УДК 621.3.048.1 DOI: 10.34031/ES.2023.2.006

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ИЗОЛЯЦИИ КЛАССА НАГРЕВОСТОЙКОСТИ Н (180°С) ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИЭФИРКЕТОНОВОЙ И ПОЛИИМИДНОЙ ПЛЕНОК

Папков А.В.[1], Лучко Д.В.[2]

[1]ООО «ХК Элинар», [2]ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

Аннотация

Работа тяговых двигателей электроподвижного состава в условиях постоянно меняющейся температуры и влажности закономерно приводит к снижению сопротивления корпусной изоляции катушек главного и вспомогательного полюсов, что затем приводит к пробою изоляции и выходу двигателя из строя. В общей статистике по поломкам ТЭД процент выхода из строя по причине низкого сопротивления изоляции составляет до 30%. Производители электрической изоляции постоянно проводят работы по увеличению ее надежности, используя для этого современные системы полимерных материалов. В данной статье приведено краткое описание систем изоляции тяговых электродвигателей класса нагревостойкости Н (180°С) на основе полиэфиркетоновой и полиимидной пленок. Указаны основные нормативные документы, на основании которых проводилась оценка характеристик изоляции. В качестве объектов исследования использовались изоляционные ленты на основе стеклоткани и слюды, серийно выпускаемые ООО «ЗЭИМ Элинар». Приведены методики, указано оборудование и основные результаты ресурсных испытаний различных систем изоляции. По результатам испытаний показано, что система на основе полиэфиркетоновой пленки ничем не уступает по нагревостойкости системе на основе полиимидной пленки.

Ключевые слова: *электроизоляционные материалы, системы изоляции, тяговые электродвигатели, полиэфиркетоновая пленка, полиимидная пленка.*

RESULTS OF COMPARATIVE RESOURCE TESTS OF INSULATION SYSTEMS OF HEAT RESISTANCE CLASS H (180°C) OF TRACTION ENGINES OF ELECTRIC LOCOMOTIVES USING POLYESTHERKETONE AND POLYIMIDE FILMS

Andrey Papkov[1], Dmitry Luchko[2]

[1]Elinar Holding Company LLC

[2]National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

Abstract

The operation of electric locomotive traction motors in conditions of constantly increasing temperature and humidity naturally leads to a decrease in the resistance of the body insulation of the coils of the main and auxiliary poles, which then leads to insulation breakdown and engine failure. In the general statistics on TED breakdowns, the percentage of failure due to low insulation resistance is up to 30%.

Manufacturers of electrical insulation are constantly working to increase its reliability, using modern systems of polymer materials for this purpose. This article provides a brief description of the insulation systems of traction electric motors of heat resistance class H (180 °C) based on polyethyrketone and polyimide films. The main normative documents on the basis of which the assessment of insulation characteristics was carried out are indicated. Insulating tapes based on fiberglass and

mica, mass-produced by ZEIM Elinar LLC, were used as objects of research. The methods are given, the equipment and the main results of resource tests of various insulation systems are indicated. According to the test results, it is shown that the system based on a polyester ketone film is in no way inferior in terms of heat resistance to a system based on a polyimide film.

Keywords: *electrical insulating materials, insulation systems, traction motors, polyesterketone film, polyimide film.*

Введение

В последние годы наблюдается устойчивый рост объемов потребления электроизоляционных материалов (ЭИМ) для систем изоляции класса Н (180°С) производителями тягового оборудования, такими как АО «Трансмашхолдинг» а также АО «Желдорреммаш» и АО «Синара-Транспортные Машины». Подавляющее большинство ЭИМ, применяемых для этих целей как в России, так и за рубежом, это композиции на основе слюдяных бумаг, полиимидных пленок и стеклотканей. ОАО «Холдинговая компания Элинар» серийно выпускает полный комплект материалов для систем изоляции ТЭД класса нагревостойкости Н (180°С). Основными элементами данной системы изоляции являются стеклослюдинитовая лента с полиимидной пленкой Элмикатерм 529029 для корпусной изоляции полюсных катушек и якорных секций, Синтофлекс 828 в качестве пазовой изоляции якоря и пропиточный компаунд Элком ПК-21(э) или Элком ПК-21У. [1, 2]. Надежность данной системы изоляции подтверждена многолетним применением этих материалов электромашиностроительными и ремонтными предприятиями России, стран СНГ и Балтии.

