



Новые подходы к оценке состояния изоляционного материала тяговых электродвигателей электровозов



Терегулов Олег Александрович – ОАО «РЖД», Москва, Россия.*

Олег ТЕРЕГУЛОВ

Повышение эффективности функционирования железнодорожного транспорта в сфере грузовых и пассажирских перевозок, снижение эксплуатационных расходов в настоящее время непосредственно связаны с расходами на содержание и восстановление тягового подвижного состава. Оптимизация эксплуатационных расходов возможна на основе перехода от планово-предупредительной системы ремонта тягового подвижного состава, основанной на оценке среднестатистического уровня его технического состояния без учёта особенностей полигона эксплуатации, к системе ремонта и обслуживания по фактическому техническому состоянию, объективно определяемому на основе создания и внедрения бортовых, переносных и стационарных средств технического диагностирования узлов и агрегатов, формирования банка данных о текущем состоянии электровозов и их узлов.

Энергосиловые установки относятся к базовым элементам и узлам конструкций тягового подвижного состава. Надёжность и ресурс тяговых электродвигателей электровозов, особенно изоляции обмоток, не отвечает современным требованиям, а существующие системы диагностики состояния изоляции обмоток не позволяют обеспечить необходимый уровень выявления отказов на ранней стадии. Для качественного определения категории износа изоляционного материала разработаны новые подходы на основе метода ИК-спектrophотометрии по относительному коэффициенту пропускания электромагнитного излучения в газовой атмосфере, отводимой от обмотки тягового электродвигателя, что является основой для создания и внедрения бортовой системы автоматизированного мониторинга текущего состояния изоляции электродвигателя и оценки остаточного ресурса.

Ключевые слова: железная дорога, электровоз, тяговые электродвигатели, оценка текущего состояния, изоляционный материал, повышение надёжности.

*Информация об авторе:

Терегулов Олег Александрович – Первый заместитель начальника Департамента технической политики ОАО «РЖД», Москва, Россия, teregulovoa@center.rzd.ru

Статья поступила в редакцию 05.02.2020, принята к публикации 28.04.2020.

For the English text of the article please see p. 109.

Железнодорожный транспорт играет важнейшую роль в стабильном, поступательном развитии промышленного комплекса, является основой для реализации программ долгосрочного развития экономического потенциала. Сегодня одной из наиболее актуальных задач является создание условий для повышения эффективности функционирования железнодорожного транспорта в сфере грузовых и пассажирских перевозок, снижения эксплуатационных расходов, повышения производительности труда.

Вопросам повышения эффективности функционирования железнодорожного транспорта, оптимизации направлений применения различных видов тяги с учётом перспектив развития грузоперевозок уделяется особое внимание в работе [1]. Авторы в контексте основной темы исследования подчёркивают непосредственную связь между эффективностью функционирования железнодорожного транспорта, его поступательным развитием и адаптивностью подвижного состава с учётом конкретных условий эксплуатации.

Решающим фактором повышения эффективности работы железнодорожного транспорта в современных условиях является совершенствование технологических процессов эксплуатации и ремонта тягового подвижного состава, решение проблем повышения надёжности, снижения эксплуатационных расходов.

Данные подходы используются не только на российских железных дорогах, но и являются предметом обсуждения и внедрения на железных дорогах Европы и мира. Так, в работе [2] авторы рассматривают пути увеличения эффективности силовых агрегатов на примерах локомотивов 2М62 и ТЕР-70, повышения их надёжности, снижения эксплуатационных затрат на основе внедрения системы контроля параметров функционирования тягового двигателя.

Одним из приоритетных направлений совершенствования отечественной системы содержания, технического обслуживания и ремонта электровозов в настоящее время является ремонт и обслуживание по техническому состоянию, для этого необходимо обосновать ресурс базовых элементов и узлов. Наиболее перспективными мероприятиями по реализации программы повышения

эффективности эксплуатации тягового подвижного состава являются: создание и внедрение систем диагностики на основе применения бортовых, переносных и стационарных средств технического диагностирования узлов и агрегатов; формирование банка данных о текущем состоянии электровозов и их узлов с целью обеспечения перехода на систему технического обслуживания и ремонта локомотивов с учётом фактического состояния.

