

Результаты сравнительных ресурсных испытаний систем изоляции класса нагревостойкости Н (180 °С) тяговых двигателей электровозов с использованием полиэфиркетоновой и полиимидной пленок*

Папков А.В., Лучко Д.В.

ОАО «ХК Элинар»

г. Наро-Фоминск, Российская Федерация

papkov@elinar.ru luchko@elinar.ru

Аннотация. Дано краткое описание систем изоляции тяговых электродвигателей класса нагревостойкости Н (180°С) на основе полиэфиркетоновой и полиимидной пленок. Приведены методики и основные результаты ресурсных испытаний различных систем изоляции.

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

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 «Желдорремаш» 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 полиэфиркетон (ПЭЭК) пленка, выпускаемая компанией «VICTREX» под торговой маркой «Artiv». 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.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

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 полиэфиркетонную пленку «Artiv», тип Artiv 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 бумагу, 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 «Artiv» 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 15 с с момента подачи напряжения;
- ток утечки (I_{ут}) при напряжении промышленной частоты в диапазоне 1÷5 кВ. Шаг по напряжению 1 кВ. Измерения проводились по истечении 15 с с момента подачи напряжения.

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

- тангенс угла диэлектрических потерь ($tg \delta$) 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; M (15-35 °C) 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) °C – 6 часов;

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

3. Затем повторяли п. 1 (за исключением измерения $tg \delta$).

4. Изоляцию образцов подвергали сушке при температуре (120±3) °C 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°C), см. табл. 2 ГОСТ 10518-88 и расчетного рабочего напряжения 1 кВ). Испытательные электроды по п. 1а.

Содержание цикла:

- тепловое старение при температуре (240±3) °C 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) °C. Максимальное значение температуры – плюс (130±3) °C;

- 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°C). 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

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

Таблица 1

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 АРТIV, 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)°C в течение 3 ч	
Пропиточный состав	Компаунд Элком ПК-21(э)	
Способ пропитки	Вакуум-нагнетательный	
Термообработка	(180±5) °C в течение 12ч	
Количество образцов	20	20

Таблица 2

Наименование показателя	Элмикатерм 529049, опытная, с полиэфиркетоновой пленкой АРТIV		Элмикатерм 529029 с полиимидной пленкой	
	Фактич. значение	Значение по ТУ	Фактич. значение	Значение по ТУ
Толщина, мм				
- средняя	75		02	
- в отдельных точках			05	
Пробивное напряжение, кВ				
- минимальное				
- максимальное				
- среднее				
Среднее значение электрической прочности, кВ/мм		не менее		не менее

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.

Условные обозначения, принятые в табл. 3 и на рис. 1-5:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i^a}{C_i}$$

где n – количество образцов, подвергающихся измерениям на данном этапе испытаний;

C_i^c ; C_i^a – значения электрической емкости изоляции в сухом и увлажненном состояниях, соответственно;

$$\bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i^a}{I_i^c}$$

где I_i^c ; I_i^a – значения токов утечки изоляции образцов в сухом и увлажненном состояниях, измеренных при напряжении промышленной частоты 1 кВ, соответственно;

R_{\min}^a – минимальное значение электрического сопротивления изоляции образцов;

$tg\bar{\delta}^c$ – среднее значение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции образцов;

$\bar{E}_{\text{пр}}^c$ – среднее значение электрической прочности изоляции образцов.

