

Надежность системы электроизоляции тяговых электродвигателей



А. В. Прохоров,
заместитель генерального директора ЗАО «Диэлектрик»

Надёжность работы тяговых электродвигателей (ТЭД) и вспомогательных электрических машин электропоездов и тепловозов в настоящее время остаётся на недостаточно высоком уровне. Количество отказов электрических двигателей по причине пробоя изоляции достигает 40% от общего числа отказов. И это при том, что гарантийный пробег составляет всего лишь 175 тыс. км.

Ключевые слова: система электроизоляции; тяговый электродвигатель.

В чём же причина преждевременного разрушения изоляции? Каковы пути повышения надёжности систем изоляций тяговых и других электродвигателей? Возможно ли отечественным заводам построить и применить такую систему изоляции ТЭД, которая позволила бы увеличить его гарантийный пробег до 2,5 млн. км и больше?

На все эти вопросы есть положительные ответы. Но для того чтобы достичь требуемых показателей надёжности ТЭД, необходимо понять одну причину, которая лежит в основе большинства причин возникновения электрического пробоя изоляции, – это технически грамотный выбор электроизоляционных материалов.

Сущность электроизоляционных материалов (диэлектриков) состоит в том, что они имеют высокие показатели электрического сопротивления и не пропускают электрический ток (в отличие от проводников). Тем не менее, идеальных диэлектриков в природе нет. В любом диэлектрике имеются какие-то свободные носители заряда разной природы, которые способны передавать электрический заряд. В обычных условиях при нормальной температуре это совсем мизерный ток. Такой ток в электротехнике определяется как ток сквозной проводимости ($I_{скв}$). Ещё имеется ток, который обусловлен быстрыми видами поляризации в момент включения электрической машины, – ток смещения ($I_{см}$) и ток, вызванный установлением замедленных релаксационных поляризаций, – ток абсорбции ($I_{абс}$). Понятие диэлектрических потерь неразрывно связано с наличием тока сквозной проводимости ($I_{скв}$), тока смещения ($I_{см}$) и тока абсорбции ($I_{абс}$).

Показателем, определяющим потери в диэлектриках от различных факторов, в том числе от $I_{скв}$, токов, вызванных процессами различных видов поляризаций ($I_{см}$), и тока абсорбции ($I_{абс}$), является тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$), который прямо пропорционален активной составляющей тока потерь. Определяя $\text{tg } \delta$, мы определяем фактически активную составляющую тока потерь в диэлектрике.

При работе электродвигателя происходит его разогрев, и активная составляющая тока потерь в отдельных электроизоляционных материалах возрастает в 40 – 50 раз при $T = 150^\circ\text{C}$. Электрическое сопротивление изоляции $R_{из}$ по площади её наложения в отдельных точках имеет какие-то колебания по различным причинам (толщина и т.п.).

Напряжённость электрического поля имеет неоднородный характер, имеются участки с повышенной концентрацией, например, в местах изгиба катушек или на выходе катушки из паза.

Явление электрического пробоя изоляции происходит таким образом: работающий электродвигатель разогревается до температуры, при которой происходит резкое увеличение активной составляющей тока потерь ($\text{tg } \delta \geq 40\%$) в 40 – 50 раз и появляется мощность потерь, увеличенная в тысячи раз от первоначальной – $I_{п}^2 \cdot R_{из}$. На участке изоляции прожигается канал, где происходит электрическое замыкание.

Рассмотрим поведение диэлектриков в зависимости от условий работы, т.е. $\text{tg } \delta = f(T)$ и $\text{tg } \delta = f(U)$. Что же мы видим? Казалось бы, очень привлекательные

электроизоляционные материалы начинают терять свои диэлектрические свойства при температурах 120 – 150 °С (рис. 1). Зависимость $\text{tg } \delta$ от напряжения также значительна (рис. 2).

