

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

***Прохоров Владимир Владимирович***

(ЗАО «Диэлектрик», г. Хотьково, генеральный директор)

***Боев Михаил Андреевич***

(НИУ МЭИ, г. Москва, доктор технических наук, профессор)

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  $200^{\circ}\text{C}$  и возможных скачков напряжения в сети. Подход к оценке однозначно должен быть продиктован исходя из точки зрения теории химии и физики диэлектриков. В частности, мы рекомендуем материалы кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК) Московского энергетического института.

Особенностью электрических машин является тесное конструктивное сочетание металлов и изоляции, т. е. материалов, имеющих резко различные тепловые характеристики. В то время как металлы сохраняют свои рабочие свойства при температурах до  $400\text{—}500^{\circ}\text{C}$  и выше, верхний предел допустимого нагрева изоляционных материалов, применяемых в электромашиностроении, в зависимости от класса их нагревостойкости составляет  $90\text{—}200^{\circ}\text{C}$ .

Учитывая, что система изоляции, например, для тяговых электродвигателей (ТЭД), представляет собой запеченную в монолит композицию из нескольких различных электроизоляционных материалов, то оценку ожидаемых конечных результатов можно делать, с определенным приближением, через оценку свойств конкретных электроизоляционных материалов (ЭИМ).

**Тепловой баланс** электрической машины должен обеспечивать условие, когда образующая за счет потерь тепловая мощность ( $P_{\text{обр}}$ ), должна быть меньше отводимой ( $P_{\text{отв}}$ ), т.е. должно соблюдаться условие:

$$P_{\text{обр}} < P_{\text{отв}}$$

При этом разогрев работающей электрической машины происходит:

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

$$P_{обр} = P_{пр} + P_{изол}$$

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

Это категорически недопустимо, т.к. теплотери в изоляции работающей электрической машины, разогретой до температуры порядка  $200^{\circ}\text{C}$ , могут превысить критический уровень, что может привести к тепловому пробую и создает условия для самовоспламенения.

$$P_{изол} = U^2 \cdot \text{tg}\delta \cdot Cx \cdot 2\pi \cdot f$$

На основе этого расчета оценивается тепловое состояние машины, выбираются такие тепловые и вентиляционные схемы и способы ее охлаждения, при которых превышение температуры частей электрической машины не превосходит пределов допускаемых значений, установленных ГОСТ 183—74.

Рассмотрим физический смысл некоторых определений, в частности:

1. Токов утечки  $I_{ут} = I_{см} + I_{абс} + I_{скв}$ ;
2. Тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = I_a / I_p$ .

Поведение тока диэлектрических потерь ( $I_{дп}$ ) в зависимости от времени приложения постоянного напряжения к диэлектрику выглядит следующим образом.