Тем не менее, ОАО «ХК Элинар», как разработчик ЭИМ, постоянно ведет работу с ведущими производителями полимерных пленок, стеклотканей, химических продуктов с целью создания новых ЭИМ с более высокими электрофизическими свойствами и низкой себестоимостью. Определенный интерес с этой точки зрения представляют полиэфиркетоновая (ПЭЭК) пленка, выпускаемая компанией «VICTREX» под торговой маркой «Aptiv». Из технического описания первой из вышеуказанных пленок следует, что она имеет класс нагревостойкости Н (180°С), при этом продолжительная температура эксплуатации в электрическом поле и в условиях механических нагрузок составляет 180°С.

Целью проведенных испытаний была оценка класса нагревостойкости и возможности применения ЭИМ, содержащих ПЭЭК пленку в системах изоляции класса нагревостойкости Н (180°С). Испытания проводились в ОАО «ВЭлНИИ», г. Новочеркасск, располагающим сегодня единственным в России и странах СНГ сертифицированным испытательным центром тягового электрооборудования.

Материалы и методы

Макеты корпусной изоляции якорной обмотки тягового электродвигателя были изготовлены с применением двух марок стеклослюдинитовых лент.

1. Опытная предварительно пропитанная электроизоляционная лента марки Элмикатерм 529049 производства ОАО «ХК Элинар», содержащая слюдяную бумагу, стеклоткань и полиэфиркетоновую пленку «Aptiv», тип Aptiv 1000 компании «VICTREX». При производстве данной ленты использовалось связующее, применяемое для производства серийной ленты Элмикатерм 529029. Предполагаемый класс нагревостойкости системы изоляции на основе ленты Элмикатерм 529049 – Н (180°С).

2. Серийная предварительно пропитанная лента марки Элмикатерм 529029 (ТУ 3492-038-50157126-2003) производства ОАО «ХК Элинар», содержащая слюдяную бу-

магу, стеклоткань и полиимидную пленку. Класс нагревостойкости системы изоляции на основе ленты Элмикатерм 529029 – Н (180°С), подтвержден, в том числе ресурсными испытаниями, выполненными в ОАО «ВЭлНИИ».

Испытания по оценке нагревостойкости системы изоляции на основе ленты, содержащей пленку «Aptiv» реализованы методом совместного теплового и электрического старения [3, 4].

1.Определялись электрофизические характеристики изоляции:

– электрическая емкость (С);

– электрическое сопротивление (R) при постоянном напряжении 2,5 кВ, через 15с с момента подачи напряжения;

– ток утечки (Iут) при напряжении промышленной частоты в диапазоне 1÷5 кВ. Шаг по напряжению 1 кВ. Измерения производились по истечении 15 с с момента подачи напряжения.

– тангенс угла диэлектрических потерь (tg δ) при напряжении промышленной частоты 1 кВ.

1а. Испытательные электроды (заземляемые) из алюминиевой фольги. Длина электродов (100±1) мм.

Условия окружающей среды – по ГОСТ 6433.1-71: R; М (15-35 ºС) 45-75 %.

2. Изоляцию образцов подвергали воздействию повышенной влажности воздуха, выдержав их в камере тепла и влаги по следующему режиму:

– относительная влажность 98 %; температура (40±3)°С – 6 часов;

– относительная влажность 95 %; температура (30±3)°С – 18 часов.

3. Затем повторяли п. 1 (за исключением измерения tg δ).

4. Изоляцию образцов подвергали сушке при температуре (120±3)°С в течение 3 часов.

