

Критерии, определяющие выбор ЭИМ и технологий создания систем изоляции электрических машин постоянного и переменного тока



Генеральный директор
ЗАО «Диэлектрик»
ПРОХОРОВ В.В.

Оценка качественных характеристик систем изоляции электрических машин должна производиться путём замера конкретных показателей в условиях реально работающей под максимальной нагрузкой электрической машины, т. е. при наличии температур возможного перегрева узлов машины (катушек магнитной системы, секций якоря и т. п.) до 2000С и возможных скачков напряжения в сети. Подход должен быть с точки зрения теории химии и физики диэлектриков. (Материалы кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК), Московский Энергетический Институт) [1].

Учитывая, что система изоляции, например для тяговых элек-

тродвигателей (ТЭД), представляет собой запеченную в монолит композицию из нескольких различных электроизоляционных материалов, оценку ожидаемых конечных результатов можно делать с определенным приближением через оценку свойств конкретных электроизоляционных материалов (ЭИМ).

ЧТО ТАКОЕ ДИЭЛЕКТРИК?

Это материал, обладающий химическим строением, которое препятствует прохождению электрического тока под воздействием электрического напряжения, т. е. в его структуре практически отсутствуют свободные носители заряда (электроны, ионы, и др.). Тот минимум, который все же есть определяет ток сквозной проводимости ($J_{скв}$), который возникает под воздействием внешнего электрического поля. Это одно из составляющих тока утечки ($J_{ут}$).

С точки зрения электротехники все материал можно разделить на 3-и группы:

1. проводники – материалы с сопротивлением изоляции менее 1 Ом
2. полупроводники – материалы с сопротивлением изоляции от 1 Ом до 1 МОм

3. диэлектрики – материалы с сопротивлением изоляции свыше 1МОм

Химическое строение диэлектрика определяет величину энергии внутримолекулярных связей, и зависимость его свойств от температуры.

Диэлектрик состоит из молекул. Молекула обладает **электрическим моментом**. Под воздействием внешнего электрического поля происходит ориентация (поворот) молекулы. В случае постоянного электрического напряжения это происходит в момент включения и выключения электрического поля.

В случае переменного электрического напряжения молекула ведет себя соответственно частоте знакопеременного напряжения. Это определяет появление тока абсорбции ($J_{абс}$), который является вторым составляющим тока утечки ($J_{ут}$). Молекула в свою очередь состоит из атомов.



Строение атома – это **ядро с электронами на орбите**.

Опять же под воздействием электрического поля происходит смещение электронов в сторону направленности электрического поля.

Это определяет чисто емкостной ток, который также входит в состав тока утечки ($J_{ут}$).

Зависимость $J_{скв}$ и $J_{абс}$ от температуры велика, т. к. при повышении температуры резко увеличивается подвижность молекул и снижается сила межмолекулярных связей, уменьшается энергия отрыва электронов с их орбит и появляются дополнительные носители зарядов (электроны, ионы, дырки и т. п.). Идет увеличение составляющих тока утечки.

Тепловой баланс электрической машины должен обеспечивать условие, когда образующая за счет потерь тепловая мощность должна быть меньше отводимой, т.е

$$P_{обр.} < P_{отв.}$$

При этом разогрев работающей электрической машины происходит:

1. за счет потерь в проводнике, из-за наличия определенного омического сопротивления проводника и
2. за счет потерь в изоляции, из-за наличия тока утечки ($J_{ут}$) т.е.

$$P_{обр.} = P_{пр.} + P_{из}$$

При расчетах конструкции электрических машин мощность потерь в проводнике учитывается, а потери в изоляции не учитываются.