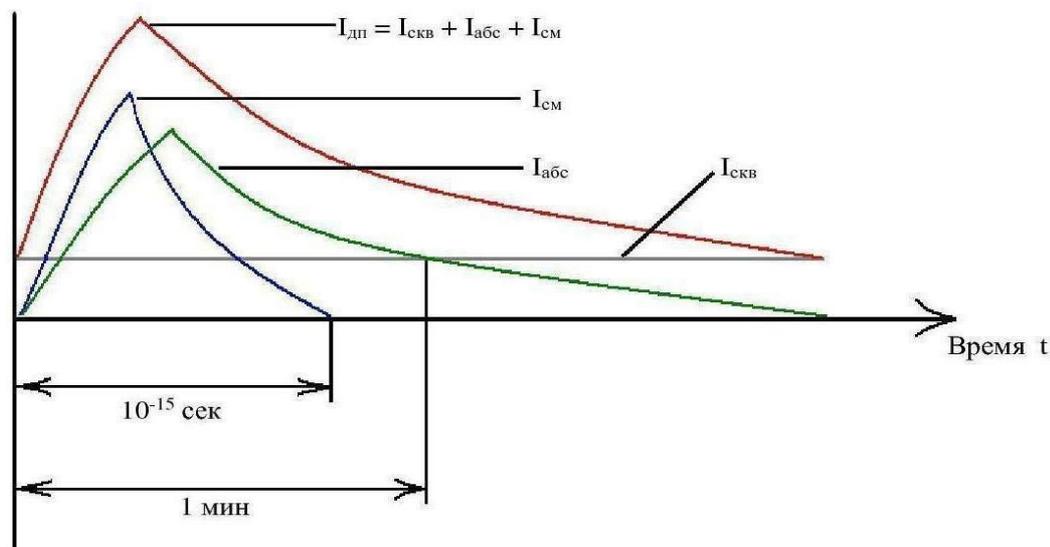


Рисунок 1 – Составляющие тока диэлектрических потерь

Где  $I_{скв}$  — ток сквозной проводимости - **основная причина тепловых потерь**, обусловлен наличием в диэлектрике свободных носителей зарядов;  
 $I_{см}$  — ток смещения - вызван процессами быстрой поляризации за счет смещения электронов на орбите по направлению внешнего поля. Это чисто емкостной ток, **не вызывающий тепловых потерь**;

$I_{абс}$  — 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.

**Итак, диэлектрическими потерями** называют энергию, рассеиваемую в электроизоляционном материале под воздействием на него электрического поля. Способность диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле обычно характеризуют **углом диэлектрических потерь**, а также **тангенсом угла диэлектрических потерь**. При испытании диэлектрик рассматривается как диэлектрик конденсатора, у которого измеряется емкость и угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи. Этот угол называется **углом диэлектрических потерь**.

**Тангенс угла диэлектрических потерь** это отношение активной составляющей тепловой мощности, выделяющейся в изоляции, к реактивной. Также тангенс диэлектрических потерь равен отношению активного и реактивного токов  $tg\delta = I_a / I_p$ .

График зависимости **тангенса угла диэлектрических потерь от температуры** для различных пропитывающих составов (испытания проводились на дисках толщиной 1 мм, все диски запекались при температуре  $160^\circ\text{C}$  в течение 16 часов) представлен на рисунке 2.

Резкое нарастание значения  $tg\delta$  (в 3-4 раза) определяет то, что в такой же степени увеличивается активная составляющая тока утечки ( $I_a$ ). Это вызвано тем, что под влиянием температуры идет ослабление межмолекулярных связей и происходит срыв электронов с их орбиты. Появляются дополнительные свободные носители заряда, т. е. появляется электронно(ионно) — дырочная проводимость и **диэлектрик переходит в разряд полупроводников или даже проводников**.

