонения или нарушения нормативно-технических требований, регламентирующих процессы проектирования и конструирования двигателя (10...15 %);
- технологические, т. е. отказы вследствие нарушения календарного графика и непосредственно качества производства или ремонта (20...35 %);
- эксплуатационные, т. е. отказы в условиях непосредственной эксплуатации двигателей, например из-за отказа или отсутствия тепловой защиты, нарушений условий эксплуатации, стохастического увеличения нагрузки, которую практически невозможно спрогнозировать, естественного износа узлов и старения материалов (50...70 %).

Как можно заметить, основная часть всех отказов ТД возникает из-за технологических причин (недостаточного качества ремонта) и вследствие сложных условий эксплуатации. При исследовании надёжности технических систем или отдельных изделий, а также изучении статистики причин отказов электрических машин пользуются методом «слабых звеньев», анализируя физические процессы, обеспечивающие требуемое функциональное назначение и возникающие непосредственно в тех частях, которые в данных условиях характеризуются минимальной надёжностью, а затем на этой основе определяется результирующая надёжность всей технической системы. При исследовании и нахождении минимально надёжного элемента в тяговых двигателях обмотка статора выделяется как «слабое звено». Действительно, отказы ТД, по данным экспериментальных и статистических исследований, происходят в основном из-за повреждения обмоток в виде межвитковых замыканий (93 %), гораздо реже – вследствие пробоя межфазной изоляции (5 %) и пазовой изоляции (2 %) [1].

Современное состояние проблемы. Выходы из строя изоляции ТД определяются сложными эксплуатационными условиями, включающими не только климатические факторы, но и та-

кие специфические параметры, как профиль пути, скорость изменения и величины коммутационных перенапряжений, особенности трафика и интенсивность движения, грузонапряжённость и т. д. На нагрев, особенно вращающихся обмоток, и, как следствие, термическое разрушение их изоляции влияет не только превышение расчётных температур обмоток, но и резкое скачкообразное изменение нагрузок двигателей, частоты их вращения, механических возмущений (давление, вибрации, ударные воздействия и т. д.), процентное содержание влаги, наличие агрессивных веществ и ряд других факторов [6; 7; 8]. Различия отказов связаны не только с климатическими зонами эксплуатации, но и с сезонностью. Данные подтверждают, что наиболее неблагоприятным для тяговых двигателей является переходный осенне-зимний период, когда имеющие место перепады температур, наличие конденсата, попадание внутрь двигателя воды или снега приводят к увлажнению изоляции и, соответственно, способствуют резкому снижению электрического сопротивления [9; 10]. Во время среднесуточных колебаний температуры воздуха и при её резком повышении изоляция ТД в значительной степени теряет механическую прочность, становится жёсткой и хрупкой, что приводит к образованию механических дефектов: расслоений, трещин и пористости [11].

Таким образом, доленое количество дефектов при эксплуатации, проявляющихся в системе изоляции обмоток, составляет около 50...60 % от общего числа повреждений. Сложность прогнозного оценивания этой величины зависит не только от уровня основных эксплуатационных нагрузок, воздействующих на изоляцию обмоток (уровень вибрации, температура обмотки, коммутационные перенапряжения, влажность окружающей среды), но и от вариативного сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров [12].

Программы обеспечения и повышения надёжности включают целый ряд принципиально важных требований к изоляции обмоток статоров, от выполнения которых кардинально зависит технический уровень ТД в виде таких показателей надёжности при эксплуатации, транспортировании и хранении, как безотказность, долговечность, сохраняемость и ремонтпригодность, а также обеспечивается их конкурентоспособность на рынке.

На основе анализа отраслевых стандартов ведущих энергомашиностроительных предприятий промышленных отраслей России, ряда действующих стандартов международной электротехнической комиссии, а также рекомендаций американского Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) применительно к электрической изоляции разработаны актуализированные требования для электрических машин среднего и высокого напряжения.