Это категорически недопустимо, т.к. потери в изоляции, работающей электрической машины и разогретой до температуры порядка 200 °С, **могут превысить критический уровень**, что может привести к **тепловому пробую** и создает условия для **самовоспламенения**. Необходимо определить критерий ЭИМ, который гарантированно позволят обеспечить возможность их применения в диапазоне температур свыше 200 °С. Этим критерием является $tg \delta$.

$$P_{изол} = U^2 \cdot tg \delta \cdot C_x \cdot 2\omega f$$

Рассмотрим физический смысл определений:

1. Токов утечки

$$J_{ут.} = J_{см.} + J_{абс.} + J_{скв.}$$

2. Тангенса угла диэлектрических потерь (рис. 1)

$$tg \delta = J_a / J_p$$

$J_{скв}$ – ток сквозной проводимости – **основная причина тепловых потерь** и обусловлен наличием в диэлектрике свободных носителей зарядов.

$J_{см}$ – ток смещения – вызван процессами быстрой поляризации за счет смещения электронов на орбите по направлению внешнего поля. Это чисто емкостной ток, **не вызывающий тепловых потерь**.

$J_{абс}$ – ток абсорбции – вызван процессами поляризации из-за ориентации векторного поля молекулы по направлению внешнего поля. В электромагнитном поле постоянного тока влияние $J_{абс}$ на тепловые **потери** оказывает только в момент **включения и выключения**, в электромагнитном поле переменного тока – **это основная причина тепловых потерь (наряду с $J_{скв}$), а также причина старения, разрушения изоляции и возникновения частичных разрядов**.

ЭИМ для систем изоляции электрических машин переменного тока следует оценивать дополнительно по такому показателю, как **стойкость к воздействию частичных разрядов (ЧР)**.

Физическая сущность этого показателя заключается в том, что в диэлектрике под воздействием внешнего знакопеременного электрического поля **идет знакопеременная поляризация молекул**, в отличие от поляризации постоянного электрического поля, где влияние процесса поляризации сказывается только в моменты включения и выключения электрической маши-

Какими качественными критериями следует оценивать систему изоляции (СИ) электрических машин:

1. Ток утечки ($J_{ут}$)	характеризуется $tg \delta$ и определяет $R_{изол}$. Имеет большую зависимость от T °С.
2. Цементация	определяет устойчивость системы изоляции к механическим нагрузкам в виде вибрации. Имеет большую зависимость от T °С.
3. Стойкость к термоударам	определяет устойчивость системы изоляции к термоусадкам и терморасширениям.
4. Начало деструкции полимера	оценивается термогравиметрическим индексом (ТГИ), определяющим температуру начало активной потери массы.
5. Стойкостью к воздействию частичных разрядов (ЧР)	оценивается напряженностью электрического поля в диэлектрике под воздействием, которой в условиях температур заданного класса нагревостойкости возникают частичные разряды (ЧР).
6. Теплопроводностью	оценивается теплопроводностью ЭИМ составляющих СИ.

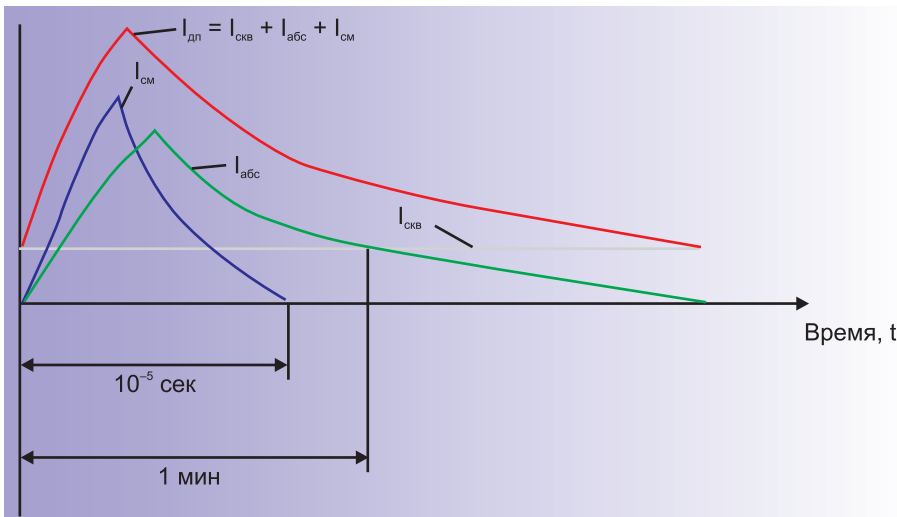


Рис 1. Поведение тока диэлектрических потерь ($J_{дп}$) в зависимости от времени приложения постоянного напряжения к диэлектрику