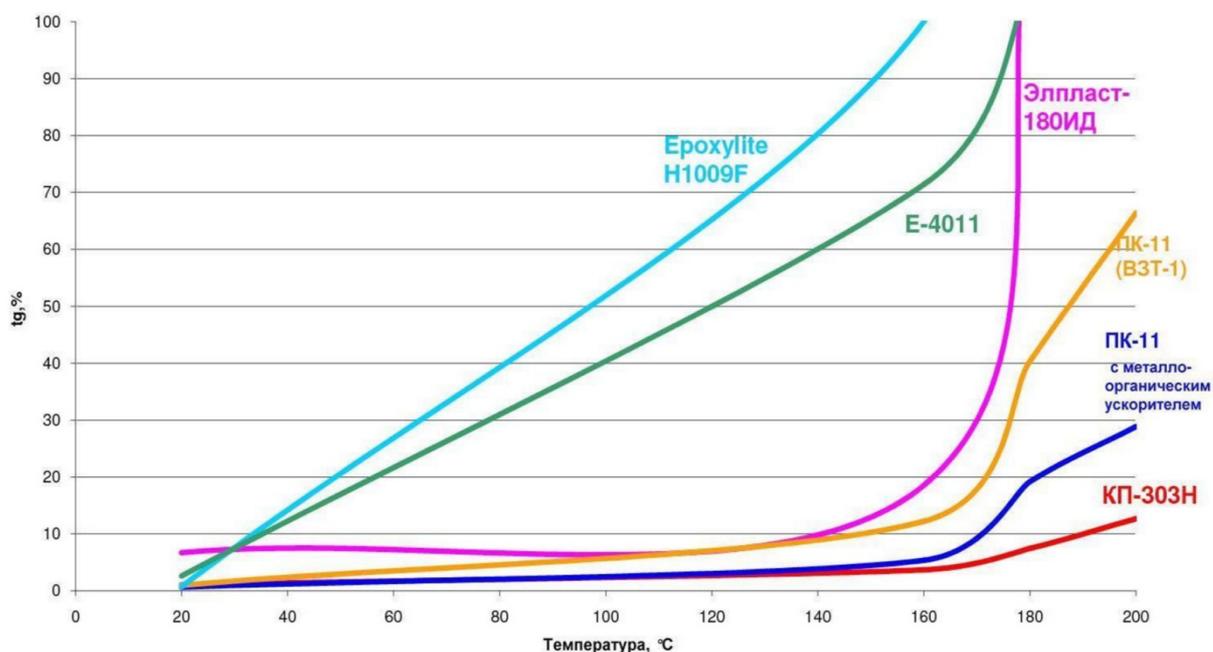


Рисунок 2 - Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для различных пропитывающих составов

Следовательно, образующееся тепло в электрической машине необходимо удалить и это определяет следующие **условия и требования к конструкции электрической машины и применяемым материалам.**

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

где  $\lambda$  — 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.

Данные о теплопроводности некоторых ЭИМ представлены на рисунке 3.

Наличие воздушных прослоек в слоистой изоляции снижает результирующую теплопроводность изоляции. Для улучшения теплопроводности многослойной изоляции обмоток электрических машин и повышения ее электрической прочности предусматривают компаундирование обмоток специальными лаками и компаундами. Поэтому при выполнении тепловых расчетов электрических машин обычно используют эквивалентные

значения теплопроводности, полученные экспериментальным путем для соответствующего класса изоляции.