5. Определяли пробивные напряжения изоляции пяти образцов каждого варианта по табл.1 при скорости подъема и частоте испытательного напряжения 1 кВ/с и 50 Гц соответственно. Рассчитывалась электрическая прочность изоляции образцов каждого варианта.

6. Было проведено 10 циклов испытаний образцов каждого варианта (длительность одного цикла эквивалентна 2000 ч воздействия температуры, равной температуре класса нагревостойкости Н (180°С), см. табл. 2 ГОСТ 10518-88 и расчетного рабочего напряжения 1кВ). Испытательные электроды по п. 1а.

Содержание цикла:

– тепловое старение при температуре (240±3)°С в течение 48 часов;

– электрическое старение при напряжении переменного тока промышленной частоты 1,53 кВ в течение 8 часов.

7. По окончании 4, 8 и 10 циклов выполнялись для пяти образцов каждого варианта следующие испытания:

– повтор п.п. 1-4;

– затем было проведено 10 циклов испытаний изоляции образцов на воздействие смены температуры (термоудары) методом двух камер (ГОСТ 16962.1-89). Время выдержки при каждой из указанных ниже температур – 1,5 часа, продолжительность переноса из камеры в камеру не более 5 мин. Для всех вариантов минимальная температура испытаний минус (50±3) ºС. Максимальное значение температуры – плюс (130±3) ºС;

– повтор п.п. 1-5.

Достоверность результатов испытаний обеспечивалась тем, что параллельно с исследуемой системой испытывалась система изоляции на основе ленты Элмикатерм

529029, гарантировано соответствующая классу нагревостойкости Н (180°С) [5]. Способ изготовления макетов систем изоляции и их геометрические размеры идентичны.

Макеты воспроизводили корпусную изоляцию якорной обмотки тягового электродвигателя с номинальным напряжением 1 кВ. Их конструкция и технология изготовления представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики макетов систем изоляции

Конструкция образцов и технологические операции	Вариант 1	Вариант 2
Проводник	Медная шина 3×20×300 мм	
Корпусная изоляция	Лента Элмикатерм 529049, опытная, с полиэфиркетоновой пленкой APTIV, 0,08×20, 4 слоя в 1/2 ширины	Лента Элмикатерм 529029, серийная, с полиимидной пленкой 0,1×20, 4 слоя в 1/2 ширины
Подогрев перед пропиткой	(80±2)°С в течение 3 ч	
Пропиточный состав	Компаунд Элком ПК-21(э)	
Способ пропитки	Вакуум-нагнетательный	
Термообработка	(180±5) ºС в течение 12ч	
Количество образцов	20	20

Результаты

Результаты испытаний лент на соответствие требованиям нормативной документации приведены в таблице 2. Значения показателей лент соответствуют нормативной документации.

Таблица 2

Результаты испытаний

Наименование показателя	Вариант 1		Вариант 2	
	Фактическое значение	*Значение по ТУ*	*Фактическое значение*	*Значение по ТУ*
Толщина, мм				
средняя	0,0975	0,08±0,01	0,102	0,10±0,01
в отдельных точках	0,095-0,10	0,08±0,02	0,10-0,105	0,10±0,02
Пробивное напряжение, кВ				
минимальное	6,20		7,20	
максимальное	7,50		9,0	
среднее	6,80		8,40	
Среднее значение электрической прочности, кВ/мм	69,34	не менее 55	76,36	не менее 70

Изоляция образцов обоих вариантов выдержала испытания одноминутным контрольным напряжением промышленной частоты – 6,5 кВ.

В табл. 3 и на рис. 1-5 для различных стадий испытаний представлены:

– расчетные показатели, отражающие степень нарушения структуры изоляции, полученные по результатам замеров электрической емкости и токов утечки;

– значения тангенса угла диэлектрических потерь, пробивных напряжений и сопротивления изоляции.