Анализ зависимостей $\text{tg } \delta$ показывает, что далеко не все электроизоляционные материалы способны работать по классам нагревостойкости *F* и *H*. В настоящее время имеющаяся практика определе-

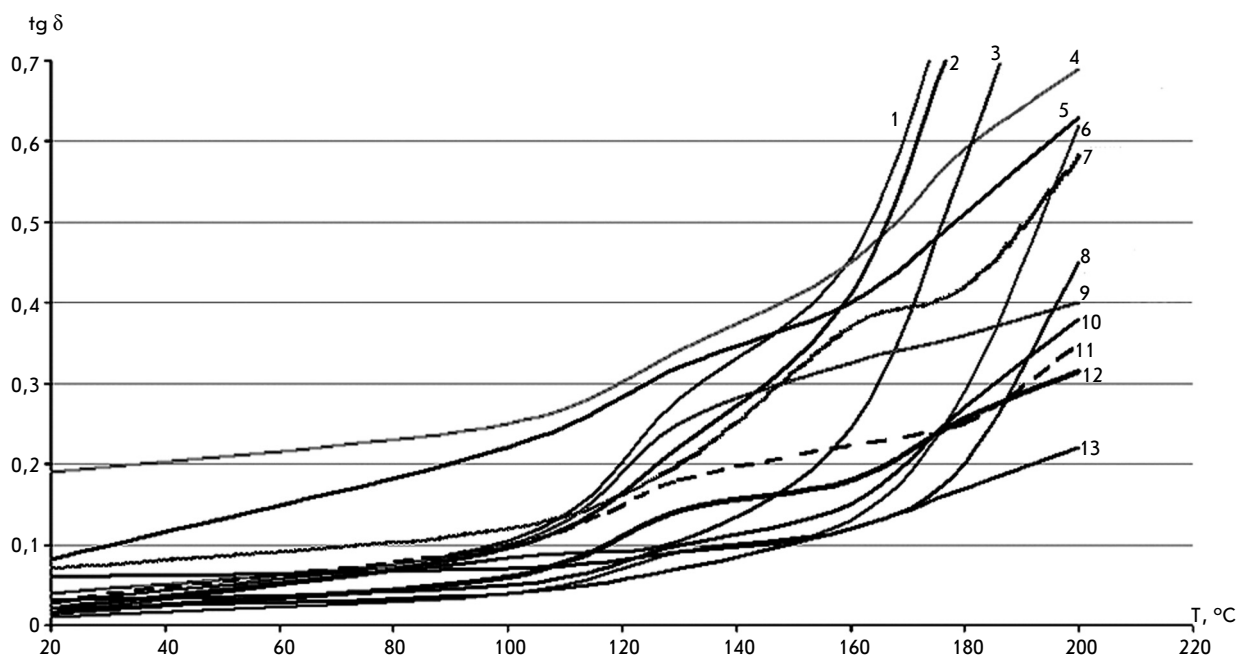


Рис. 1. График зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры испытания на различных пропитывающих составах (испытательное напряжение 1 кВ)

1 – КП-307, 2 – Элпласт-155ИД, 3 – ПК-11(ВЗТ-1), 4 – DOLPHON CC-1105, 5 – ФЛ-98, 6 – металлоорганический ускоритель +ПК-1, 7 – ПК-21, 8 – КП-3309, 9 – КП-3340, 10 – ЭП-9150М, 11 – Е-4011, 12 – КП-303В, 13 – КО-916