Основные требования, предъявляемые к изоляции обмотки, включают обеспечение:

- высокой длительной и кратковременной электрической прочности;
- малых токов утечки по изоляции и, соответственно, минимальных потерь от их протекания;
- структурной однородности и монолитности, исключающих воздушные включения с целью снижения вероятности возникновения электрических разрядов;
- применительно к изоляции обмоточного провода высокой адгезии, что исключает граничные разряды в местах прилегания медных проводников и корпусной изоляции;
- высоких термостойкости и теплопроводности, чтобы снизить тепловое сопротивление и обеспечить минимальный тепловой барьер между сердечником статора и активной медью.

Пробивное напряжение характеризует состояние наиболее «слабого звена» (или наименее надёжного) изоляции ТД и является основным критерием его работоспособности. Необходимость использования критериев безотказности, которые можно определять без разрушения электрической изоляции (ёмкость изоляции, активное сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь и др.), весьма актуальна, поскольку на практике определение величины пробивного напряжения связано с необратимым разрушением изоляции.

Количество внешних и внутренних факторов, определяющих физическое состояние и, как следствие, качество изоляции обмоток, срок службы и ресурс, в большой степени зависит от конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов и их взаимного влияния. Например, для верификации параметров долговечности необходим обоснованный выбор технологии из-

готовления изоляционных материалов, определение конструктивных и технологических параметров изготовления обмоток, учёт изменений, которые происходят в изоляционных материалах при эксплуатации с учётом таких внешних факторов, как:

- нагрузки, связанные с аккумуляцией тепловых потерь: количество теплоты, выделяющееся в обмотке, градиенты температур, тепловые удары и тепловые перегрузки;
- нагрузки, связанные с электромагнитным преобразованием энергии: номинальное напряжение, коммутационные перенапряжения, количественные характеристики электромагнитного поля;
- нагрузки механического и термомеханического характера (термомеханические напряжения, вибрационные скорости и ускорения, тепловые удары, электродинамические усилия), обусловленные отличающимися коэффициентами теплового расширения активных проводниковых материалов и элементов системы изоляции, конструктивными особенностями обмоток, напряжения, возникающие в местах изгиба при формировании лобовых частей обмоток в процессе изготовления и при эксплуатационных воздействиях вибраций в рабочих режимах;
- нагрузки, обусловленные категоричностью климатического назначения оборудования: температура, влажность, давление, химический состав рабочей и внешней среды, пыль, солнечная радиация и т. п. [12–14].

При этом основным фактором, определяющим срок службы изоляции ТД, является термоактивное старение изоляции под действием температуры. В процессе эксплуатации в тяжёлых условиях внешних воздействий обмотки одновременно подвергаются воздействию электрических и тепловых полей из-за их нагрева токами нагрузки, вихревыми токами и гистерезисом. Изоляция статорных обмоток ТД постепенно разрушается, и её эксплуатация завершается пробоем. На эксплуатируемом в настоящее время транспорте температура нагрева отдельных элементов тяговых двигателей составляет 120 °С, при этом напряжения достигают значений 5...6 кВ. Очевидно, что увеличение нагрузки ведёт к росту рабочих температур электрической машины, и это требует обоснованного выбора диэлектриков в системе изоляции.

Надёжность тяговых двигателей, качество их изоляции, её электрическая прочность зависят не только от совершенства изоляционных конструкций, но и от характеристик материалов, применяемых для электроизоляционных элементов. Возможность экономии за счёт снижения расхода цветных и чёрных металлов, в первую очередь таких как обмоточная медь и электротехническая сталь на единицу мощности ТД, позволяет качественно повысить электрические, механические и тепловые характеристики электрической машины, но при этом возникает необходимость изменения физико-механических свойств изоляции.

Для примера: при неизменных габаритах к повышению мощности ТД на 4...10 % приводит уменьшение толщины изоляции на 15...20 %, в свою очередь, это обеспечивает, как отмечено выше, снижение расхода цветных и чёрных металлов до 3...8 %. При снижении удельной материалоемкости ТД примерно на 10...12 % увеличивается его мощность на 13...15 %, другой ограничивающий фактор – допустимая температура обмотки – возрастает на 20 °С.