Результаты экономического анализа функционирования парка тягового подвижного состава свидетельствуют о значительной зависимости себестоимости всех видов перевозок от затрат на техническое содержание и ремонт тягового подвижного состава. Структурный анализ расходов железнодорожного транспорта показывает, что удельный вес эксплуатационных затрат достигает 18–20 % от общей себестоимости перевозок [3]. В настоящее время при существующей системе технического содержания и ремонта тягового подвижного состава, затраты на восстановление за период от начала эксплуатации до постановки локомотива на капитальный ремонт в 3,5–4,0 раза превышают его первоначальную стоимость [4]. На сети дорог ежедневно на всех плановых видах ремонта и обслуживания (без учёта ТО-2) находится около 1700 локомотивов, в том числе около 100 локомотивов находятся на заводских видах ремонта. Таким образом, ежедневно на техническое обслуживание и ремонты отвлекается до 13,5 % эксплуатируемого парка ОАО «РЖД».

В настоящее время планово-предупредительная система ремонта тягового подвижного состава ОАО «РЖД» основана на оценке среднестатистического уровня его технического состояния. Зачастую оценка текущего технического состояния элементов конструкции и определение необходимого вида и объёма ремонтных работ зависят от квалификации персонала, технического оснащения и наличия диагностического оборудования. Как следствие, дефекты выявляются по внешним признакам (повышенный люфт, шум, вибрация, нагрев, износ и т.п.).

К базовым элементам и узлам конструкции тягового подвижного состава можно отнести: энергосиловые установки, ходовые части и др. Статистический анализ оценки



текущего состояния свидетельствует о том, что надёжность и ресурс тяговых электродвигателей (ТЭД) электровозов, особенно изоляции обмоток, не отвечает современным требованиям. Существующие системы диагностики состояния изоляции обмоток ТЭД не позволяют обеспечить необходимый уровень выявления отказов на ранней стадии.

Как показала практика, система поддержания надёжности изоляции по пробегу не является оптимальной. Условия эксплуатации тяговых электродвигателей не являются одинаковыми для разных регионов страны, следовательно, неодинаково происходит и старение изоляции, и не всякий двигатель с пробегом 1600 тыс. км обязательно нуждается в замене обмотки. Иногда оказывается достаточным более дешёвый средний ремонт ТЭД, то есть чистка, пропитка и сушка изоляции обмотки. Таким образом, объективная оценка реального состояния изоляции обеспечит продление её срока службы без снижения надёжности работы с меньшими затратами.

Целью исследования является анализ применения метода ИК-спектрофотометрии по относительному коэффициенту пропускания электромагнитного излучения в газовой атмосфере, отводимой от обмотки тягового электродвигателя, в качестве основы для создания и внедрения бортовой системы автоматизированного мониторинга текущего состояния изоляции электродвигателя и оценки остаточного ресурса. Использовались *методы* структурного экономического анализа, статистического анализа, экспериментальные методы спектрофотометрии.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В эксплуатации изоляция электрооборудования тягового подвижного состава подвергается широкому спектру воздействий. К ним относятся: температура обмоток, амплитуда и частота вибрации, электрические перенапряжения, электродинамические воздействия от электрического тока, влажность воздуха, наличие в окружающей среде едких паров и пыли. Они инициируют в изоляции сложные процессы, следствием которых является постепенное ухудшение её электрических свойств, именуемое старением [5]. Под воздействием различных факто-

ров и нагрузок в материалах диэлектрика происходят физико-химические процессы, которые приводят к разрушению изоляционного материала и последующим отказам изоляции обмоток электрических машин в виде электрического пробоя и межвитковых замыканий. Однако в большинстве случаев последствия старения могут быть устранены путём восстановительного ремонта изоляции [6].

Процессы старения ограничивают срок службы изоляционных конструкций [7; 8]. Поэтому при разработке, изготовлении и в процессе эксплуатации оборудования высокого напряжения должны предусматриваться меры, снижающие темпы старения изоляции до такого уровня, при котором обеспечивается требуемый срок службы изоляционных конструкций — 20–30 лет и более [9; 10]. Основные закономерности старения изоляции и методов её профилактических испытаний рассмотрены в [11–13].

В процессе эксплуатации в результате передачи электрической изоляции различных видов энергии происходит существенное изменение первоначальных свойств. Различают следующие виды старения изоляции — электрическое, механическое и тепловое. Кроме того, на текущее состояние и интенсивность процессов старения существенное влияние могут оказывать воздействие внешней среды, повышенная влажность и загрязнение.