ны. При этом диэлектрик состоит из множества молекул, которые образуют сегменты. Поведение молекул и сегментов в электрическом поле определяется величиной их электрического момента. **Из-за неоднородности** молекулярной массы сегментов появляются точки, имеющие различные электрические потенциалы и при этом находящиеся в непосредственной близости. Расстояние между ними определяется молекулярными величинами – ангстремами. При достижении определенных величин потенциалов, происходит **разряд**, который мы называем **частичным разрядом**. Воздействие на молекулу знакопеременных электромагнитных волн раскачивает молекулу с частотой напряжения электрического поля и приводит к **разрушению полимера**. Появляются условия для образования **лавинных частичных разрядов**, а это приводит к местным **прогарам** изоляции и **электрическому пробое** (рис. 2).

Образующееся тепло в электрической машине необходимо удалить и это определяет **условия и требова-**

ния к конструкции электрической машины и применяемым материалам.

$$P_{отв} = \lambda \cdot S/h \cdot (T_2 - T_1),$$

где λ – коэффициент теплопроводности изоляционного слоя, состоящего из комплекса материалов (стеклоткань+слюдяная бумага+пленки+связующее);

S – площадь поверхности, с которой необходимо обеспечить отвод тепла;

h – толщина изоляционного слоя;
 T_2 – температура разогрева в изоляционном слое;
 T_1 – температура окружающей среды.

ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ (ЧРП)

ЧРП – это значит наличие метода широтно – импульсной модуляции (ШИМ). Это значит быстрое изменение напряжения, которое приводит к появлению высоковольтных градиентов напряжения в проводнике, которые воздействуют на изоляцию проводников и обмоток двигателя. **Эти импульсные перенапряжения могут быть в 2-3 раза выше номинального, что приводит к возникновению частичных разрядов (ЧР) и пробое изоляции.**

Появление двигателей с ЧРП привело к **проблеме**, которая до настоящего времени, в нашей промышленности вызывает непонимание и **недооценена**.

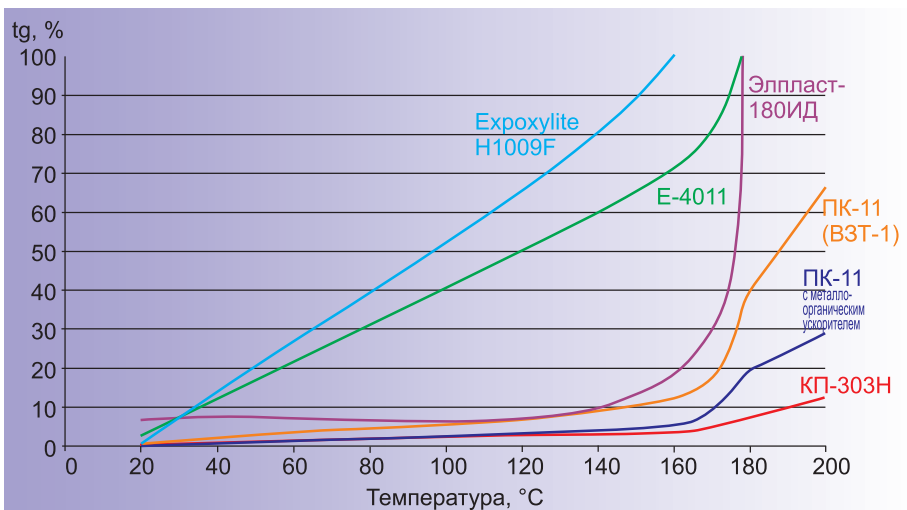


Рис 2. График зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для различных пропитывающих составов (испытания проводились на дисках толщиной 1 мм, все диски запекались при температуре 160 °C в течение 16 часов)