Ещё одним немаловажным параметром технологического характера, косвенно зависящим от физико-химических свойств применяемых электроизоляционных материалов, является степень механизации, автоматизации и длительности выполнения обмоточно-изолирующих работ. Это приводит к пересмотру и повышению требований к уже применяемым системам изоляции, а также выявляет новые недостатки и критерии совершенствования в применяемых материалах электроизоляционных элементов. Значительный прогресс в энергетическом электромашиностроении в последнее время позволил существенно улучшить эксплуатационные параметры изоляции статорной обмотки электрических машин, в основном за счёт усовершенствования изоляционных систем и технологий их изготовления.

Вновь создаваемые изоляционные материалы и системы изоляции позволяют снизить толщину изоляции, повысить коэффициент заполнения паза и удельную мощность ТД и, соответственно, улучшить её теплопроводность, кроме того, появилась возможность повышения напряжённости электрического поля, достигающей средних значений 2,8...3,0 кВ/мм.

Для систем изоляции обмоток электрических машин основная часть материалов на предприятиях Российской Федерации, выпускающих электромашиностроительные изделия, в настоящее время изготавливается с использованием изоляционных лент производства ОАО «Холдинговая компания Элинар». Эта компания более 50 лет выпускает для всех реализуемых технологических способов изготовления высоковольтной изоляции предварительно пропитанные и непропитанные ленты. Длительный опыт этого производителя, дающий результаты оценивания надёжности изоляции при эксплуатации, показывает, что в отличие от существующих мнений в большинстве случаев тепловое старение и вибрационные воздействия не являются главными факторами износа. На первое место в качестве определяющих факторов старения, действующих на изоляцию в процессе специальных испытаний, целесообразно поставить термомеханические напряжения и количественные параметры электрического поля. Форсирование термомеханического старения изоляции при контрольных испытаниях достигается путём существенного изменения по сравнению с рабочим режимом циклов нагрева и охлаждения испытываемой обмотки. В течение ряда последних лет специалистами «Холдинговой компании Элинар» был выполнен целый комплекс работ по оценке устойчивости изоляции к воздействию теплового старения при наличии электрического поля, а также мультифизических факторов, которые возникают при расчётной нагрузке и при внезапных отключениях от номинальной нагрузки.

Со стороны большинства заказчиков актуальной задачей оценки надёжности электрической машины является её определение при испытаниях на реальных стержнях на стадии изготовления. Задача заключается в проведении форсированных контрольных испытаний, нахождении степени износа изоляции и оценке долговечности как при раздельном, так и при совместном воздействии электротеплового старения и термоциклов (нагрева и охлаждения обмотки). Учёными компании проводились исследования на стержнях, изготовленных по технологии термопрессования Resin Rich (RR). В ходе испытаний изоляция, изготовленная с применением слюдосодержащих лент Элмикатерм с различным химическим составом связующего вещества, подвергалась практически всем основным видам эксплуатационных нагрузок. Результаты исследований показали, что использование лент слюдяной бумаги с повышенной плотностью увеличивает не только высокую длительную электрическую прочность изоляции, но и позволяет обеспечивать электрическую напряжённость поля на обмотке до 3...3,2 МВ/м. Устойчивость изоляции в течение 400 ч к одновременному воздействию температуры (около 130 °С) и высокой напряжённости поля (10 МВ/м) при рабочих температурах (ниже 10 % при 155 °С) обеспечивает применение лент с меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь. Повышение устойчивости изоляции при воздействии тепловых циклов требует применения лент с более высоким классом нагревостойкости.

Перспективы. На ближайшие годы в принципе можно спрогнозировать повышение качества технологических процессов изготовления изоляции на основе терморезистивных компаундов тяговых двигателей с применением как термостойких пропиточных слюдосодержащих составов, так и слюдяной бумаги высокой пористости. Усовершенствованная терморезистивная изоляция на основе слюдосодержащих лент Элмикатерм не уступает аналогам лучших мировых производителей, что доказывают её высокие механические и электрофизические свойства и широкое применение при выпуске и ремонте ТД не только на отечественных, но и на зарубежных электромашиностроительных предприятиях.

