

**Факторы,  
определяющие оптимальный выбор электроизоляционных материалов (ЭИМ),  
для создания систем изоляции электрических машин.**

Все основные физические свойства электроизоляционных материалов (ЭИМ) зависят от их химического строения. В конечном итоге система изоляции электрических машин должна быть термостойкой, монолитной, влагостойкой, вибростойкой и при этом иметь максимально возможную теплопроводность, т.к. функциональные обязанности системы изоляции это максимально исключить возможность утечки электрического тока на землю из проводников катушек магнитной системы, которые этим электрическим током из-за наличия в них сопротивления нагреваются и возникающее тепло необходимо отводить во внешнюю среду. Слои электрической изоляции (витковой, корпусной, пазовой) наряду с тем, что они препятствуют прохождению электрического тока на землю, еще и являются преградой для удаления возникающего тепла от проводника из-за того, что их теплопроводность значительно меньше теплопроводности проводника.

Проводя испытания на определение зависимости основных показателей ЭИМ ( $R_{\text{изол}}$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $U_{\text{пр}}$ ) от величины разогрева этих ЭИМ (См. приложения) мы видим:

1) Резкое падение диэлектрических показателей от величины температуры. При температурах  $160^{\circ}\text{C}$  и выше многие диэлектрики практически теряют свои диэлектрические параметры до уровня когда этот материал уже не может называться электроизоляционным, т.к.  $R_{\text{изол}}$  падает до уровня ниже  $10^6$  Ом, а ток утечки  $\text{tg}\delta$  растет свыше 50%.

2) Полимер связующего теряет свои цементирующие свойства, что определяет виброустойчивость систем изоляции. При потери цементации происходит биение катушек в пазах и это быстро разрушает слои изоляции.

Очень большое значение имеет полнота (степень) отверждения полимера связующего и температура начала термодеструкции полимера. Полимер должен быть в стадии 100% отверждения. При этом температура разогрева катушек при экстремальных моментах в эксплуатации должна быть однозначно ниже температуры начала термодеструкции этого полимера, т.к. иначе влага заняв место разрушенного быстро приведет к снижению сопротивления изоляции ( $R_{\text{изол}}$ ) до недопустимого уровня, что определит пробой этой изоляции. Исходя из реального опыта эксплуатации мы видим, что температура разогрева катушек, например ТЭД локомотивов при экстремальных моментах достигает  $200^{\circ}\text{C}$  и выше. Это определяет то, что производя выбор ЭИМ и пропиточных составов следует проверять сохранение диэлектрических параметров этих ЭИМ при температуре не менее  $200^{\circ}\text{C}$ .

**Основные отечественные компаунды по состоянию на 2020 год:**

**1). ПК—11, ПК —21 2). КП — 303Н 3). Элпласт — 155 (180,220)**

1). ПК-11, ПК-21, — это эпоксидные компаунды. В качестве основных компонентов мы имеем простую смесь эпоксидной смолы ЭД — 20 с ангидридом (для ПК-11 изо-метилтетрагидрофталевый ангидрид, а для ПК-21 эндиковый ангидрид) в соотношении эпоксидная смола: ангидрид = практически 1:1.

2). КП-303Н. В случае КП-303Н имеет место место процесс уваривания одной молекулы эпоксидной смолы ЭД-20 с двумя молекулами метакриловой кислоты, т.е. идет синтез олигомера обладающего повышенной молекулярной массой. Олигомер полностью замещает свободную эпоксидную смолу и ангидрид. Состав имеет высокую реакционную способность, длительный срок хранения, отсутствие аллергенности и повышенную эластичность, что определяет его влагостойкость и вибростойкость.

3). Элпласт -155 (180, 220)

Это изоциануратимидный пропиточный состав. В составе содержится порядка 30% изоцианата. Изоцианаты вызывают раздражение кожи и слизистых оболочек. При этом воздействие на кожу колеблется от местного зуда до экземы. Возможны заболевания глаз, слезоточивость.