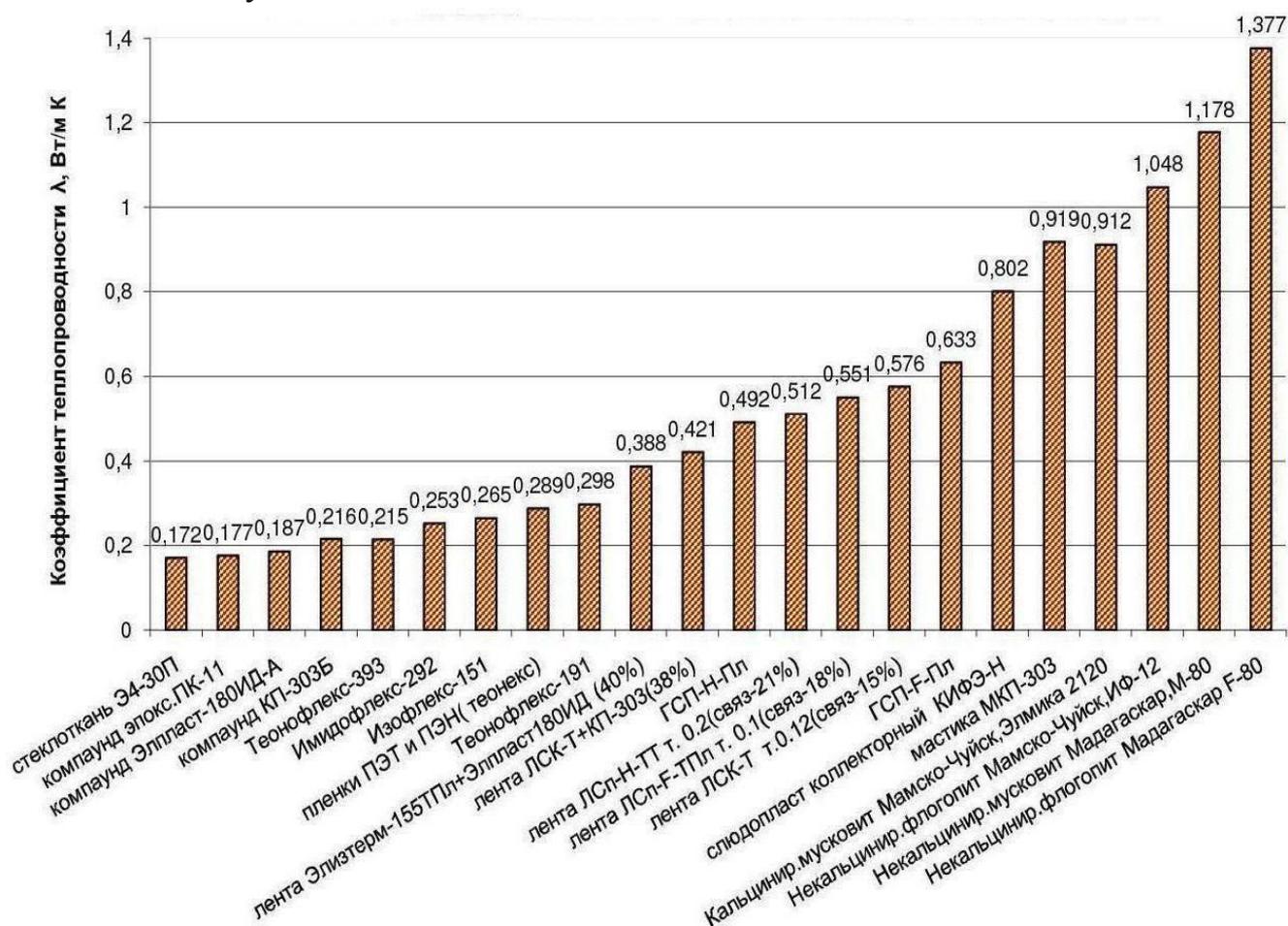


Рисунок 3 – Оценочная теплопроводность некоторых ЭИМ

Учитывая вышеизложенное, для повышения ресурса электромашин специалистами ЗАО «Диэлектрик» рекомендуется система изоляции класса нагревостойкости Н и С.

Также, по мнению специалистов ЗАО «Диэлектрик», ЭИМ системы изоляции электрических машин переменного тока следует оценивать дополнительно по такому показателю, как **стойкость к воздействию частичных разрядов (ЧР)**.

В общем виде, под частичными разрядами понимают пробой газовых включений, локальные пробой малых объемов твердого или жидкого диэлектрика, местные разряды по поверхности твердого диэлектрика. Возникновение ЧР всегда свидетельствует о неоднородности диэлектрика.

**Физическая сущность** этого явления 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 машины. 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**, по причине срыва электронов с орбиты одного или нескольких атомов составляющих молекулу, ионизация включений и химическое разрушение изоляции. Это 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 **лавиновых частичных разрядов (шаров, дендритов, короны и пр.)**, а это приводит к местным **прогарам** изоляции и **электрическому пробую**.

Необходимо затронуть проблемные вопросы электродвигателей с частотно-регулируемыми приводами (ЧРП), т.е. с системой управления частотой вращения ротора асинхронного (или синхронного) электродвигателя, который состоит из собственно электродвигателя и частотного преобразователя.

**ЧРП — это значит наличие метода широтно — импульсной модуляции (ШИМ)**, а 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 и более выше номинального, что приводит к возникновению частичных разрядов и пробую изоляции.**

Появление двигателей с ЧРП привело к **проблеме**, которая до настоящего времени, в нашей промышленности вызывает непонимание и **недооценена**. 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 повышенного градиента напряжения в момент увеличения частоты напряжения, подаваемого на инвертор.

