

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕНТ ЭЛМИКАПОР В СИСТЕМАХ ИЗОЛЯЦИИ

АНДРЕЕВ А.М., ЛАВРЕНТЬЕВА М.Ю., ПАК В.М., СТАРОВОЙ ТЕНКОВ В.В.
СПбГТУ, АО “Холдинговая компания”Элинар”

Представлены основные результаты исследований долговечности композиционных материалов на основе слюдопластовой бумаги и полиэтилентерефталатной пленки, а также конструкций на их основе. Установлено, что введение полимерной пленки в состав композиции и активация ее поверхности приводит к увеличению долговечности и однородности как материалов, так и систем изоляции. Некоторое ухудшение характеристик изоляционных систем по сравнению с исходными материалами связано с технологией изготовления реальных изделий.

Широкое использование в производстве вакуум-нагнетательной технологии пропитки обмоток высоковольтных электрических машин предъявляет дополнительные требования ко всем компонентам изоляционной системы. Повышение удельных характеристик машин, снижение толщины изоляции с одновременным повышением значений рабочей напряженности электрического поля может быть достигнуто, в частности, за счет применения современных и качественных материалов.

Исследовательские работы, проводимые АО ”Холдинговая компания Элинар” совместно с кафедрой “Электрическая изоляция” СПбГТУ привели к созданию ленточного материала Элмикапор 533019. Его особенностью является замена слюдинитовой бумаги на слюдопластовую с повышенной плотностью, что позволило повысить содержание слюды в ленте. Другой особенностью данного материала является наличие в его составе полиэтилентерефталатной пленки. Проведенные на плоских образцах (спм) исследования показали, что внедрение полимерной пленки привело к повышению не только кратковременной, но и длительной электрической прочности[1, 2]. Активизация поверхности пленки плазмо-химическим методом перед введением ее в материал приводит к некоторому увеличению длительной прочности, а также повышает однородность

материала. Испытания материалов, проведенные при значениях напряженности электрического поля $E=26, 30$ и 35 кВ/мм, показали, что в указанных условиях сохраняется механизм электрического старения. Это позволило построить кривую долговечности и определить ее параметры:

$$\lg \tau = 22,8 - 11,8 \lg E.$$

Ведущие российские электромашиностроительные предприятия-производители провели независимые испытания на макетах (АО “Электросила”) и натуральных катушках высоковольтного двигателя 2СД ГВ-335-4000/3550 (АО “Уралэлектротяжмаш”) с изоляцией, изготовленной по технологии “Монолит-2” на основе непропитанных слюдобумажных лент Элмикапор 533019 (пленка толщиной 20 мкм, неактивированная) и Элмикапор 533019А (пленка толщиной 20 мкм, активированная). Пропитка изделий проводилась компаундом ПК-11 вакуум-нагнетательным способом. В каждой серии испытаний выборка составляла не менее 10-ти образцов, параметры которых представлены в таблице 1.

Таблица 1.

	сечение меди, мм ²	толщина изоляции односторонняя, мм	площадь под электродами, см ²	$E_{исп}$, кВ/мм
макеты	6 x 30	2	176	15
катушки	13,6 x 33,5	2,55	260	12

Результаты испытаний в виде вероятностных распределений (по Вейбуллу) времен жизни испытанных образцов представлены на рис.1 и 2 для макетов и катушек соответственно. Данные свидетельствуют, что при испытаниях на конструкциях наблюдаются те же закономерности и тенденции, что и обнаруженные ранее для плоских образцов. Так, использование пленок с активированной поверхностью приводит к повышению однородности систем изоляции, что соответствует увеличению параметра β распределения с 1,38 до 1,50 для макетов и с 0,98 до 1,84 для катушек. Одновременно происходит некоторое увеличение среднего значения длительной электрической прочности, это в большей степени относится к макетам вследствие более простой технологии их изготовления.

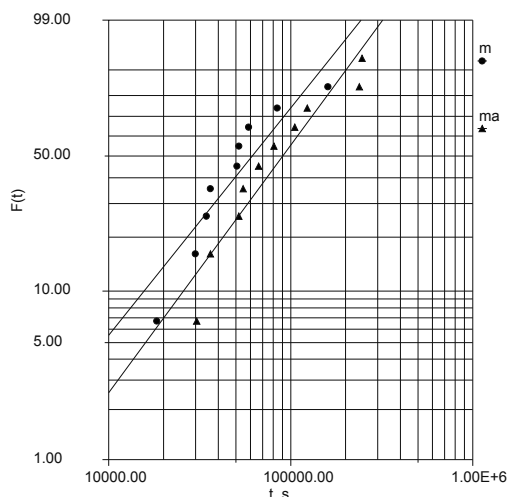


Рис 1. Вейбулловские распределения времен жизни макетов с изоляцией на основе лент Элмикапор с обычной (m) и активированной (ma) пленкой.

