

А.В. Беспрозванных, А.Н. Бойко, А.В. Рогинский

ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Представлені результати розподілу електричного поля в високовольтній композитній ізоляції на основі запропонованої математичної моделі накопичення поверхневого заряду на межі розділу підложка – бар'єр. В сталому режимі напруженість електричного поля в діелектричному бар'єрі може перевищувати середнє значення на 50 % в залежності від електрофізичних характеристик та товщини компонентів. Показано, що в області початку перехідного процесу на характер розподілу електричного поля впливають відносна діелектрична проникність та товщина діелектричного бар'єру. Експериментальна перевірка виконана для п'яти типорозмірів склослюдинітової стрічки по 5-ть макетів в кожній. Встановлено, що композитна ізоляція з підвищеним вмістом слюдинітового бар'єру і склотканиною меншої товщини має на (8-16) % вищі значення тривалої електричної міцності. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: високовольтна композитна ізоляція, діелектричний бар'єр, скловолокниста підложка, міжфазна поляризація, розподіл електричного поля, тривала електрична міцність.

Представлены результаты распределения электрического поля в высоковольтной композитной изоляции на основе предложенной математической модели накопления поверхностного заряда на границе раздела подложка – барьер. В установившемся режиме напряженность электрического поля в диэлектрическом барьере может превышать среднее значение на 50 % в зависимости от электрофизических характеристик и толщины компонентов. Показано, что в области малых времен переходного процесса на характер распределения электрического поля влияют как относительная диэлектрическая проницаемость, так и толщина диэлектрического барьера. Экспериментальная проверка выполнена для пяти типоразмеров стеклослюдобумажной ленты по 5-ть макетов в каждой. Установлено, что композитная изоляция с повышенным содержанием слюдинитового барьера и склотканью меньшей толщины имеет на (8-16) % более высокие значения длительной электрической прочности. Библ. 9, рис. 5.

Ключевые слова: высоковольтная композитная изоляция, диэлектрический барьер, стекловолокнистая подложка, межфазная поляризация, распределение электрического поля, длительная электрическая прочность.

Введение. Современные высоковольтные системы композитной изоляции электрических машин состоят из ленточных стеклослюдобумажных материалов (сухих или предварительно пропитанных) [1, 2]. Основной функцией такой изоляции является сохранение длительной электрической прочности в условиях продолжительно действующих тепловых, механических и термомеханических воздействий. Высоковольтная изоляция должна также обладать необходимым уровнем технологичности и достаточно низкой стоимостью при сохранении высоких технико-эксплуатационных характеристик.

Применение в качестве диэлектрического барьера слюдобумаги является экономически выгодным, так как она изготавливается из отходов дефицитной и достаточно дорогой щепаной слюды [1]. По сравнению с материалами на основе щепаной слюды слюдинитовые и слюдопластовые бумаги обладают большей равномерностью по толщине, повышенной и более равномерной электрической прочностью. Сочетание хорошей эластичности и механической прочности позволяют обеспечить получение плотной, монолитной термоактивной изоляции [2]. Плоские слюдяные частицы образуют диэлектрический барьер и, в зависимости от условий, связываются различными пропитывающими составами и подложками. Связующее может быть введено в состав ленты либо заранее, тогда лента называется предварительно пропитанной (Resin Rich), либо вводится в сухие ленты после их обработки в процессе вакуум-нагнетательной пропитки [1].

В качестве связующего используются эпоксидные смолы (диановые, циклоалифатические и эпоксиноволачные), которые имеют высокие механические свойства, хорошую адгезию к различным материалам, достаточную нагревостойкость (класс В и F) и коро-

нотойкость, обладают незначительным коэффициентом усадки (3-5) % [2].

Механическую прочность обеспечивает стеклотканевая подложка, которая является армирующим материалом в такой системе. Также в ней находится большая часть связующего состава в случае пропитанной ленты. Композиционная изоляция, выполненная с применением стекловолокнистых материалов, имеет повышенный предел прочности при растяжении и изгибе. Стекловолокнистые материалы отличаются высокой термической устойчивостью [1, 2].

Электрические характеристики многослойной композитной изоляционной системы определяются как долевым содержанием отдельных компонентов, так и их электрофизическими свойствами.

Постановка проблемы. Реальная межфазная граница раздела подложка – диэлектрический барьер имеет поверхностный слой конечной толщины, в пределах которого термодинамические параметры (концентрация компонентов, давление и температура) испытывают резкие изменения. Поверхностные слои каждой фазы толщиной около 0,5 нм имеют особые свойства, так как находятся в поле действия молекулярных сил соседней фазы (так называемый эффект Ребиндера) [3].