Известно, что электрический пробой твёрдых диэлектриков происходит преимущественно по следующим причинам [13]:

1) механические — механическое разрушение, а именно развитие микротрещин, ослабляющих электрическую прочность диэлектрика. С целью повышения эксплуатационной надёжности ТЭД должны быть обеспечены высокие механические свойства изоляционных материалов обмоток полюсов и якоря, необходимых для сохранения электрической прочности изоляции, морозостойкости и нагревостойкости как в процессе изготовления ТЭД, так и в процессе длительной эксплуатации, когда обмотки подвержены влиянию контрастных температур, значительным центробежным и электродинамическим воздействиям, тряске, вибрациям и ударам [14];

2) тепловые — изменение свойств и структуры диэлектрика, возрастание тепловой

электропроводности. Тепловые процессы играют решающую роль в изменении свойств и характеристик элементов, в процессах их разрушения и старения. Темпы теплового старения изоляции определяются скоростями химических реакций, зависящими от температуры. Обычно полагают, что срок службы при тепловом старении обратно пропорционален скорости химических реакций, которые связаны с температурой уравнением Аррениуса. Отсюда получается правило Монтзингера (правило восьми градусов) [14];

3) электрические — импульсные перенапряжения, ионизация с процессом вырывания электронов из атомов, молекул и ионов. При нахождении материала диэлектрика в высокотемпературном поле происходит частичное разложение материала, которое идёт тем интенсивнее, чем выше температура. С течением времени происходит постепенное увеличение пористости изоляционного материала. Это приводит к возникновению местных электрических неоднородностей, сказывающихся на изменении локальной диэлектрической проницаемости, что, в свою очередь, приводит к возникновению местных перенапряжений при наложении на изоляционный материал переменного электрического поля [14].

Анализ данных по отказам ТЭД показал, что наибольшее негативное влияние на прочность витковой изоляции обмоток оказывает тепловое старение в процессе эксплуатации. В работах [15; 16] авторы указывают, «что многие физико-химические процессы, связанные с возникновением отказов витковой изоляции, являются термически активируемыми процессами, т.е. интенсивность протекания процессов увеличивается с повышением температуры». В то же время причиной разрушения изоляционного материала ТЭД — появления пористости и растрескивания, является воздействие механических нагрузок, в частности, вибрации.

При рассмотрении механизмов распада материала электроизоляции тяговых электродвигателей НБ-418К6 установлено, что при-

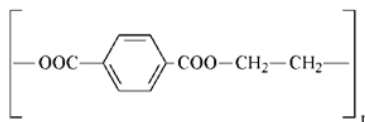


Рис. 1. Структурная формула плёнки из полимера полиэтилентерефталат.

чиной электрического пробоя обмоток тяговых электродвигателей является термическая и термоокислительная деструкция, приводящая к механическому разрушению электроизоляции с образованием трещин в ней и к карбонизации (обугливанию) электроизоляции, которая сопровождается резким падением её электрического сопротивления.

Электроизоляция «Элмикатерм 524019», используемая в тяговых электродвигателях НБ418-К6, представляет собой композицию, состоящую из слюдяной бумаги (28 % вес), ткани из стеклянного волокна и полиэтилентерефталатной плёнки (вместе 32–52 % вес), склеенной между собой и пропитанных электроизоляционным лаком или компаундом (20–40 % вес). При её термическом и термоокислительном разрушении в первую очередь страдает её органическая составляющая.

Основу электроизоляции «Элмикатерм-524019» составляет плёнка из полимера полиэтилентерефталата (лавсана) (рис. 1).

При нагревании наблюдается в основном гомолитический (радикальный) разрыв связей С-О, как наименее прочных (рис. 2).

Процесс термоокислительной деструкции полиэтилентерефталата интенсивно протекает при температурах 170–220°С. Наличие воздуха способствует значительной деструкции изоляции, что сопровождается пожелтением и интенсивным выделением таких газообразных продуктов, как ацетальдегид, угарный и углекислый газ (рис. 3).

В ИК-спектре выделяющихся летучих продуктов присутствуют соединения со связями С-О — простые и сложные эфиры, кислоты, альдегиды, ацетали. Именно появление в ИК-спектре данных соединений свидетельствует о начале разрушения по-

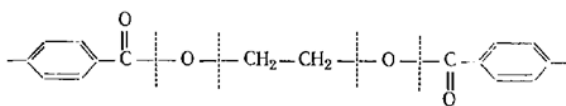


Рис. 2. Гомолитический (радикальный) разрыв связей С-О плёнки из полимера полиэтилентерефталат.