Таблица 3

Оцениваемые параметры	Номер варианта	
	Элмикатерм 529049, опытная, с полиэфиркетоновой пленкой АРТIV	Элмикатерм 529029 с полимидной пленкой
1	2	3
Исходное состояние		
$\bar{\rho}$, о.е.	1,27	1,23
$\bar{\mu}$, о.е.	1,15	1,11
R_{\min}^a , МОм	10000	10000
$tg\bar{\delta}^c$, %	0,68	0,57
$\bar{E}_{\text{пр}}^c$, кВ/мм	43,95	37,32
После 4-х циклов теплового старения		
$\bar{\rho}$, о.е.	2,37	2,08
$\bar{\mu}$, о.е.	2,95	3,46
R_{\min}^a , МОм	2000	2000
$tg\bar{\delta}^c$, %	0,75	0,76
После 4-х циклов теплового старения и термоударов		
$\bar{\rho}$, о.е.	2,77	2,33
$\bar{\mu}$, о.е.	2,90	3,50
R_{\min}^a , МОм	25	5000
$tg\bar{\delta}^c$, %	0,46	0,39
$\bar{E}_{\text{пр}}^c$, кВ/мм	32,77	29,28
После 8-ми циклов теплового старения		
$\bar{\rho}$, о.е.	3,12	3,61
$\bar{\mu}$, о.е.	3,50	4,17
R_{\min}^a , МОм	1000	5000
$tg\bar{\delta}^c$, %	0,90	0,71

Окончание таблицы 3

1	2	3
После 10-ти циклов теплового старения и термоударов		
$\bar{\rho}$, о.е.	4,91	5,62
$\bar{\mu}$, о.е.	4,20	5,30
R_{\min}^a , МОм	25	17,5
$tg\bar{\delta}^c$, %	0,47	0,52
$\bar{E}_{\text{пр}}^c$, кВ/мм	28,72	28,26
После 8-ми циклов теплового старения и термоударов		
$\bar{\rho}$, о.е.	3,65	4,11
$\bar{\mu}$, о.е.	3,75	4,21
R_{\min}^a , МОм	5	25
$tg\bar{\delta}^c$, %	0,52	0,64
$\bar{E}_{\text{пр}}^c$, кВ/мм	30,18	29,61
После 10-ти циклов теплового старения		
$\bar{\rho}$, о.е.	4,58	5,45
$\bar{\mu}$, о.е.	3,88	5,03
R_{\min}^a , МОм	800	200
$tg\bar{\delta}^c$, %	0,51	0,44

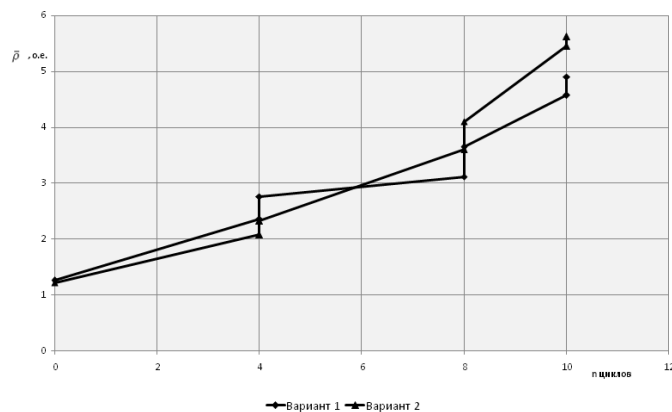


Рис. 1. Зависимость отношений электрической емкости систем изоляции от объема испытаний