**Из-за этого эффекта на зажимах двигателя возникает увеличение напряжения в несколько раз выше, чем на выходе с инвертора.** Ко всему прочему, распространение напряжения в обмотках двигателя сильно 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. таблицу 1), а изоляция **витковая рассчитана по принципу электрических машин постоянного тока**, т. е. из расчета, что **напряжение между витками меньше рабочего в разы, определяющееся количеством витков.**

В таблице представлены данные исследователей швейцарской компании VonRoll Izola об импульсных напряжениях возникающих в двигателях, работающих с ЧРП.

Таблица 1 - Данные компании VonRoll Izola (Швейцария) об импульсных напряжениях возникающих в двигателях, работающих с ЧРП

Изоляция	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	$2.0 * U_d$	1130 В	1630 В	1950 В
Фаза - Фаза	$2.3 * U_d$	1300 В	1870 В	2240 В
Проводник - Проводник	$(0.4...0.7) * 2.0 U_d$	450...790 В	650...1140 В	780...1365 В

$U_N$  - Номинальное напряжение,  $U_d = \sqrt{2} * U_N$

При этом напряжение возникновения частичных разрядов (PDIV) на различных проводниках по данным VonRoll Izola выглядит следующим образом (таблица 2):

Таблица 2 - Напряжение возникновения частичных разрядов (PDIV) на различных проводниках (данные VonRollIzola и ЗАО «Диэлектрик»)

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
ППИПК-Т*	1680 В
ППФК-2*	4400 В

Это определяет необходимость выбора изоляции обмоточных проводов, обеспечивающей:

1. Соответствие толщины изоляции и рабочего напряжения, позволяющих задавать уровень напряженности начала возникновения частичных разрядов (PDIV) более высокий, чем уровень напряженности 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 нашем испытательном центре ОАО «НИИЦЭИМ». Для испытаний определили три группы обмоточных проводов:

**1 группа** — провода с эмалевой изоляцией:

1) стандартные: ПЭТВ СД и ПЭТ2 — 200;

2) новая разработка — с покрытием полиимидной эмалью;

**2 группа** - провода с пленочной изоляцией:

1) стандартные: - ППИПК-Т, изолированные полиимидофторопластовой пленкой;

2) ППИПК-2, изолированные короностойкой полиимидофторопластовой пленкой фирмы Дюпон;

**3 группа** — провода со слюдосодержащей изоляцией:

1) стандартная: ППЛС т.0,47 мм (изоляцией Каластик);

2) новые разработки:

- ППФК т. 0,64 мм с изоляцией, наложенной на проводник, 2 слоя в ½ нахлеста из ЭИМ (Микасил-ТПл 0,08) и

- ППФК-1 т. 0,64 мм (с изоляцией, наложенной на проводник, 1 слой в ½ нахлеста из ЭИМ (Микасил 0,14+ПМФ-1-встык).

Испытательное напряжение было задано частотой 50 Гц в номинальных значениях: 1680 В - 3000В - 4500 В - 10 000 В. Температурный режим — температура окружающей среды (20°С — 30°С) и термостат (160±2)°С.

Результаты текущих испытаний сведены в таблицу 3.

Таблица 3 –Результаты испытаний различных групп обмоточных проводов

Наименование, обмоточные провода	Толщина изоляции и х 2(мм)	U <sub>пр</sub> между 2-я проводами (кВ)	Выход из строя, % / час			
			1680 В	3000 В	4500 В	10 000 В
<b>1 группа</b>						
1.1. ПЭТВ СД при 20°С	0,24	11	100/48	-	-	-
1.2. ПЭТ2 — 200 при 20°С	0,07	9,2	100/148	100/75	-	-
1.3. с покрытием полиимидной эмалью при 20°С	0,24	12	100/2	-	-	-
<b>2 группа</b>						
2.1. ППИПК — Т изолирован полиимидфторопластовой пленкой при 20°С при 160°С	0,16	27	100/134	100/100 100/20	-	-
2.2. ППИПК — 2 изолирован короностойкой полиимидфторопластовой пленкой фирмы Дюпон при 20°С	0,3	35	0/1989	0/1550*	0/1562*	-
<b>3 группа</b>						
3.1. ППЛС т. 0,47 мм при 20°С	0,47	19	-	-	100/47,	100/6,5
3.2. ППФК т. 0,64 мм при 20°С	0,64	10,5	-	0/2134*	5	-
- Микасил-ТПл 0,08	0,71	14	-	-	50/205	-
3.3. ППФК-1 т. 0,71 мм Микасил0,14+ПМФ-1 при 20°С при 160°С			-	0/1614*	1*	-
				100/102	100/228	-