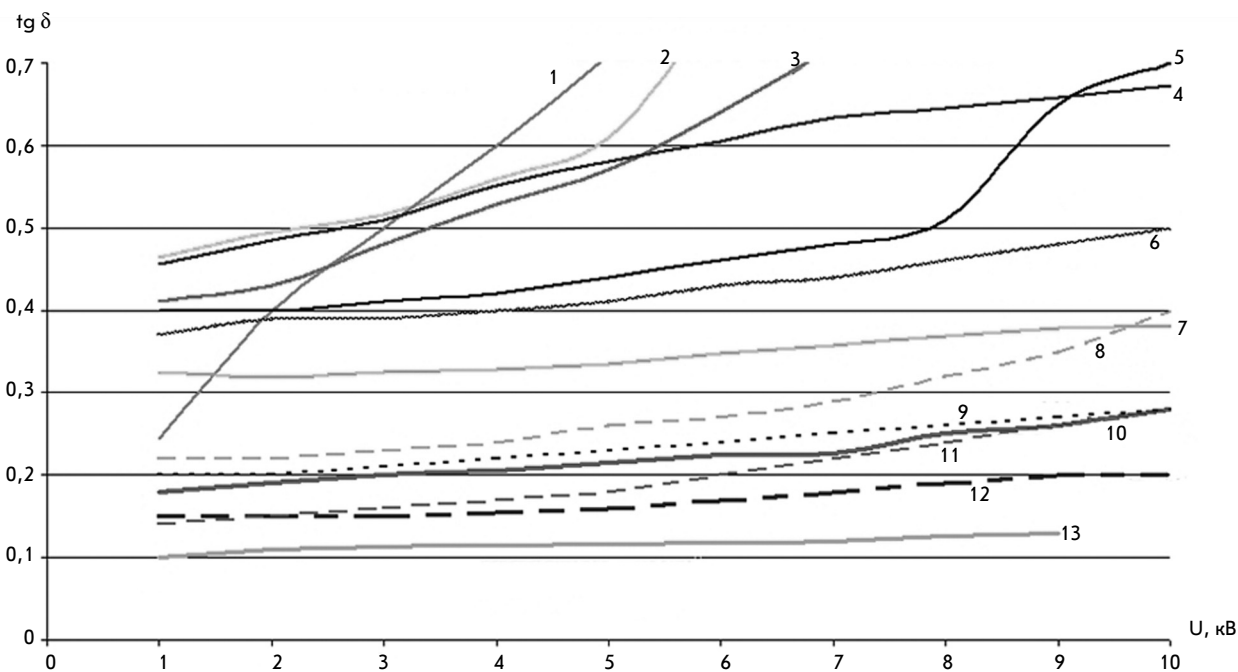


Рис. 2. График зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения для различных пропитывающих составов (температура испытаний 160 °С)

1 – ПК-11(ВЗТ-1), 2 – DOLPHON CC-1105, 3 – Элпласт-180ИД, 4 – КП-307, 5 – ФЛ-98, 6 – ПК-21, 7 – КП-3340, 8 – Е-4011, 9 – КП-3309, 10 – КП-303В, 11 – КО-916, 12 – ЭП-9150М, 13 – металлоорганический ускоритель+ПК-11

ния нагревостойкости, к сожалению, не предусматривает показателя, определяющего зависимость $\text{tg } \delta$ от температуры. Следует однозначно определить значения $\text{tg } \delta$, позволяющие обеспечивать работоспособность систем изоляции по определённому классу нагревостойкости. Эта градация должна выглядеть следующим образом: допустимые значения $\text{tg } \delta$ – не

более 30% при температуре, являющейся рабочей для определённого класса нагревостойкости.

Конечно, технология изготовления электродвигателей должна обеспечивать полную полимеризацию электроизоляции. Насколько это важно иллюстрирует сравнительная тангенсограмма спекания слюдяных лент разных марок (рис.3).