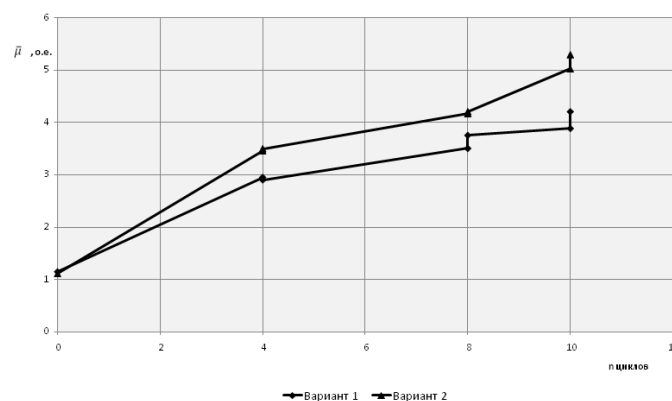


Рис. 2. Зависимость отношений токов утечки систем изоляции от объема испытаний

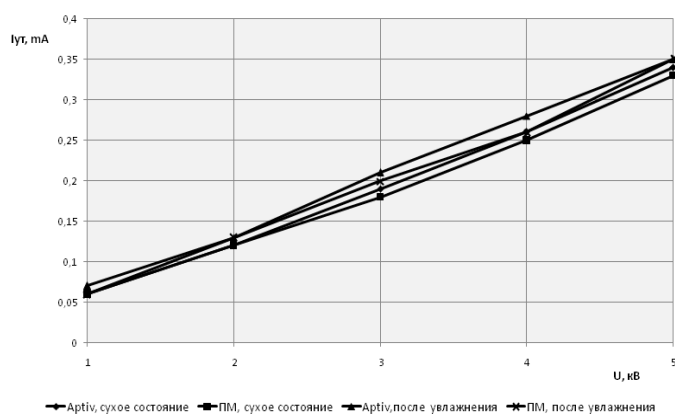


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики, исх. Состояние

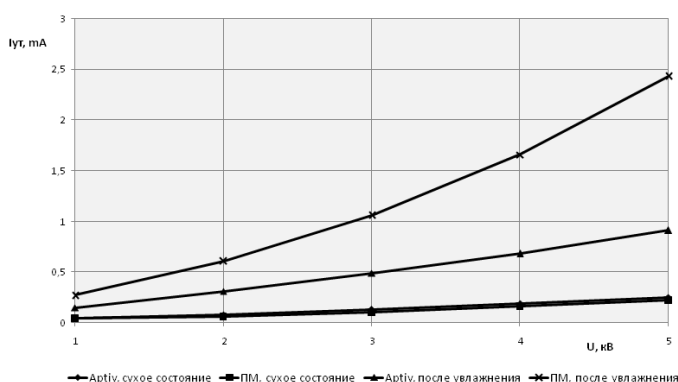


Рис. 4. Вольтамперные характеристики систем изоляции, после 10-ти циклов и термоударов

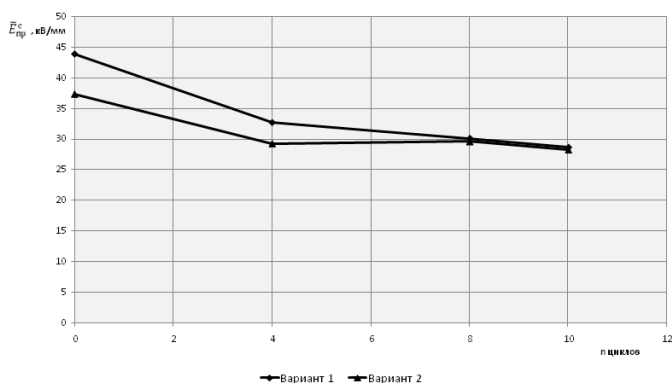


Рис. 5. Зависимость электрической прочности систем изоляции от объема испытаний (сухое состояние)

Анализ результатов испытаний показывает следующее:

1) Системы изоляции в исходном состоянии и в процессе испытаний имеют достаточно близкие характеристики (R ; $tg\delta$) и расчетные показатели ($\bar{\rho}$; $\bar{\mu}$), оцениваемые неразрушающими методами. При этом $tg\delta$ 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:

- вариант 1 – 34,6 %;
- вариант 2 – 24,0 %.

Проведены сравнительные испытания по оценке длительной электрической прочности слюдинитовых лент Элмикатерм 529049 и 529029.

Испытания выполнялись при температуре $(180\pm 3)^\circ\text{C}$ и трех значениях испытательных напряжений, равных $0,5U_{пр}$, $0,3U_{пр}$ и $0,25U_{пр}$ ($U_{пр}$ – минимальное из средних значений пробивных напряжений лент).