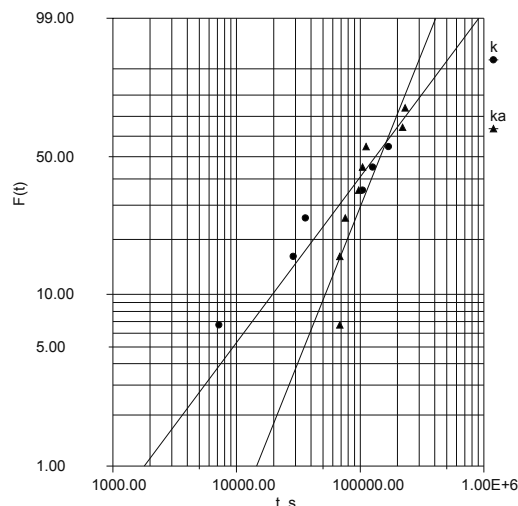


Рис 2. Вейбулловские распределения времен жизни катушек с изоляцией на основе лент Элмикапор с обычной (m) и активированной (ma) пленкой.

При сравнении результатов испытаний реальных изделий и исходных материалов необходимо учесть, во-первых, существенную неоднородность электрического поля в изоляции макетов и катушек, вследствие чего напряженность на ребрах значительно отличается от среднего значения и, во-вторых, различие площадей под электродами (т.н. масштабный фактор).

Электрическое поле внутри изоляции образуется системой электродов, в виде двух закругленных углов – токопроводящей части стержня (плетенки) и внешней поверхностью изоляции, покрытой полупроводящим материалом низкого сопротивления. Максимальная напряженность электрического поля определяется по полуэмпирической формуле [3]

$$E_m = E_{cp}(1,8 \cdot d/r + 1)^{1/3},$$

где $E_{cp} = U/d$ – средняя напряженность в промежутке; d – толщина изоляции; r – радиус закругления внутреннего электрода. С учетом геометрии исследованных объектов получено для макетов $E_{max} = 25.6$ кВ/мм и для катушек $E_{max} = 24.6$ кВ/мм.

Для уточнения значений максимальной напряженности поля на ребрах проведен расчет с использованием пакета "ELCUT" , разработанного санкт-

петербургской компанией ТОР. Данный программный продукт предназначен для построения двумерных моделей физических объектов и дальнейшего расчета статических электрических, магнитных, тепловых полей в этих моделях. Результатом расчета является двумерная картина поля для исходного объекта. Модели задавались геометрическими размерами объектов, при этом диэлектрическая проницаемость изоляции принималась равной $\epsilon = 4,5$. При расчетах внешняя поверхность изоляции находилась под нулевым потенциалом, а внутренняя (токоведущая часть) – под испытательным напряжением (30 кВ для макетов и 30,6 кВ для катушек). Расчетные модели, методика и результаты расчетов представлены на сайте компании ТОР (<http://www.tor.ru/elcut/articles/vstar>). Уточненные значения максимальной напряженности составили:

$$E_{\max-m} = 27.8 \text{ кВ/мм для макетов и}$$

$$E_{\max-k} = 26,2 \text{ кВ/мм для катушек.}$$

С использованием кривой жизни были рассчитаны t_{63} для исходного материала *srm* при этих напряженностях. Они составляют:

$$8,4 \cdot 10^5 \text{ с при } E = 27.8 \text{ кВ/мм (макеты) и}$$

$$1,7 \cdot 10^6 \text{ с при } E = 26,2 \text{ кВ/мм (катушки).}$$

Сравнение экспериментальных распределений времен жизни реальных объектов (зависимости *m* и *k*) и пересчитанных на соответствующие напряженности распределений для плоских образцов (зависимости *srm* $E(m)$ и *srm* $E(k)$) представлены на рис.3 и 4 для макетов и катушек соответственно.

Масштабные преобразования проводились по известной методике [4].

При относительно небольших размерах образцов (что справедливо при испытаниях образцов исходных материалов) можно считать, что в рассматриваемом изолирующем промежутке случайным образом развивается до пробоя лишь один отдельный разряд и что этот случайный процесс полностью описывается функцией распределения подходящим образом выбранной случайной величины (в данном случае - $\tau_{ж}$).

В том случае, если изоляция обладает большими размерами и если источник напряжения имеет достаточную мощность, имеется возможность для