Принятые условные обозначения:

$\bar{\rho}$ - отношение средних значений электрической емкости в увлажненном состоянии к средним значениям емкости в сухом состоянии (относительная единица):

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i^{в}}{C_i^{с}},$$

где n – количество образцов, подвергающихся измерениям на данном этапе испытаний; $C_i^c, C_i^{в}$ – значения электрической емкости изоляции в сухом и увлажненном состояниях, соответственно;

$\bar{\mu}$ - отношение средних значений токов утечки в увлажненном состоянии к средним значениям токов утечки в сухом состоянии (относительная единица):

$$\bar{\mu} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{I_i^{в}}{I_i^{с}},$$

где I_i^c, $I_i^{в}$; - значения токов утечки изоляции образцов в сухом и увлажненном состояниях, измеренных при напряжении промышленной частоты 1 кВ, соответственно; $R_{\min}^{в}$ – минимальное значение электрического сопротивления изоляции образцов; $tg\bar{\delta}^{c}$ - среднее значение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции образцов; $\bar{E}_{\text{пр}}^{\text{с}}$ – среднее значение электрической прочности изоляции образцов.

Таблица 3

Результаты испытаний на различных стадиях

Оцениваемые параметры	Вариант 1							Вариант 2						
	Исходное состояние	После 4-х циклов теплового старения	После 4-х циклов теплового старения и термоударов	После 8-х циклов теплового старения	После 8-х циклов теплового старения и термоударов	После 10-х циклов теплового старения	После 10-х циклов теплового старения и термоударов	Исходное состояние	После 4-х циклов теплового старения	После 4-х циклов теплового старения и термоударов	После 8-х циклов теплового старения	После 8-х циклов теплового старения и термоударов	После 10-х циклов теплового старения	После 10-х циклов теплового старения и термоударов
$\bar{\rho}$, о.е.	1,27	2,37	2,77	3,12	3,65	4,58	4,91	1,23	2,08	2,33	3,61	4,11	5,45	5,62
$\bar{\mu}$, о.е.	1,15	2,95	2,90	3,50	3,75	3,88	4,20	1,11	3,46	3,50	4,17	4,21	5,03	5,30
$R_{\min}^{в}$, МОм	10000	2000	25	1000	5	800	25	10000	2000	5000	5000	25	200	17,5
$tg\bar{\delta}^{c}$, %	0,68	0,75	0,46	0,90	0,52	0,51	0,47	0,57	0,76	0,39	0,71	0,64	0,44	0,52
$\bar{E}_{\text{пр}}^{\text{с}}$, кВ/мм	43,95	–	32,77	–	30,18	–	28,72	37,32	–	29,28	–	29,61	–	28,26

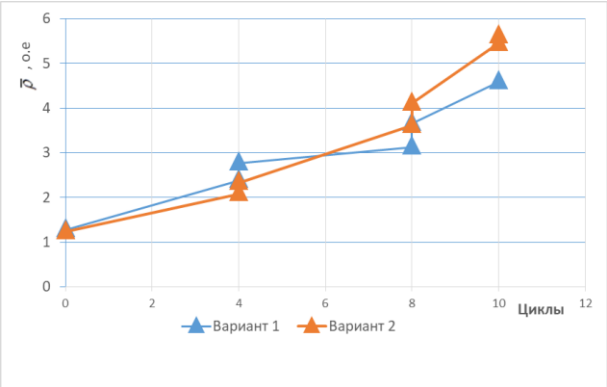

Рис. 1. Зависимость отношений электрической емкости систем изоляции от объема испытаний