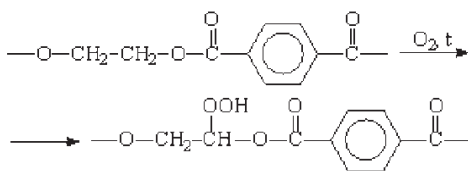


Рис. 3. Термоокислительная деструкция полиэтилентерефталата.

лимерной электроизоляции, а их исчезновение — о её полном разрушении. Проведённые исследования показали, что соединения с такими группами при термолизе рассматриваемой электроизоляции можно наблюдать в ИК-спектре в следующих диапазонах волновых чисел:

- C=O (сложноэфирная, кислотная) — 1770–1680 см^{-1} (наблюдается система перекрывающихся пиков в данной области);
- C-O (простые и сложные эфиры, кислоты, ацетали) — 1300–1000 см^{-1} (наблюдаются пики при 1038, 1065, 1125, 1155, 1169, 1241, 1295);
- деформационные колебания C—C связей ароматических колец — 2000–1667 (наблюдается система слабых пиков) и 900–690 см^{-1} (740, 812, 877);
- соединения со связями, H-C= (например, этилен) — 1000–800 см^{-1} (имеется пик при 937 см^{-1});
- соединения со связями C=C — 1500–1700 см^{-1} (при ранних стадиях нагрева здесь имеется ряд интенсивных пиков).

На основе результатов анализа существующих в настоящее время технических средств установлено, что простые оптические датчики на ацетальдегид, метилдиоксолан и другие указанные соединения, работающие в условиях плотного фона паров других органических соединений, в настоящее время отсутствуют. Срок службы существующих промышленных электрохимических датчиков будет чрезвычайно коротким в результате протекания цепи специфических химических реакций в атмосфере газового выброса от нагретой изоляции тягового электродвигателя, работающего в реальных условиях с загрязнением от разложения нефтепродуктов, что способствует их интенсивному выходу из строя.

Таким образом, проведение анализа ИК-спектра выделяющихся летучих продуктов при термическом и термоокислительном разрушении электроизоляции целесообразно на основе использования специализиро-

ванного инфракрасного ИК-интерферометра, настроенного на частоту из набора перечисленных выше аналитических колебаний и также адаптированного к пробоотбору.

По результатам проведённых исследований установлена требуемая селективность анализа в ИК-диапазоне длин волн. Во всех экспериментах с аналитическими задачами применялась идентичная методика измерений, которая предусматривает введение газообразной пробы в газовую кювету после предварительной её прокачки чистым воздухом в течение 30 минут. Это позволило избежать влияния атмосферы от предыдущих измерений на последующие серии экспериментов.

К каждому новому измерению установка подходила в одинаковом стартовом состоянии. Это состояние контролировалось по пробной записи ИК-спектра пустой кюветы с прокачкой воздуха через пустой реактор печи. При удовлетворительном результате стартового контроля кюветной атмосферы, в камеру-реактор (рис. 4) вводился образец и начиналась запись серии спектров.

Для регистрации спектров использовался средний ИК-диапазон 5000–350 см^{-1} как наиболее информативный для исследования молекулярной структуры органических соединений. Выбранное спектральное разрешение 2 см^{-1} является стандартным для большинства исследований такого типа и определено как оптимальное в пробных измерениях.

На основании результатов проведённых измерений, полученных при выполнении описанных исследований, установлено, что термический распад органических соединений, входящих в состав рассмотренного изоляционного материала, сопровождаемый параллельным термолизом веществ — загрязнителей наружной оболочки обмоток ТЭД — имеет достаточно сложную кинетику с образованием большого количества различных продуктов в газовой фазе. Определять категорию износа изоляционного материала

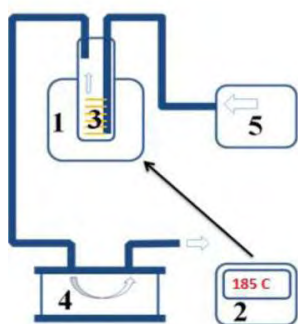


Рис. 4. Терморегулируемая приставка для исследования газообразных продуктов от изоляционного материала с калибровочной кюветой.