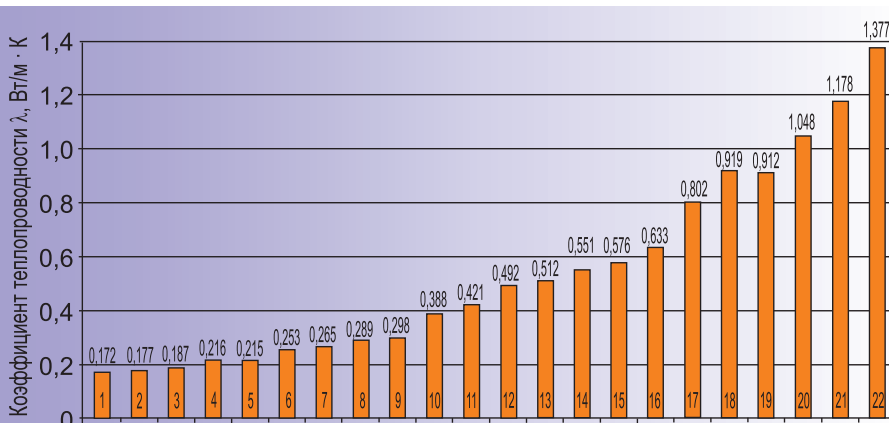


Рис. 3. Теплопроводность электроизоляционных материалов (оценочно)
(зондовый метод по ГОСТ 30256-94 с помощью измерителя теплопроводности «МИТ-1» ТУ 4211-001-302531012-02; св. о проверке №8246 от 02.02.09 ФГУ ЧЦСМ; основная относительная погрешность измерения ±7%):

- 1 – стеклоткань Э4-30П; 2 – компаунд эпокс. ПК-11; 3 – компаунд Элпласт-180ИД-А; 4 – компаунд КП-303Б; 5 – теонофлекс-393; 6 – имидофлекс-292; 7 – изофлекс-151; 8 – пленки ПЭТ и ПЭН (теонекс); 9 – теонофлекс-191; 10 – лента Эдизтерм-155ТПл + Эллапласт 180ИД (40%); 11 – лента ЛСК-Т + КП-303 (38%); 12 – ГСП-Н-Пл; 13 – лента Лсп-Н-ТТ т. 0.2 (связь-21%); 14 – лента Лсп-Ф-Тпл т. 0.1 (связь-18%); 15 – лента ЛСК-Т т. 0.12 (связь-15%); 16 – ГСП-Ф-Пл; 17 – слюдопласт коллекторный КИФЭ-Н; 18 – мастика МКП-303; 19 – кальцинир. мусковит Мамско-Чуйск, Элмика 2120; 20 – некальцинир. флогопит Мамагаскар, М-80; 21 – некальцинир. мусковит Мадагаскар, F-80; 22 – некальцинир. флогопит Мадагаскар, F-80

Увеличение стресса на изоляцию из-за импульсных напряжений приводит к выходу из строя двигателей. **Стрессы возникают из-за взаимодействия быстрорастущих импульсов напряжения в приводе и эффектов наложения этих импульсов в кабеле.** Они зависят от частоты импульса и времени роста напряжения в инверторе, длины кабеля и конструкции статорных обмоток. Время нарастания импульсов очень мало. Это всего лишь **0,25-1 мкс.** Пока импульс идет по кабелю к двигателю происходит изменение формы импульса от наложения догоняющих импульсов и это приводит к возникновению градиента напряжения.

Из-за этого эффекта на зажимах двигателя возникает увеличение напряжения до 2-х раз выше, чем на выходе с инвертора. Ко всему про-

чему, распространение напряжения в обмотках двигателя зависит от параметров двигателя и обмоток.