Наименование, обмоточные провода	Толщина изоляции и х	U <sub>пр</sub> между 2-я проводами	Выход из строя, % / час			
			1680 В	3000 В	4500 В	10 000 В

\*испытания продолжаются, результаты испытаний по состоянию на 04.12.14г.

Также, было проведено исследование зависимости уровня ЧР от приложенного напряжения для некоторых групп проводов (см. рисунок 4).

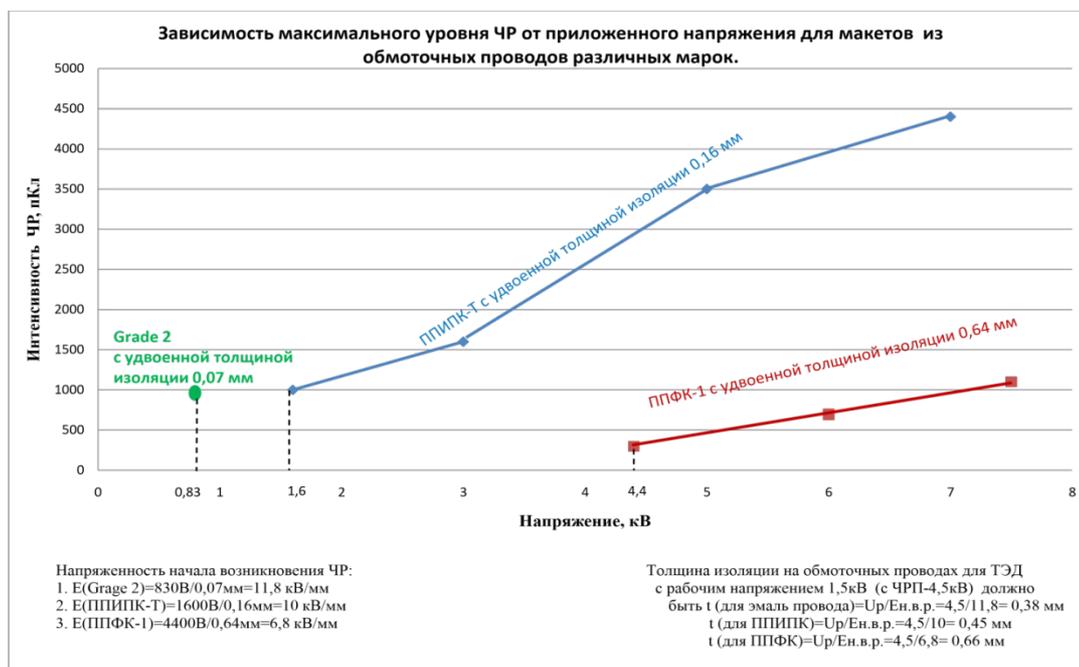


Рисунок 4 - Графики зависимости максимального уровня ЧР от приложенного к макетам напряжения

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 и ППФК-1 на вариантах изоляции: Микасил-ТПл 0,08 и Микасил 0,14+ПМФ-1.

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

На проводе ППФК-1 в данный момент идет подбор изоляции, позволяющей выдерживать воздействие напряжения 4,5 кВ не менее 1000 часов.

Таким образом можно сделать вывод, что правильный выбор ЭИМ, знание его состава, структуры, электрических, тепловых, механических, физико-химических параметров, их взаимосвязи с технологическими факторами, т. е. всего комплекса свойств обуславливают технико-экономические и эксплуатационные показатели и характеристики электрических машин.