целесообразно методом ИК-спектроскопии по относительному коэффициенту пропускания электромагнитного излучения в газовой атмосфере, отводимой от обмотки ТЭД. Результаты исследований подтвердили, что измерения возможно проводить по разработанной методике, аналитическая часть которой базируется на оценке относительной интенсивности пика поглощения с максимумом в области $1150\text{--}950\text{ см}^{-1}$, соответствующего возбуждению простых колебаний С-О в наиболее важных продуктах термолитиза полимерной электроизоляции – простых и сложных эфирах, карбоновых кислотах, ацеталах.

С целью определения влияния степени износа изоляции обмоток ТЭД НБ-418К6 на интенсивность общего объема газового выброса, в том числе выброса углекислого газа, проведены исследования образцов изоляционного материала от главных полюсов разных тяговых электродвигателей НБ-418К6 электровоза, которые представляли собой комбинацию лавсановой ленты К-20 и слюдопластовой ленты Элмикатерм 0,1 x 20 и 0,13 x 30.

По спектрам всех образцов был сделан вывод о последовательном увеличении выброса углекислого газа в результате нагрева в силу запуска процесса окисления органических соединений, входящих в состав всех образцов. При этом общий объем газового выброса тем больше, чем ниже степень износа изоляции. Следует отметить большое количество водяного пара, выделяемого материалом всех образцов при рабочей температуре, – ему отвечают спектральные области с большим числом узких линий с центрами вблизи 3800 см^{-1} , 1600 см^{-1} .

С целью выявления характерной контрольной компоненты были проведены экс-

перименты по определению состава загрязняющих включений в эманулирующих газах изоляции обмоток ТЭД. При сравнении результатов измерений образцов загрязнённых образцов и образца с рабочей изоляцией с нового двигателя установлено, что основные закономерности в изменении интенсивностей линий и полос поглощения сохраняются. Однако отмечается появление и рост интенсивности новых линий поглощения, прежде всего в области $740\text{--}1000\text{ см}^{-1}$, что связано с появлением в газовой фазе замещённых производных бензола при термолитизе углеводородов, входящих в состав смазочных масел. Схожие по химической природе продукты термолитиза изоляции и грязи не дают возможности использовать область 740 см^{-1} как аналитическую, то есть полоса 740 см^{-1} непригодна для оценки категории исправности изоляции в реальных условиях.

В результате проведённых экспериментальных исследований установлено, что наиболее информативной и устойчивой к перекрытию с линиями поглощения грязи в применяемом диапазоне частот ИК-излучения является только широкая многокомпонентная полоса в области $1150\text{--}950\text{ см}^{-1}$ с максимумом вблизи 1090 см^{-1} . Форма данной полосы отстоит достаточно далеко от паразитных интенсивных линий поглощения, связанных с появлением загрязнений.

Анализ относительной интенсивности полосы поглощения газовой атмосферы при 1090 см^{-1} от образцов изоляции с различной степенью износа свидетельствует о том, что положение максимума данной полосы и её интенсивность являются показателем состояния материала. В новом материале относительная интенсивность данной полосы максимальна, а центр её слегка сдвинут в низкочастотную область к значению



1070 см⁻¹. При наличии неисправности в изоляции интенсивность данной полосы мала, и она плохо различима на уровне фона, то есть отсутствует. В спектре образца с предпробойной или загрязнённой изоляцией интенсивность имеет близкую относительную интенсивность, но несколько разное отношение правой и левой компонент — 1080 и 1120 см⁻¹. На основании анализа экспериментальных данных установлено, что по интенсивности полосы поглощения газовой атмосферы можно выявлять не новый, но ещё рабочий двигатель.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании результатов измерений, полученных при выполнении описанных исследований, можно заключить, что термический распад органических соединений, входящих в состав изоляционного материала, сопровождаемый параллельным термоллизом веществ-загрязнителей наружной оболочки обмоток ТЭД, имеет достаточно сложную кинетику с образованием большого количества различных продуктов в газовой фазе. Для качественного определения категории износа изоляционного материала целесообразно применять метод ИК-спектроскопии по относительному коэффициенту пропускания электромагнитного излучения в газовой атмосфере, отводимой от обмотки ТЭД. Информативное измерение необходимо выполнять по разработанной методике, аналитическая часть которой базируется на оценке относительной интенсивности пика поглощения с максимумом в области 1150–950 см⁻¹, соответствующего возбуждению простых колебаний С-О в наиболее важных продуктах термоллиза полимерной электроизоляции — простых и сложных эфирах, карбоновых кислотах, ацеталах.