На **межфазную** систему изоляции и **между фазой и землей** это явление имеет слабое воздействие,

так как там присутствует изоляция с большим запасом электрической прочности, а вот на **межвитковую изоляцию оказывает сильнейшее воздействие**, т.к. потенциал **напряжения между витками**, особенно между всыпными проводниками, может **достигать значений напряжения равного рабочему напряжению двигателя**, что соответствует величинам напряжения вызывающим частичные разряды (см. табл. 1), а изоляция **витковая** рассчитана по принципу электрических машин постоянного тока, т.е. из расчета, что напряжение между витками меньше рабочего в разы, определяющиеся количеством витков.

В табл. 1 собраны данные Von Roll Izola об импульсных напряжениях возникающих в двигателях, работающих с ЧРП.

Напряжение возникновения частичных разрядов (PDIV) на различных проводниках по данным Von Roll Izola выглядит как показано в табл. 2.

Это определяет необходимость выбора изоляции обмоточных проводов, обеспечивающей:

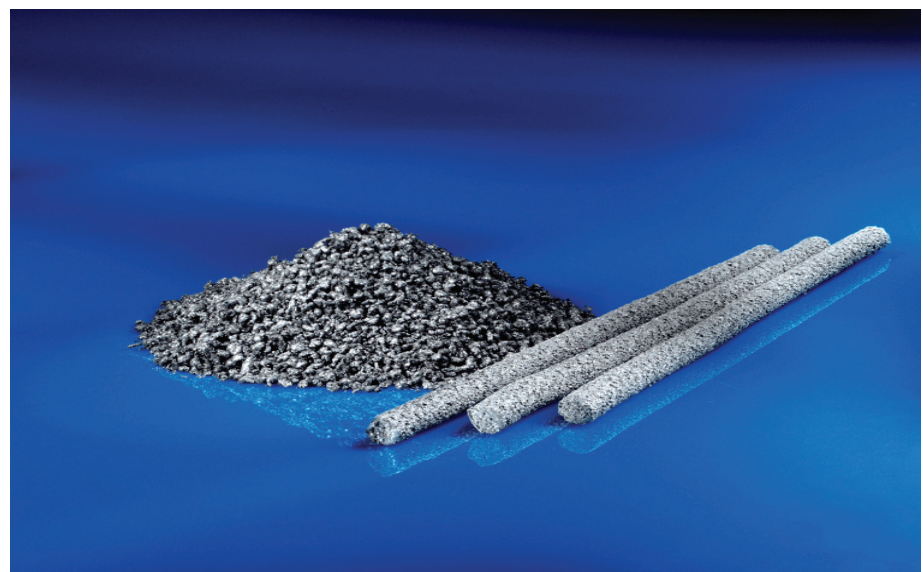


Таблица 1. данные Von Roll Izola об импульсных напряжениях возникающих в двигателях, работающих с ЧПП

	Фактор импульсного перенапряжения	Импульсное напряжение		
		$U_N = 400 \text{ В}$	$U_N = 575 \text{ В}$	$U_N = 690 \text{ В}$
		$U_d = 565 \text{ В}$	$U_d = 815 \text{ В}$	$U_d = 975 \text{ В}$
Фаза – Земля	$2.0 \cdot U_d$	1130 В	1630 В	1950 В
Фаза – Фаза	$2.3 \cdot U_d$	1300 В	1870 В	2240 В
Проводник – Проводник	$(0.4...0.7) \cdot 2.0 U_d$	450...790 В	650...1140 В	780...1365 В

U_N = номинальное напряжение, $U_d = \sqrt{2} \cdot U_N$



1 группа - провода с эмалевой изоляцией:

1) стандартные: – ПЭТВ СД
– ПЭТ2 - 200

2) новая разработка – с покрытием полиимидной эмалью

2 группа - провода с пленочной изоляцией:



Таблица 2. Напряжение возникновения частичных разрядов (PDIV) на различных проводниках по данным Von Roll Izola

Провод	(PDIV)
Эмалированный провод grade 2(ПЭТ2)	830 В
Всыпной эмалированный провод	790...940 В
SamicaShield®провод	1270 В
SamicaShield®провод пропитанный (3340)	1890 В

1. Уровень начала возникновения частичных разрядов (PDIV) более высокий, чем уровень напряжения электрического поля действующего на изоляцию при рабочем напряжении на зажимах двигателя с учетом возникающих импульсных перенапряжений.