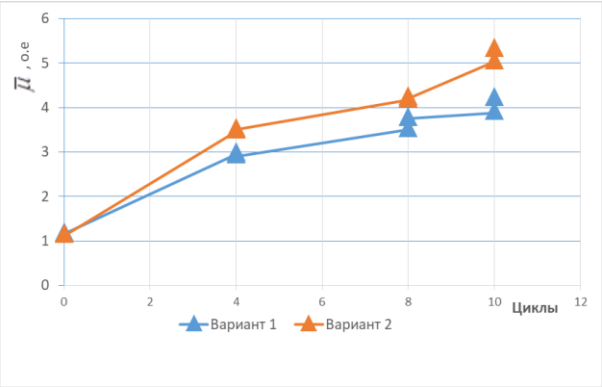

Рис. 2. Зависимость отношений токов утечки систем изоляции от объема испытаний

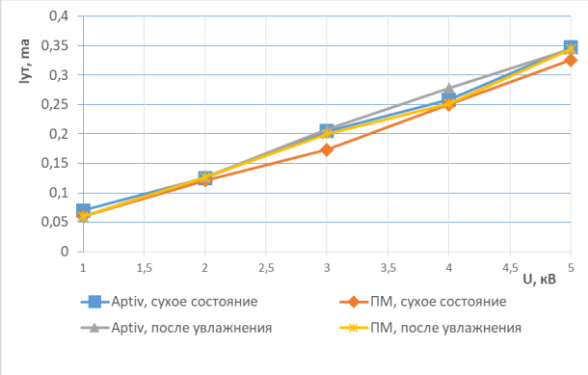

Рис. 3. Вольтамперные характеристики, исходное состояние

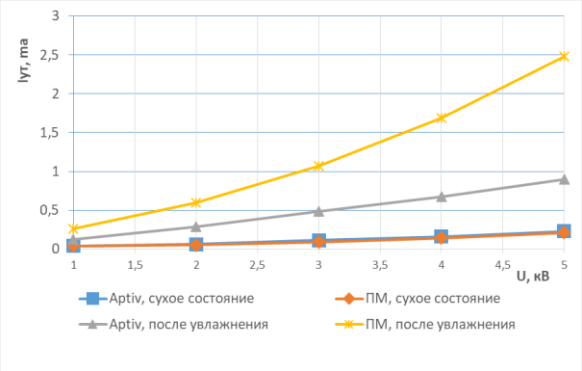

Рис. 4. Вольтамперные характеристики систем изоляции, после 10-ти циклов и термоударов

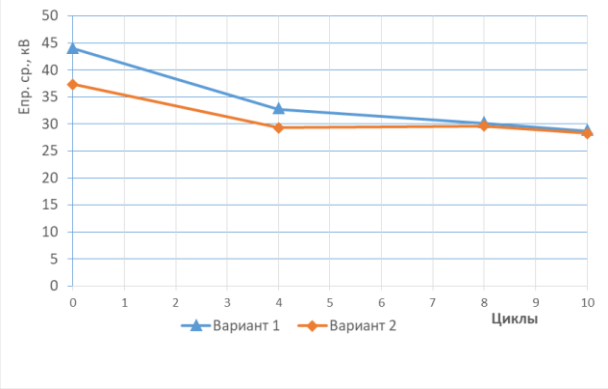

Рис. 5. Зависимость электрической прочности систем изоляции от объема испытаний (сухое состояние)

Анализ результатов испытаний показывает следующее.

1. Системы изоляции в исходном состоянии и в процессе испытаний имеют достаточно близкие характеристики (R; tgδ) и расчетные показатели ($\bar{\rho}$; $\bar{\mu}$), оцениваемые неразрушающими методами. При этом tgδ систем изоляции находится на низком уровне и изменяется в очень узком диапазоне (0,4-0,9) %.

2. Зависимости токов утечки систем изоляции от напряжения в исходном состоянии (сухие и влажные) практически совпадают и носят линейный характер. Нелинейность рассматриваемых зависимостей наблюдается после всех испытаний и только в увлажненном состоянии, причем в большей степени для системы изоляции, содержащей полиимидную пленку (вариант 2).

3. Термоудары не оказывают существенного влияния на характеристики систем изоляции.

4. Электрическая прочность системы изоляции варианта 1 в исходном состоянии выше, по сравнению с вариантом 2 на 17,7 %. Однако, скорость снижения электрической прочности варианта 2 в начальной стадии испытаний несколько ниже. Электрические прочности систем изоляции в завершающих циклах испытаний, как и характер их изменения, совпадают.