Что касается ангидридных ПК-11 и ПК-21, то это большая опасность от паров ангидрида для здоровья людей и оборудования. Европа с 2005 года отказалась от этого варианта. Там, где применяют этот вариант, принимают очень серьезные меры по защите людей и оборудования. Ангидрид активно летит (испаряется) при вакууме разряжением около 20 Мбар. (при 1Мбара его

испаряется до 30%).

**Это страшно вредно.** Для людей это — поражение легких, а для технологий это:

- Портится масло вакуум — насосов, что определяет необходимость периодической его замены 1-2 раза в месяц.
- Приходят в негодность эластичные герметизирующие прокладки автоклава - становятся хрупкими в течении 5-6 месяцев работы.

Реакционноспособность ПК-11 и ПК-21 — невысокая. Для полного отверждения слоя изоляции толщиной 1 мм требуется порядка 16 час при  $T=160^{\circ}\text{C}$ . В случае пропитки КП-303Н отверждение происходит в течении не более 2 часов в тех же условиях.

Качественные характеристики (степень сшивки и др.) полимеров ПК-11 и ПК-21 получаются только при введении ускорителя реакции-октаата цинка. Этот ускоритель можно ввести только в составе сухих стеклослюдолент. Это в свою очередь определяет, что :

- фактически ПК-11 и ПК-21 являются двухкомпонентными составами.

- для введения второго компонента октаата цинка, находящегося в составе сухих лент, требуется технологическое оборудование — вакуум — нагнетательные установки, которые должны обеспечить возможность создания условий для глубокой пропитки изоляции (глубокого вакуума (порядка 1 Мбар)). А это определяет испарение ангидрида!

- низкая технологичность работ по наложению витковой и корпусной изоляции из сухих лент, по сравнению с пропитанными. Сухие ленты плохо утягиваются и пылят. Летит слюдяная пыль!

Следует внимательно оценивать возможные разогревы узлов электрических машин в процессе эксплуатации, т. к. возможна термодеструкция полимера связующего. Температура начала деструкции полимеров, позволяет прогнозировать срок службы изоляции (ресурс). Эта температура проверялась на образцах соответствующих полимеров в институте физической химии и электрохимии им. Фрумкина А.Н., РАН.

Результаты испытаний: ПК — 11 —  $178^{\circ}\text{C}$

ПК — 21 —  $175^{\circ}\text{C}$

КП — 303Н —  $236^{\circ}\text{C}$

Элпласт — 155 (180, 220) —  $212^{\circ}\text{C}$

**Основные отечественные марки стеклослюдолент по состоянию на 2010 год следующие:**

**1).Элмикатерм (52409, 524019, 524099, 54409, 54419, 544099, 55409)**

Цифры обозначают:

на 1 месте — назначение: (всегда 5 — ленточный материал)

на 2 месте — тип слюдяной бумаги: (2 — мусковит кальцинированный);

(3 — мусковит не кальцинированный);

(4 — флогопит не кальцинированный);

(5 — мусковит + флогопит).

на 3 месте — тип связующего (4 — эпоксидное связующее)

на 4 месте — тип модификации связующего (0 — не модифицированное)

На 5,6 месте — обозначение подложек: (1 — пленка лавсановая ПЭН);

(2 — пленка полиимидная ПМА);

(9 — стеклоткань)

В составе связующего указанных стеклослюдолент неотвержденная эпоксидная смола составляет порядка 30%. Это определяет для здоровья людей следующие сюрпризы:

- повреждение кожи;

- аллергические реакции;

- повреждение роговицы глаз и слепота;

- токсическое отравление;

- термические ожоги.

**2). Элизтермы — 155 (180,220)**

В составе связующего стеклослюдолент содержится порядка 30% **изоцианата**. Изоцианаты вызывают раздражение кожи и слизистых оболочек.

### 3). ЛСп-Ф/Н/С – ТПл

В составе связующего полностью отсутствуют изоцианат и свободная эпоксидная смола. Связующее представляет собой олигоэфиракрилат, в котором растворен **олигомер**, полученный в результате синтеза эпоксидной смолы с метакриловой кислотой. Это уже практически **полностью безаллергенный продукт**.