Стремление гетерогенной системы к уменьшению поверхностной энергии вызывает соответствующую ориентацию полярных молекул, ионов и электронов в граничном слое, в результате чего соприкасающиеся фазы приобретают заряды противоположного знака, но равные по значению. На границе раздела подложка – диэлектрический барьер, как на межфазных поверхностях, возникает двойной электрический слой в результате взаимодействия соприкасающихся

© А.В. Беспрозванных, А.Н. Бойко, А.В. Рогинский

фаз из-за избыточной поверхностной энергии [4] с соответствующим электрическим потенциалом, поверхностной плотностью заряда, емкостью [5-7].

Целью статьи является анализ влияния электрофизических характеристик и толщины (долевого содержания) диэлектрического барьера на распределение электрического поля в композитной высоковольтной изоляции электрических машин.

Математическая модель накопления поверхностного заряда на плоской границе раздела двух диэлектриков. Высоковольтная терморезистивная композитная изоляция электрических машин может быть представлена в виде двух слоев диэлектрика: стекловолокнистой подложки (1) с пропиточным составом (3) и слюдобумажной ленты (2) в качестве диэлектрического барьера (рис. 1). Анизотропия свойств слюды в данном случае слабо выражена.

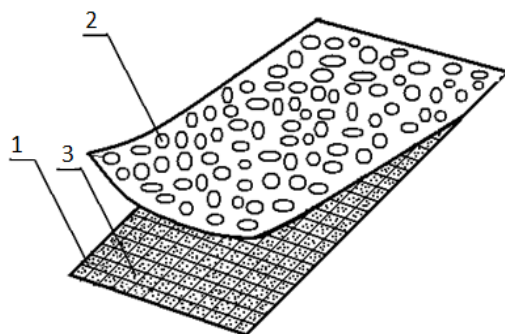


Рис. 1. Схематическое представление трехкомпонентной изоляции двухслойной лентой

Наиболее распространенный подход при моделировании накопления поверхностного заряда на границе раздела двух диэлектрических сред основан на теории Максвелла – Вагнера для межфазной поляризации [8].

Гипотетическая конфигурация границы раздела двух плоских изотропных диэлектриков с электродами представляется конденсатором Максвелла (рис. 2). В такой системе свойства изоляции изменяются в зависимости от ступенчатой функции на границе раздела сред [8].

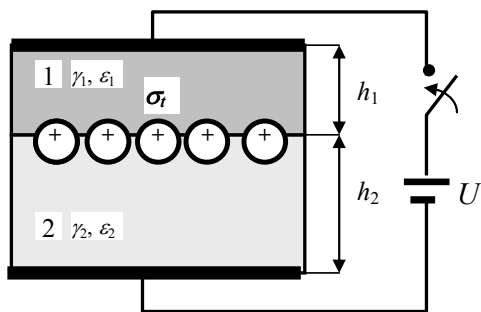


Рис. 2. Представление накопления поверхностных зарядов на границе раздела двух изотропных диэлектриков при включении под постоянное напряжение U

На поверхности раздела диэлектриков диэлектрическая проницаемость ϵ (или вектор поляризации) изменяется скачкообразно [8, 9]. Скачок нормальной составляющей вектора электрического смещения D равен поверхностной плотности σ электрических зарядов. Тангенциальная составляющая вектора напряженности электрического поля непрерывна на любой поверхности раздела сред.

$$D_{2n} - D_{1n} = \sigma, \quad E_{1t} = E_{2t}, \quad (1)$$

где D_{2n}, D_{1n} – нормальные составляющие вектора электрического смещения: $D_{2n} = \epsilon_0 \epsilon_2 E_{2n}$,

$D_{1n} = \epsilon_0 \epsilon_1 E_{1n}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ_1, ϵ_2 – диэлектрические проницаемости диэлектриков; σ – поверхностная плотность электрических зарядов; E_{1n}, E_{2n} – нормальные, E_{1t}, E_{2t} – тангенциальные составляющие вектора напряженности электрического поля первого и второго диэлектриков соответственно.

В момент включения конденсатора к источнику напряжения U поверхностная плотность σ электрических зарядов равна нулю, в результате в соответствии с (1) напряженность электрического поля в слоях пропорциональна диэлектрической проницаемости [8]

$$E_{1n} \epsilon_1 = E_{2n} \epsilon_2. \quad (2)$$

В следующий момент времени на распределение электрического поля в слоях начинает влиять ток проводимости с соответствующей плотностью J

$$J_1 = \gamma_1 E_1, \quad J_2 = \gamma_2 E_2, \quad (3)$$

где γ_1 и γ_2 – удельные проводимости каждого из диэлектриков, См/м.