Снижение электрической прочности под воздействием испытательных нагрузок относительно исходных значений составило:

а) вариант 1 – 34,6 %;

б) вариант 2 – 24,0 %.

Также дополнительно были проведены сравнительные испытания по оценке длительной электрической прочности слюдинитовых лент Элмикатерм 529049 и 529029.

Испытания выполнялись при температуре (180±3)°С и трех значениях испытательных напряжений, равных $0{,}5^{U}_{пр}$, $0{,}3U_{пр}$ и $0{,}25U_{пр}$ ($U_{пр}$ - минимальное из средних значений пробивных напряжений лент) [6, 7].

Испытания проводились в приспособлениях, обеспечивающих одновременную установку на поверхности лент десяти испытательных цилиндрических латунных электродов диаметром (6±0,5) мм. Ленты закреплялись на заземленной подложке.

После достижения температуры (180±3)°С на электроды подавалось расчетное испытательное напряжение и фиксировалось время до каждого из пробоев лент.

Испытания проводились до пробоя 50 % плюс 1 точек. Результаты представлены в табл. 4 и на рис. 6.

Таблица 4

Время до пробоя, мин

Испытательное напряжение, кВ	Вариант 1	Вариант 2
$0{,}5U_{пр}$ = 3,41	68; 72; 85; 117; 121; 127 Среднее значение 124	102; 116; 124; 125; 131; 139 Среднее значение 135
$0{,}3U_{пр}$ = 2,05	254; 287; 317; 387; 397; 429 Среднее значение 413	321; 356; 405; 415; 489; 495 Среднее значение 492
$0{,}25U_{пр}$ = 1,70	530; 657; 681; 775; 790; 915 Среднее значение 852,8	765; 816; 817; 928; 932; 1016 Среднее значение 974

Выводы

1. Ускоренные испытания в объеме эквивалентном 20000 часов воздействия температуры класса нагревостойкости Н(180°С) и расчетного рабочего напряжения 1 кВ показали, что система изоляции на основе ленты Элмикатерм 529049, содержащей в

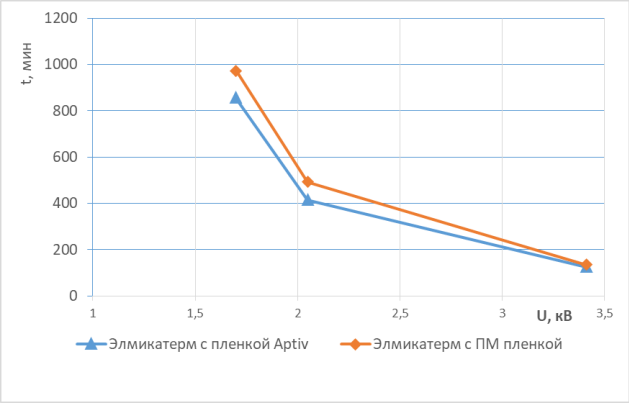

Рис. 6. Зависимости длительной электрической прочности лент от напряжения

качестве полимерной подложки полиэфиркетоновую пленку «APTIV», по всем контролируемым показателям практически не уступает системе изоляции с лентой Элмикатерм 529029, в конструкции которой традиционно использована полиимидная пленка.

2. Длительная электрическая прочность ленты Элмикатерм 529049, содержащей полиэфиркетоновую пленку «APTIV» незначительно ниже, чем у ленты Элмикатерм 529029 с полиимидной пленкой.

При испытательных напряжениях 0,5$U_{пр}$; 0,3Uпр и 0,25Uпр, указанное отличие составляет в среднем 8; 16 и 12%, соответственно.

3. Лента Элмикатерм 529049 с полимерной подложкой из полиэфиркетоновой пленкой APTIV может рассматриваться как адекватная замена ленты Элмикатерм 529029 с полиимидной пленкой в системах изоляции класса Н(180°С).

Библиографический список

1. Пак В.М., Папков А.В., Мельниченко А.П., Березинец Н.И., Родова Л.В. Основные результаты тестирования системы изоляции класса нагревостойкости Н (180°С) на основе материалов производства ОАО «ХК Элинар» // Электротехника. – 2009. – №3. – С. 44-47. EDN: KWNBTJ

2. Огоньков В.Г. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 304 с.