При этом за счет олигомера в изоляции:

**1. Повышается стойкость полимера к воздействию температур до 230<sup>0</sup>С, что определяет и влагостойкость системы изоляции электрических машин в эксплуатации.**

**2. Появляется эластичность отвержденного полимера, что гарантированно обеспечивает вибростойкость системы изоляции электрических машин в эксплуатации.**

Результаты научно-исследовательских работ выполненных в ООО «НИИЦЭИМ» и АНО «Тест Сертификат» по определению влияния на диэлектрические параметры Систем изоляции температуры и напряжения даны в приложениях в виде графиков. Анализ этих графиков определил основные технические требования к ЭИМ:

#### **Технические требования к ЭИМ и систем изоляции на их основе:**

1) Общие требования к видам изоляции электрических машин

Таблица 1

Наименование видов изоляции узлов электрических машин	Требования к надежности изоляции	Примечание
1 <b>Витковая</b> изоляция проводников катушек якоря или магнитной системы статора (остова)	1. Должна выдерживать без разрушения изгибы при формировании катушек. 2. Иметь структурный состав, позволяющий выдерживать воздействие возникающих частичных разрядов (ЧР) и возможные перенапряжения, в т.ч за счет наложения градиентов напряжения в асинхронных электрических машинах с частотно-регулируемым приводом (ЧРП)	В случае применения обмоточных проводов роль <b>витковой</b> изоляции выполняет изоляция обмоточного провода.
2. <b>Корпусная</b> изоляция	1. Монолитность 2. Теплопроводность 3. Малый ток утечки при температурах заданного класса нагревостойкости	
3. <b>Пазовая</b> изоляция	1. Механическая прочность 2. Теплопроводность	

Положение настоящих технических требований должны учитываться при разработке, проектировании и изготовлении систем изоляции обмоток электрических локомотивов, предназначенных для работ от:

- источников постоянного тока;
- синусоидальных источников питания , в т.ч. от преобразователей частоты ( инверторов напряжения).

2. Все электроизоляционные материалы (стеклослюдоленты, пропиточные составы, эмали, гибкие слюдиниты или пленочная изоляция пазов и обмоточных проводов) должны соответствовать требованиям указанным в таблице 2.

Таблица 2

Наименование параметра	Показатели, подтверждающие параметры	Допустимый уровень показателей. Методики определения.
1. Исходные диэлектрические параметры ЭИМ в нормальных	1). Сопротивление изоляции 2). Диэлектрические потери	$R_{\text{изол}} \geq 500 \text{МОм}$ $\text{tg} \delta \leq 3\%$

условиях		ГОСТ 6433.4-71
2. Нагревостойкость ЭИМ и полимера образующих СИ	<p>1). ТГИ — термогравиметрический индекс, определяющий температуру начала термодеструкции полимера пропиточного состава</p> <p>2). Диэлектрические потери в ЭИМ и полимере при T<sup>0</sup>C заданного класса нагревостойкости</p> <p>3). Электрическое сопротивление ЭИМ и полимера при T<sup>0</sup>C заданного класса нагревостойкости</p> <p>4). Цементация пропиточного состава</p>	<p>T<sup>0</sup>C дестр &gt; T<sup>0</sup>C заданного класса нагревостойкости ГОСТ 29127-91</p> <p>tgδ ≤ 30% ГОСТ 6433.4-71</p> <p>R<sub>изол</sub> &gt; 10МОм ГОСТ 6433.2-71</p> <p>При: T= 20<sup>0</sup>C - ≤650Н T<sup>0</sup>C зад. кл. нагрев - ≥ 50Н</p>
3. Теплопроводность	1). Коэффициент теплопроводности ЭИМ (стеклослюдолент, гибких слюдинитов и т.п)	λ ≥ 0,45 Вт/м· <sup>0</sup> К ГОСТ 7076-99
4. Стойкость СИ к механическим воздействиям и окружающей среды	<p>1). Стойкость к термоударам СИ</p> <p>2). Виброустойчивость и ударам СИ</p> <p>3). Влагоустойчивость СИ</p> <p>4). Химическая стойкость СИ</p>	<p>R<sub>изол</sub> при : T=60<sup>0</sup>C ≥ 100МОм T<sup>0</sup>C зад.кл. Нагрев - ≥ 10МОм</p> <p>R<sub>изол</sub> в конце испытаний &gt; 100МОм ГОСТ 16962-71</p> <p>R<sub>изол</sub> в конце испытаний &gt; 10МОм ГОСТ 16962-71</p> <p>R<sub>изол</sub> в конце испытаний &gt; 10МОм В соответствии с ТУ на конкретный тип двигателя</p>
5. Стойкость изоляции обмоточных проводов к воздействию частичных разрядов	1). Интенсивность ЧР при расчетной напряженности электрического поля E ≤ 5 кВ/мм и температуре <sup>0</sup> C заданного класса нагревостойкости	≤ 2000 пКл МЭК 60270 ГОСТ 20074-83