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

После достижения температуры $(180\pm 3)^\circ\text{C}$ 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

Длительная электрической прочности лент

Испытательное напряжение, кВ	Время до пробоя, мин	
	Элмикатерм 529049 с полиэфиркетоновой пленкой АРТIV	Элмикатерм 529029 с полиимидной пленкой
$0,5U_{пр}=3,41$	68; 72; 85; 117; 121; 127	102; 116; 124; 125; 131; 139
Среднее значение	124	135
$0,3U_{пр}=2,05$	254; 287; 317; 387; 397; 429	321; 356; 405; 415; 489; 495
Среднее значение	413	492
$0,25U_{пр}=1,70$	530; 657; 681; 775; 790; 915	765; 816; 817; 928; 932; 1016
Среднее значение	852,8	974

ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

1 Ускоренные испытания в объеме эквивалентном 20000 часов воздействия температуры класса нагревостойкости Н(180°C) и расчетного рабочего напряжения 1 кВ показали, что система изоляции на основе ленты Элмикатерм 529049, содержащей в качестве полимерной подложки полиэфиркетоновую пленку «АРТIV», по всем контролируемым показателям практически не уступает системе изоляции с лентой Элмикатерм 529029, в конструкции которой традиционно использована полиимидная пленка.

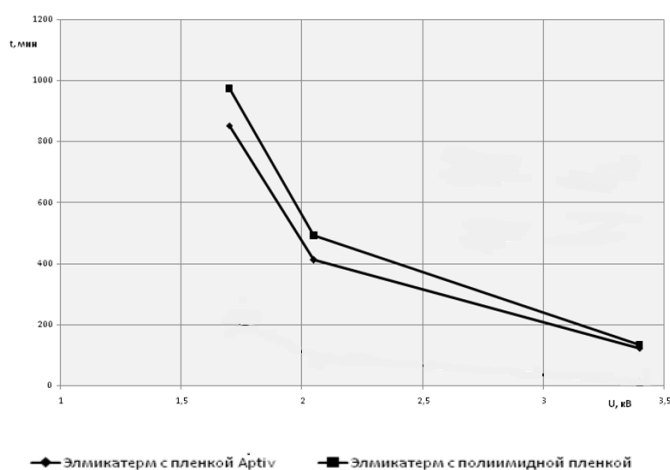


Рис. 6. Зависимости длительной электрической прочности лент от напряжения

2 Длительная электрическая прочность ленты Элмикатерм 529049, содержащей полиэфиракетоновую пленку «АРТIV» незначительно ниже, чем у ленты Элмикатерм 529029 с полиимидной пленкой. При испытательных напряжениях $0,5U_{пр}$; $0,3U_{пр}$ и $0,25U_{пр}$, указанное отличие составляет в среднем 8; 16 и 12 %, соответственно.

Лента Элмикатерм 529049 с полимерной подложкой из полиэфиракетоновой пленкой АРТIV может рассматриваться как адекватная замена ленты Элмикатерм 529029 с полиимидной пленкой в системах изоляции класса Н(180°C).

ЛИТЕРАТУРА

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°C) на основе материалов производства ОАО «ХК Элинар» // Электротехника. 2009. №3 С. 44-47.

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

3. Пак В.М., Трубочев С.Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. / под ред. В.М. Пака. – М.: Энергоатомиздат, 2007.

4. В.Г. Огоньков и др. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 / под ред. В.Г. Огонькова, С.В. Серебрянникова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

DOI: 10.24892/RIJE/20230404

Results of Comparative Resource Tests of Insulation Systems of Heat Resistance Class H (180 °C) of Traction Engines of Electric Locomotives Using Polyetherketone and Polyimide Films

Papkov A., Luchko D.
Elinar Holding Company LLC
Naro-Fominsk, Russian Federation
papkov@elinar.ru, luchko@elinar.ru

Abstract. Short description of the insulation systems of traction motors of the class of heat resistance H (180 °C) based on polyetherketone and polyimide films is given. The methods and main results of resource tests of various insulation systems are presented.

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

Библиографическое описание статьи

Папков А.В. Результаты сравнительных ресурсных испытаний систем изоляции класса нагревостойкости Н (180°C) тяговых двигателей электровозов с использованием полиэфиракетоновой и полиимидной пленок / А.В. Папков, Д.В. Лучко // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т.10, №4. – С. 17-21. DOI: 10.24892/RIJE/20230404

Reference to article

Papkov A., Luchko D. Results of comparative resource tests of insulation systems of heat resistance class H (180 °C) of traction engines of electric locomotives using polyetherketone and polyimide films, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2023, vol.10, no.4, pp. 17-21. DOI: 10.24892/RIJE/20230404