3. Папков А.В., Березинец Н.И., Киреев А.В., Пак В.М. Ресурсные испытания систем изоляции класса нагревостойкости Н (180°С) тяговых двигателей локомотивов //Электротехника. – 2011. – №4. – С. 17-20. EDN: NDPJJZ

4. Пак В.М., Трубачев С.Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 416 с.

5. Ленты пропитанные марок Элмикатерм [Сайт]: Атепцево: ООО «ЗЭИМ Элинар» [2023]. URL: http://www.elinarzeim.ru/materialyi-dlya-proizvodstva-tyagovyih-elektrodvigateley/ (дата обращения 7.04.2023).

6. Ваксер Н.М. Изоляция электрических машин. – Л.: Изд. ЛИИ, 1985. – 83 с.

7. Коноваленко Д.В., Иванов В.Н., Оленцевич Д.А., Сидоров В.В., Лыткина Е.М. Надежность электрических машин тягового подвижного состава. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – №1. – С. 196-198. EDN: JWTRWZ

References

1. Pak, V. M., Papkov, A. V., & Rodova, L. V. (2009). Osnovnye rezul'taty testirovaniya sistemy izolyacii klassa nagrevostojkosti N (180°S) na osnove materialov proizvodstva OAO “HK Elinar” [The main results of testing the insulation system of the heat resistance class H (180 ° C) based on materials produced by JSC HC Elinar]. *Electrical engineering*, *3*, 44-47. [In Russian]
2. Ogonkov, V.G. (2012). *Elektroizolyacionnye materialy i sistemy izolyacii dlya elektricheskih mashin* [*Electrical insulation materials and insulation systems for electric machines*]. Publishing House of MEI [In Russian].
3. Papkov, A. V., Berezinec., & Pak, V. M. (2011). Resursnye ispytaniya sistem izolyacii klassa nagrevostojkosti N (180°S) tyagovyh dvigatelej lokomotivov [Resource tests of insulation systems of heat resistance class H (180 °C) of traction enginees of locomotives]. *Electrical engineering*, *4*, 17-20. [In Russian].
4. Pak, V. M., & Trubachev S. G. (2007). Novye materialy i sistemy izolyacii vysokovol'tnyh elektricheskih mashin. [*New materials and insulation systems for high-voltage electrical machines*]. Energoatomizdat. [In Russian].
5. ZEIM Elinar LLC (n.d.) Materialy dlya proizvodstva tyagovykh elektrodvigateley [*Materials for the production of traction motors*]. Elinar. Retrieved April 15, 2023 from http://www.elinarzeim.ru/materialyi-dlya-proizvodstva-tyagovyih-elektrodvigateley. [In Russian]
6. Vakser, N. M. (1985). *Izolyaciya elektricheskih mashin* [*Insulation of electrical machines*]. St. Petersburg LII [In Russian]
7. Conovalenko, D. V., Ivanov, V. N., & Sidorov, V. V. (2008). Nadezhnost' elektricheskih mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Reliability of electric traction motors]. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*, *1*, 196-198. [In Russian].

Сведения об авторах

Папков Андрей Владимирович, заместитель генерального директора Общества с ограниченной ответственностью «Холдинговая компания Элинар», канд. техн. наук, доктор электротехники (почетное завние АЭН РФ), действительный член АЭН РФ, г. Наро-Фоминск.

E-mail: papkov@elinar.ru

Лучко Дмитрий Викторович, аспирант

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва.

E-mail: luchkoDV@mpei.ru

Authors about

Andrey Papkov, Deputy General Director of Elinar Holding Company LLC, Candidate of Technical Sciences. Doctor of Electrical Engineering, full member of the AEN of the Russian Federation

E-mail: papkov@elinar.ru

Dmitry Luchko, postgraduate student

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia.

E-mail: luchkoDV@mpei.ru