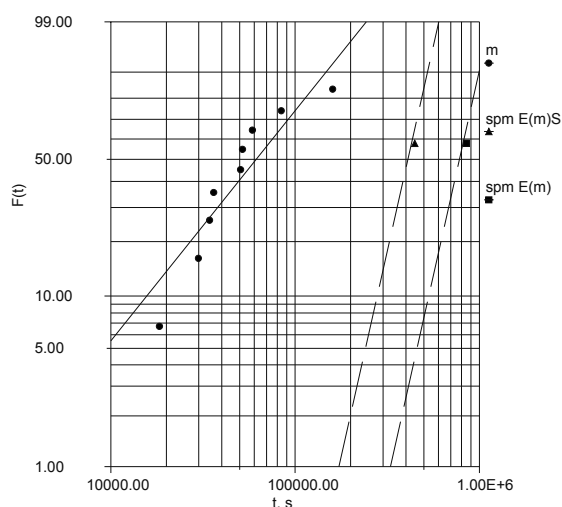
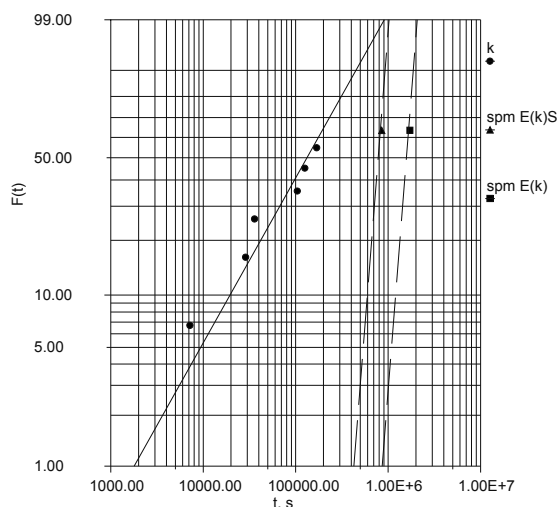


Рис.3 Сравнение результатов испытаний макетов (m) и исходных материалов с учетом усиления поля на ребрах (spm E(m)) и масштабного фактора (spm E(m)S)

Рис.4. Сравнение результатов испытаний катушек (k) и исходных материалов с учетом усиления поля на ребрах (spm E(k)) и масштабного фактора (spm E(k)S)

параллельного развития во времени и в пространстве нескольких процессов, приводящих к пробое. С точки зрения статистики эту проблему учитывает закон преобразования масштаба (“закон роста” или “закон поверхности и объема”).[4]

Если с помощью закона преобразования масштаба

$$F_n(x) = 1 - [1 - F_1(x)]^n$$

распределение Вейбулла

$$F_1(x) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{x - x_0}{\eta_1}\right]^\beta\right\}$$

преобразовано к идентичной форме, то получим

$$F_n(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - x_0}{\eta_1}\right)^\beta \cdot n\right]$$

где η_1 , x_0 и β - параметры исходного распределения. При n-кратном изменении масштаба меняется только 63 %-ный квантиль

$$\eta_n = (x_{nm} - x_0)_{63} = \eta_1 n^{-1/\beta} = (x_{1m} - x_0)_{63} n^{-1/\beta},$$

а начальное значение x_0 и показатель экспоненты β остаются неизменными.

На вероятностной сетке функции распределения, получаемые из приведенного

распределения Вейбулла ($\eta_1=1, x_0=0$), проходят параллельно начальному распределению $F_1(x)$.

Показатель β определен из распределения сроков службы образцов исходного материала и составляет 6,59. Масштабные коэффициенты $n = S_{\text{изд}}/S_{\text{матер}}$ составляют 69,3 и 102,4 для макетов и катушек соответственно. С учетом масштабного преобразования были рассчитаны сроки службы: для макетов – $t_{63} = 4.4 \cdot 10^5$ с; и для катушек – $t_{63} = 8.2 \cdot 10^5$ с. Результаты масштабных преобразований представлены на рисунках 3 и 4 для макетов и катушек соответственно (зависимости $\text{spm } E(m)S$ и $\text{spm } E(k)S$). Из представленных данных видно, что для реальных объектов наблюдается снижение длительной электрической прочности по сравнению с исходными материалами, при этом происходит уменьшение однородности изоляции, о чем свидетельствует разный наклон экспериментальных и расчетных зависимостей. Данные результаты свидетельствуют о том, что в процессе изготовления изоляционных систем происходит некоторое изменение свойств изоляции вследствие воздействий, неизбежных в условиях существующих технологических процессов.

Таким образом, в результате работы установлено

1. Испытания на реальных объектах показало, что закономерности, установленные для исходных материалов сохраняются и при изготовлении изоляционных конструкций. Введение в состав высоковольтной изоляции полимерной пленки, а также активизация ее поверхности приводит к увеличению длительной электрической прочности и повышает однородность конструкций.
2. В процессе изготовления изоляционных систем происходит некоторое снижение характеристик изоляции, повышается дефектность, что в свою очередь приводит к ухудшению свойств по сравнению с исходными материалами.

Литература:

1. А.М.Андреев, Н.М.Ваксер, И.Е.Куимов, В.М.Пак, В.В.Старовойтенков. Композиционные материалы на основе слюдопластовой бумаги и полимерной пленки./ Электротехника.- 2000, №6, с.44-47.
2. Н.М.Ваксер, С.Н.Койков, В.В.Старовойтенков. Результаты испытаний на электрическое старение новых типов слюдопластовых материалов с пленкой полиэтилентерефталата. МКЭЭ-2000. Труды IV международной конференции “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” 18-22 сентября 2000 Россия, Клязьма.с.89-90
3. Ваксер Н.М., «Изоляция электрических машин». Уч.пособ. ЛПИ,1985.
4. Хаушильд В., Мош В.Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений/ Пер. с нем. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.-312 с.: ил.