В настоящее время терморезистивные компаунды находят широкое применение в электромашиностроении. В качестве основы при заливке и пропитке точных изделий, а также электронных схем и блоков используются эпоксидные смолы. Высокие, а зачастую и незаменимые электрофизические, механические и технологические свойства, в частности низкая вязкость эпоксидных компаундов, позволяют их использовать не только непосредственно для пропитки обмоток с повышенным коэффициентом заполнения паза активной медью, но и для пропитки элементов систем изоляции обмоток, содержащих стеклоткани, слюдянистые бумаги, полимерные плёнки и другие материалы. Для исключения воздушных включений и получения монолитной изоляции применяются специальные технологические процессы пропитки с использованием повышенного давления, вакуума, прессования, повышенной температуры и других технологий. В состав

пропиточных компаундов, помимо эпоксидной смолы, входит отвердитель, например полиэтил-полиамин, а также наполнитель и пластификатор, что хотя и позволяет обеспечить повышение вязкости компаундов, но после окончания процесса полимеризации делает невозможным их дальнейшее использование.

Применение эпоксидной смолы без отвердителя возможно, если имеется наличие отвердителя в пропитываемой системе, что представляет новое направление в развитии и создании новых систем изоляции для тяговых двигателей. Продукты с наибольшей плотностью сшивки образуются в процессе отверждения эпоксидных смол полиарилатами на основе изо- и терефталевых кислот и их ангидридов. Введение дистиллированной воды в эпоксидно-полиарилатный компаунд позволяет расплавить порошок полиарилата при 140...160 °С и получить продукт с низкой вязкостью, который может отверждаться на стадии формования изделий.

Для нахождения допустимой температуры эксплуатации электроизоляционных материалов – оценки важной характеристики эпоксидно-полиарилатных композиций различного состава изоляции – определялись термогравиметрические индексы. Термогравиметрический индекс компаунда, содержащего 40...60 % полиарилата, находится в достаточно узком диапазоне, составляющем 161...165 °С. Улучшение физико-механических, электрических и химических свойств на основе эпоксидно-полиарилатных компаундов подтвердило их пригодность для длительной эксплуатации при температуре выше 155 °С испытаниями ряда материалов электроизоляционного назначения. При создании многослойных композиционных ламинатов электроизоляционного назначения находят применение плёнки из полиарилатов, которые обеспечивают лёгкое склеивание без отвердителя любой эпоксидной смолой. Такая технология позволяет одновременно повысить качество изоляционных материалов, унифицировать процесс изготовления, для механизированных процессов изолирования оптимально выбрать сочетания прочности при растяжении и расслоении, когда материал подвергается разнонаправленным механическим нагрузкам к плоскости материала по осям, например, горизонтальной и вертикальной. Такая эпоксидно-полиарилатная композиция без отвердителя по ряду свойств и способности к переработке превосходит полиарилаты, полученные с применением отвердителей, и её использование перспективно для изготовления изоляции ТД.

Полученные результаты для эпоксидно-полиарилатных компаундов с различным содержанием компонентов характерны и для других материалов в виде волокнистых связующих плёнок на основе полиарилатного пропиточного компонента. К материалам этого класса может быть отнесена модифицированная синтетическая бумага, содержащая внедрённые в эпоксидную смолу без отвердителя волокнистые компоненты из полиарилатов. Пропитка бумаги при оптимальном соотношении эпоксидного олигомера и полиарилата значительно повышает её электрические и физико-механические характеристики вследствие того, что волокнистые компоненты бумаги смачиваются вводимым из раствора в ацетоне низковязким эпоксидным олигомером. Возрастающая при нагреве вязкость олигомера, взаимодействующего с полиарилатом, обеспечивает заданные свойства эпоксидно-полиарилатного связующего, которое обладает низкой поверхностной активностью в неотверждённом состоянии и позволяет формировать из бумаги различные элементы, которые после отверждения обеспечивают сохранение формы с необходимыми высокими механической и электрической прочностью. Использование полиарилатов в качестве компонентов электроизоляционных систем можно считать перспективным для изоляции тяговых электрических двигателей.