Выполнение указанных в Таблице 1 требований, гарантированно обеспечивает рабочий ресурс системы изоляции не менее 50000 часов по методике определения заложенной в ГОСТ 10518-88,

Специалисты ООО «НИИЦЭИМ» и ПАО «НИПТИЭМ» оформили соответствующий документ - ВАКИ 520055.090ТТ. (См. приложение №9)

Последующая оценка соответствия этим ВАКИ 520055.090ТТ наиболее известных отечественных ЭИМ, произведенная специалистами ООО «Тест-Сертификат» (См. приложение №10) показала, что далеко не все применяемые ЭИМ соответствуют этим Техническим Требованиям, что и определяет серьезные потери электрических машин в эксплуатации в частности в АО «РЖД» свыше 10 тыс.

**При этом там где были применены ЭИМ строго соответствующие этим Техническим Требованиям было получено подтверждение правильности сделанных выводов.**

Например:

1). Электрические машины ТАДВМ-280-4У2. Начиная с 2012 года их изготовлено «ВЭМЗ» (г. Владимир) более 1000 шт, которые работают до настоящего времени в метрополитене в качестве привода вагонов серии 81-760/761 «ОКА» без единого замечания к системе изоляции.

2). Подобный вывод следует и из прилагаемых отзывов «ТЭВЗ» (г. Тбилиси) и «АТРЗ» (г. Казахстан) и др. (г. Даугавпилс, Узбекистан) (См. приложение №№ 11, 12)

**Там же где были проигнорированы ВАКИ 520055.090 ТТ**, например, на заводах производящих новые ТЭД локомотивов (ООО «НЭВЗ», ЗАО «ПТФК «ЗТЭО») или производивших их капитальный ремонт (КР) (заводы АО «ТМХ-С», Группа «Синара») судя по итогам ежегодных мониторингов выхода из строя ТЭД положение остается крайне тяжелым.

Ежегодный выход из строя составляет свыше 10 тыс. шт ТЭД. **Это приводит к миллиардным прямым убыткам**, не считая упущенной выгоды от невыполнимой работы. И главная причина — пробой систем изоляции. Все это происходит из-за того, что отсутствует соответствующая корректировка конструкторской документации и свыше 80% используется не соответствующих ЭИМ.

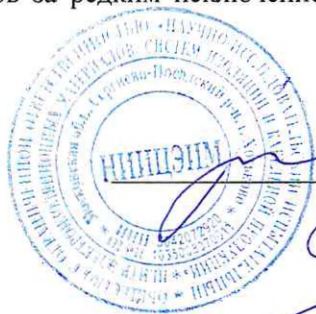
При этом следует учесть, что технологический цикл изготовления системы изоляции этой электрической машины является самым малым по времени из подобных, что определяет и более низкую себестоимость изготовления системы изоляции, т.к. уровень цен на ЭИМ соответствующего качества у различных отечественных производителей практически одинаков за редким исключением, а энерго-трудозатраты в разы ниже.

Технический директор  
ООО «НИИЦЭИМ»

Главный конструктор  
ООО «РУСЭЛПРОМ»,  
д.т.н. заслуженный энергетик РФ

Генеральный директор  
«Тест — Сертификат»,  
профессор МЭИ,  
д.т.н. со специализацией ЭИМ и кабели

Профессор МЭИ, д.т.н. со специализацией эл. машин



В.В. Прохоров

Л.Н. Макаров

М.А. Боев

В.Я. Беспалов