2. Стойкость изоляции к воздействию частичных разрядов.

Специалисты ЗАО «Диэлектрик» провели ряд испытаний имеющихся отечественных обмоточных проводов в своем испытательном центре ОАО «НИ-ИЦЭИМ». Для испытаний определили три группы обмоточных проводов:

1) стандартные:

ППИК-Т, изолированные полиимидфторопластовой пленкой

ППИК-2, изолированные коронстойкой полиимидфторопластовой пленкой фирмы Дюпон.

3 группа - провода со слюдосодержащей изоляцией:



1) стандартная

– ППЛС т.0,47 мм (изоляцией Ка-ластик)

2) новые разработки:

Таблица 2. Результаты испытаний

Наименование, обмоточные провода	Толщина изоляции х 2(мм)	U _{пр} между двумя проводами (кВ)	Выход из строя, % / час			
			1680 В	3000 В	4500 В	10 000 В
1 группа	0,24	11	100/48	–	–	–
1.1. ПЭТВ СД						
1.2. ПЭТ2 – 200	0,07	9,2	50/69	100/75	–	–
1.3. с покрытием полиимидной эмалью	0,24	12	100/2	–	–	–
2 группа	0,36	27	100/134	100/100	–	–
2.1. ППИПК – Т						
2.2. ППИПК – 2	0,68	35	0/1989	0/2300	–	–
3 группа	0,47	19	0/70	0/70	–	–
3.1. ППЛС т. 0,47 мм						
3.2. ППФК т. 0,36 мм						
ЛЭФ-ПЭТ	0,36	7,8	100/149	–	–	–
ЛСК-Т	0,36	3,8	77/2751	–	–	–
ЛСК-Т-ПЭТ	0,38	6,0	0/1481	100/162	–	–
ЛСК-Т-ПМ	0,36	17	–	100/83	–	–
Микасил	0,32	15	–	0/338	0/474	–
3.3. ППФК т. 0,65 мм						
Микасил	0,65	38	–	–	–	0/355
3.4. ППФК т. 0,64 мм						
Лсп-Н-ТПл	0,64	30	–	–	–	0/100

– **ППФК** т. 0,36 мм с изоляцией, наложенной на проводник, 1 слой в 1/2 нахлеста из ЭИМ:

- **ЛЭФ – ПЭТ**
- **ЛСК – Т**
- **ЛСК – Т – ПЭТ**
- **ЛСК – Т – ПМ**
- **Микасил 0,08**

– **ППФК** т. 0,65 мм с изоляцией, наложенной на проводник 2 слоя в 1/2 нахлеста из ЭИМ:

- **Микасил 0,08**

– **ППФК** т. 0,64 (с изоляцией, наложенной на проводник, 2 слоя в 1/2 нахлеста из ЭИМ:

- **Лсп-Н-ТПл 0,08**

Испытательное напряжение было задано частотой 50 Гц в номинальных значениях:

- 1680 В – 3000В – 4500 В – 10 000 В.
- Температурный режимный –

температура окружающей среды (20–30 °С)

Результаты текущих испытаний сведены в табл. 2.

По данным текущих испытаний следует, что к короностойким вариантам изоляции относятся варианты:

- 1 группа – 0
2. группа – 1) ППИПК – 2
3. группа – 1) ППЛС
- 2) ППФК на вариантах изоляции:
 1. Микасил
 2. Лсп-Н-ТПл

Провода **ППФК** с изоляцией **Микасил** и **Лсп-Н-ТПл** толщиной изоляции 0,65 мм и 0,64 мм подвергли испытанием переменным напряжением 10 кВ частотой 50 Гц. Изоляция выдержала испытания согласно данным таблицы и в настоящее время испытания продолжаются.

Провода **ППЛС** подвергать дальнейшим испытаниям из-за низкого класса нагревостойкости изоляции (класс F) и большой зависимости tg δ от T °С не имеет смысла.