Заключение. Анализ результатов эксплуатации ТД показывает, что основной процент возникающих дефектов составляет износ изоляции обмоток, от характера которого в основном зависят показатели надёжности и долговечности всего двигателя.

В последнее время усовершенствование изоляционных систем и технологий их изготовления позволило существенно улучшить эксплуатационные параметры изоляции обмоток ТД.

Показатели технологичности (степень механизации, автоматизации и длительность обмоточно-изолирующих работ) существенно зависят от качества используемых электроизоляционных материалов.

На ближайшее время можно прогнозировать ускоренное развитие и создание систем изоляции ТД на основе терморезистивных компаундов с применением термостойких пропиточных составов, слюдяных компонентов, слюдяной бумаги высокой пористости, а также повышение качества технологических процессов изготовления изоляции.

Перспективно создание модифицированных систем изоляции для тяговых двигателей с использованием эпоксидной смолы без отвердителя при условии наличия отвердителя в пропитываемой системе.

Определённый интерес вызывает применение эпоксидно-полиарилатных композиций с параметризуемым содержанием компонентов, в которых полиарилатная связующая компонента присутствует в виде волокнистых связующих плёнок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котеленец, Н. Ф. Испытания и надёжность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.
2. Анализ надёжности изоляции обмоток электрических машин тягового подвижного состава с учётом особенностей климатических условий внешней среды / А. М. Худоногов, Д. А. Оленевич, В. В. Сидоров, Е. М. Лыткина // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 232-236.
3. Юренков, М. Г. Анализ влияния условий эксплуатации на надёжность тяговых электродвигателей / М. Г. Юренков // Исследование работы электрооборудования и вопросы прочности электроподвижного состава. – Омск: ОмИИТ, 1974. – С. 57-60.
4. Галкин, В. Г. Надёжность тягового подвижного состава / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – М.: Транспорт, 1981. – 184 с.
5. Захаров, В. И. Повышение эксплуатационной надёжности тяговых электрических машин магистральных электропоездов / В. И. Захаров // Повышение ресурса тяговых электродвигателей: сборник докладов и сообщений научно-технической конференции / Под ред. А. Т. Осяева. – М., 2004. – С. 32-36.
6. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: учеб. пособие / А. С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.
7. Исмаилов, Ш. К. Электрическая прочность изоляции электрических машин локомотивов: моногр. / Ш. К. Исмаилов. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 272 с.
8. Пак, В. М. Современное состояние и перспективы развития систем изоляции крупных электрических машин / В. М. Пак, А. В. Папков, И. Е. Куимов // Электротехника. – 2011. – № 4. – С. 2-7.
9. Эксплуатация электропоездов в условиях низких температур / А. М. Худоногов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 201-204.
10. Козубенко, В. Г. Безопасное управление поездом: вопросы и ответы: учебное пособие для образовательных учреждений железнодорожного транспорта, осуществляющих профессиональную подготовку / В. Г. Козубенко. – М.: Маршрут, 2005. – 320 с.
11. Смирнов, В. П. Непрерывный контроль температуры предельно нагруженного оборудования электропоезда: моногр. / В. П. Смирнов. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2003. – 328 с.
12. Иванов, С. Н. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы: моногр. / С. Н. Иванов, К. К. Ким, В. М. Кузьмин. – СПб.: ООО «Издательство ОМ-Пресс», 2009. – 348 с.
13. Колесник, М. Б. Анализ напряжённо-деформированного состояния асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках / М. Б. Колесник, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII (55). – С. 43-47.
14. Колесник, М. Б. Имитационное и экспериментальное моделирование электромеханического привода герметичной задвижки / М. Б. Колесник, А. С. Гудим // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № VII (63). – С. 52-58.