ЛИТЕРАТУРА

1. García-Garre, A., Gabaldón, A. Analysis, Evaluation and Simulation of Railway Diesel-Electric and Hybrid Units as Distributed Energy Resources. Electrical Engineering Area, Universidad Politécnica de Cartagena, 30202 Cartagena, Spain. Appl. Sci., 2019, Vol. 9, Iss. 17, 3605. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9173605>.
2. Liudvinavičius, L., Jastremskas, V. Modernization of Diesel-electric Locomotive 2M62 and ТЕР-70 Locomotives with Respect to Electrical Subsystem. 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017, Transportation Science and Technology, Procedia Engineering, 2017, Vol. 187, pp. 272–280. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.375.
3. Железнодорожный транспорт в Российской Федерации, СНГ и за рубежом: Обзор / ЦНИИТЭИ МПС. — М., 2001. — Вып. 28. — 131 с.
4. Загребельский А. М., Кадышев С. А., Ребрик Б. Н. Стоимость жизненного цикла электроваза // Железнодорожный транспорт. — 1998. — № 12. — С. 34–36.
5. Серебряков А. С. Методы и средства для диагностики изоляции электрических машин и аппаратов её защиты / Дис... док. техн. наук. — М.: МГУПС (МИИТ), 2000. — 438 с.
6. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для электро-энерг. спец. вузов / Ред. В. П. Ларионов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 463 с.
7. Исследование электрических характеристик внутренней изоляции высоковольтного электрооборудования. Испытания на срок службы и исследование старения изоляции силовых конденсаторов, кабелей, электрических машин, токопроводов и элегазовых КРУ 110–330 кВ: Отчёт о НИР (отчёт по этапу) / Науч.-исслед. ин-т по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (НИИПТ); рук. В. И. Попков. — Л., 1984. — 45 с. — № ГР 01840079292. — Инв. № 02050005358.
8. Исследование путей совершенствования методов испытания и контроля изоляции электрических машин, трансформаторов, конденсаторов: отчёт о НИР (промежут.) / Новосиб. электротехн. ин-т связи (НИЭСИ); рук. Ю. К. Горбунов. — Новосибирск, 1987. — 46 с. — № ГР 018500 65632. — Инв. № 02880914844.
9. Гольдберг О. Д. Испытания электрических машин: Учебник для вузов по спец. «Электрические машины». — М.: Высшая школа, 1990. — 254 с.
10. Гольдберг О. Д., Абдуллаев И. М., Абиев А. Н. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / Ред. О. Д. Гольдберг. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 159 с.
11. Гоффо Р. Физический смысл критериев, характеризующих состояние высоковольтной изоляции электрических машин // ВНИИЦентр — 1193: 53979. — № 0689001388. — М., 1988. — 24 с. / Пер. ст.: Goffaux, R. Sur la signification physique de critères caractérisant l'état de l'isolation HAT de machines tournantes // Révue Générale de L'Electricité. — 1986. — Vol 2.
12. Давид П., Фазекаш Г., Хорват А. Характеристика термостойкости электрических изоляционных материалов и изоляций с учётом термогравиметрического индекса и стандартного температурного индекса // ВНИИ-Центр. — С-73674. — № 0690200209. — М., 1990. — 10 с.
13. Исмаилов Ш. К. Повышение ресурса изоляции обмоток электрических машин подвижного состава в условиях эксплуатации / Дис... док. техн. наук. — Омск, 2004. — 418 с.
14. Винокуров В. А., Попов Д. А. Электрические машины железнодорожного транспорта: Учебник. — М.: Транспорт, 1986. — 511 с.
15. Андреев Г. А., Воробьёв А. А., Кучин В. Д. Температурная зависимость электрической прочности ионных кристаллов при тепловом и электрическом пробое // Известия вузов. Физика. — 1957. — № 1. — С. 128–140.
16. Кучин В. Д. Зависимость электрической прочности ионных кристаллов от температуры при электронной форме пробоя // Известия вузов. Физика. — 1958. — № 2. — С. 114–120.