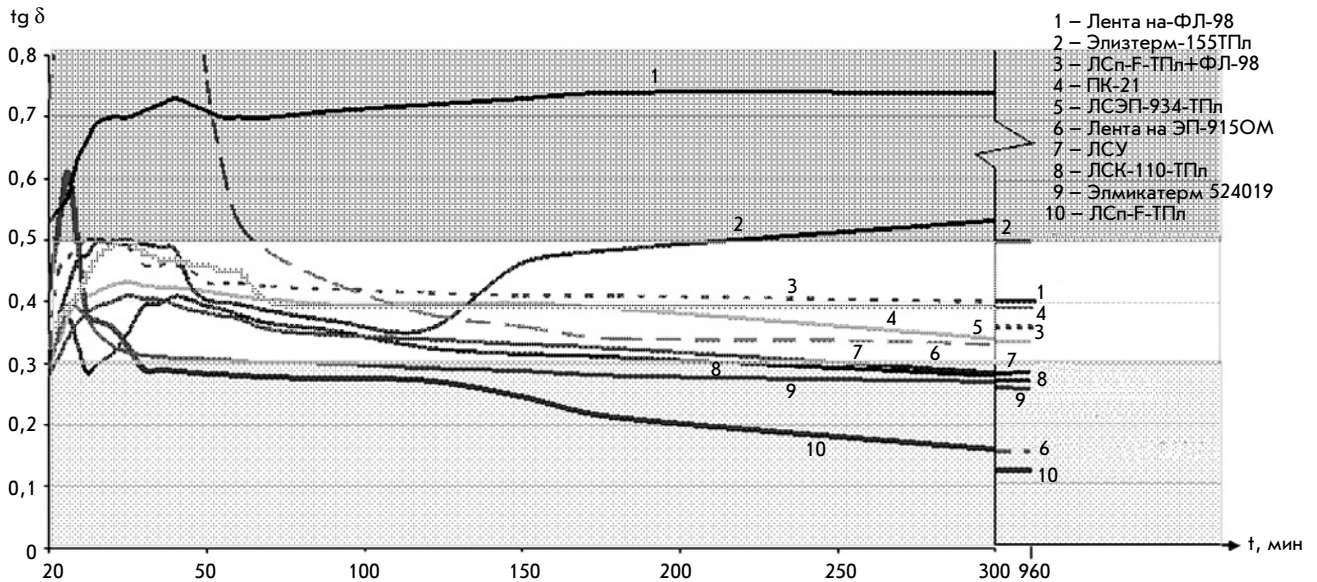


Рис. 3. Сравнительная тангенсограмма отверждения лент слюдяных пропитанных

Режимы отверждения (рис. 3): ЛСп-Ф-ТПл: T=160 °C, t=4 ч; ЛСЭП-934-ТПл T=160 °C, t=16 ч; ЛСУ: T=160 °C, t=6 ч; Элизтерм-155-ТПл T=140 °C, t=2 ч; T=160 °C, t=3 ч; Элмикатерм 524019, T=160 °C, t=4 ч; T=180 °C, t=2 ч; ЛСК-110-ТПл T=160 °C, t=5 ч. Лента

на ФЛ-98: T=120 °C, t=2 ч; T=140 °C, t=12 ч; ЛСп-Ф-Пл, пропитанная ФЛ-98: T=160 °C, t=5 ч; лента на ЭП-9150М: T=160 °C, t=48 ч. Лента ЛСКН-135-ТПл 0,4 у, пропитанная ПК-21: T=160 °C, t=16 ч. Все ленты допекали при T=160 °C до 16 ч (960 мин).

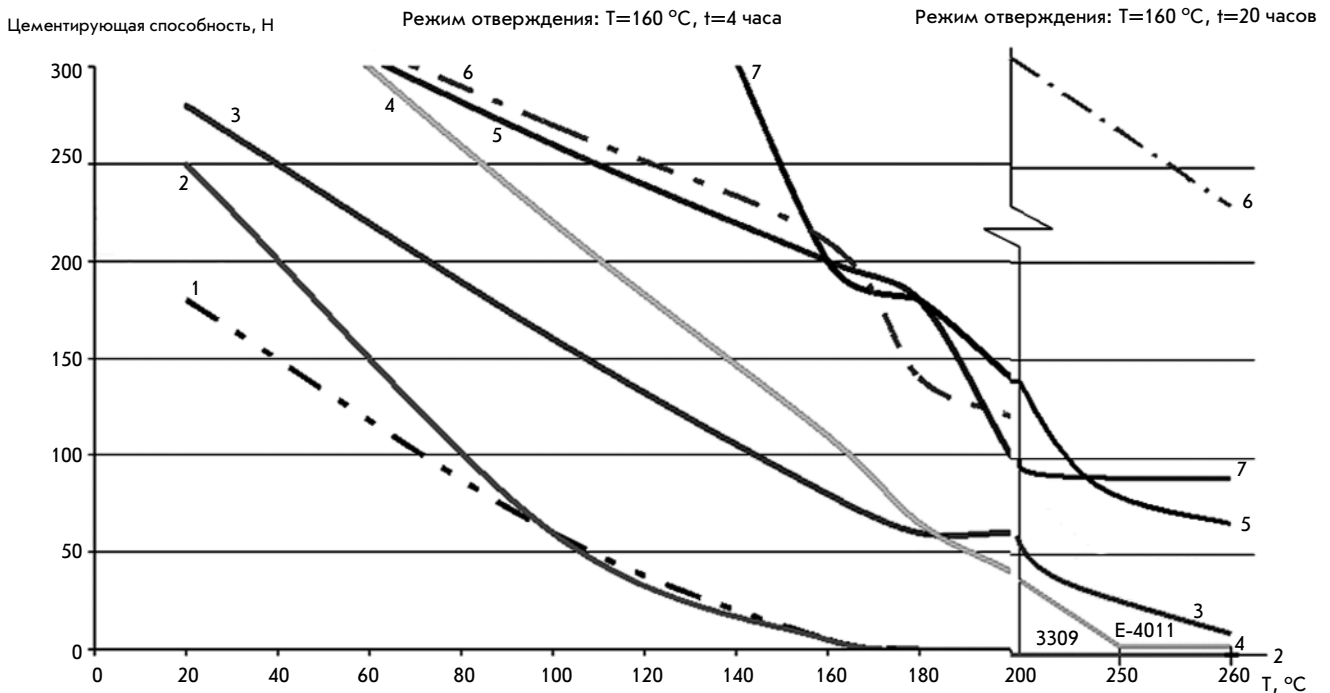


Рис. 4. График зависимости цементирующей способности от температуры различных пропитывающих составов

1 – 3309 (Франция), 2 – ФЛ-98, 3 – Элпласт-180ИД, 4 – E-4011 DuPont, 5 – КП-303В, 6 – ЭП-9150М, 7 – ПК-11(ПК-21)

В настоящее время разогрев тяговых электродвигателей фактически находится в пределах $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, и скачки напряжения достигают $5 - 6\text{ кВ}$. Однако тенденция увеличения нагрузки непременно приведёт к повышению рабочих температур электрических машин, и без грамотного выбора диэлектриков и систем изоляции не обойтись. Ещё раз обращаем внимание на то, что такие материалы у нас есть. Когда мы говорим о материалах класса нагревостойкости Н ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$), мы говорим о системах изоляции, способных работать не менее 50 тыс. часов при $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выдерживать скачки напряжения свыше 10 кВ . Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ таких материалов при $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ остаётся в пределах 30% .

Кроме того, следует обращать внимание и на механическую прочность системы изоляции, которая также имеет серьёзную зависимость от рабочих температур. Показатель «цементации»

при рабочих температурах должен быть не менее 40 Н (рис. 4).

Контроль качества изоляции по $\text{tg } \delta$ следует внедрять и в качестве неразрушающего способа контроля вновь изготовленного или отремонтированного двигателя, так как именно этот показатель позволит с большой долей вероятности говорить о надёжности системы изоляции. Причём необходимо это на всех этапах изготовления или ремонта двигателя, т.е. перед пропиткой якоря и катушек, после термообработки (запечки) якоря и катушек, и в сборе двигателя. Для этого в настоящее время имеются мобильные приборы типа «Вектор – М» или «Тангенс – 2000».

*Материал подготовлен при содействии кафедры
ФТЭМК МЭИ, аналитической
и электрофизической лаборатории
ЗАО «Диэлектрик»*