Так как плотности токов не равны (электрофизические свойства диэлектриков разные), то на границе раздела диэлектриков накапливается пространственный заряд. Переходный процесс заканчивается при уравнивании токов J_1 и J_2 , а также стабилизации поверхностного заряда на границе раздела диэлектриков. Для установившегося режима напряженность электрического поля в слоях пропорциональна удельной проводимости

$$\gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2. \quad (4)$$

С начального момента и достижения установившегося состояния общий ток в первом и втором диэлектриках одинаков и имеет две составляющие: активную, которая обусловлена током проводимости (током утечки), и реактивную, обусловленная током смещения (током абсорбции). Таким образом, плотность общего тока определяются

$$J = \gamma_1 E_1 + \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{dE_1}{dt} = \gamma_2 E_2 + \epsilon_0 \epsilon_2 \frac{dE_2}{dt}. \quad (5)$$

Сумма падения напряжения на каждом из слоев равна приложенному напряжению на постоянном токе

$$E_1 h_1 + E_2 h_2 = U, \quad (6)$$

где h_1, h_2 – толщина диэлектриков.

При объединении (5) и (6) дифференциальное уравнение относительно E_1 имеет вид

$$\frac{dE_1}{dt} \epsilon_0 (\epsilon_1 h_2 + \epsilon_2 h_1) + E_1 (\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1) = \gamma_2 U, \quad (7)$$

решение которого ищется в виде

$$E_1(t) = A e^{-\left(\frac{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1}{\epsilon_0 (\epsilon_1 h_2 + \epsilon_2 h_1)} t\right)} + U \frac{\gamma_2}{(\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1)}, \quad (8)$$

где A – постоянная интегрирования, которая с учетом начальных условий в момент времени $t = 0$ и (2), (6) определяется как

$$A = U \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 h_2 - \epsilon_2 h_1} - \frac{\gamma_2}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} \right). \quad (9)$$

После подстановки (9) в (8) напряженность электрического поля в первом слое двухслойного диэлектрика со временем изменяется в соответствии с (10)

$$E_{1t} = U \frac{\gamma_2}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} + U \frac{h_1 \cdot (\varepsilon_2 \gamma_1 - \varepsilon_1 \gamma_2)}{(\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1) \cdot (\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1)} e^{-t/\tau}, \quad (10)$$

во втором – в соответствии с (11)

$$E_{2t} = U \frac{\gamma_1}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1} + U \frac{d_2 \cdot (\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1)}{(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1) \cdot (\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1)} e^{-t/\tau}, \quad (11)$$

где τ – постоянная времени, с

$$\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1}. \quad (12)$$

Плотность общего тока, которая состоит из тока абсорбции и утечки, обусловленного наличием свободных зарядов, определяется по формуле (13)

$$J(t) = U \frac{h_1 h_2 (\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1)}{(\varepsilon_1 h_2 + \varepsilon_2 h_1)^2 (\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1)} \times \exp(-t/\tau) + U \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} = J_{abs} + J_{cond}. \quad (13)$$

Изменение во времени плотности поверхностных зарядов $\sigma(t)$ на границе раздела двух диэлектриков может быть записано в виде

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1}{\gamma_1 h_2 + \gamma_2 h_1} \cdot U (1 - e^{-t/\tau}). \quad (14)$$

Влияние электрофизических характеристик и толщины диэлектрического барьера на распределение электрического поля в высоковольтной композитной изоляции. На рис. 3 представлены результаты моделирования для двух случаев: кривые 1 – идентичности электрофизических характеристик барьера и подложки: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 4,5$; $\gamma_1 = \gamma_2 = 2 \cdot 10^{-13}$ См/м; кривые 2, 2' – разных: $\varepsilon_1 = 4,5$; $\varepsilon_2 = 3,8$; $\gamma_1 = 2 \cdot 10^{-13}$ См/м, $\gamma_2 = 2 \cdot 10^{-12}$ См/м. Индексы 1 относятся к барьеру, 2 – к подложке. Толщина диэлектрического барьера равна $h_1 = 0,1$ мм, стекловолнистой подложки – $h_2 = 0,05$ мм. Кривая 2 соответствует распределению электрического поля в барьере, кривая 2' – в подложке (рис. 3,б). Расчеты выполнены для средней напряженности электрического поля $E_{mid} = 15$ кВ/мм в композитной изоляции.

При идентичности электрофизических характеристик поверхностные заряды не накапливаются на границе раздела диэлектрических сред (кривая 1 рис. 3,а) и напряженность электрического поля равна среднему значению: $E = E_{mid} = 15$ кВ/мм (кривая 1 рис. 3,б). Переходный процесс – отсутствует.

В случае разных характеристик наблюдается переходный процесс длительностью порядка 10 с. В установившемся режиме поверхностная плотность зарядов составляет $0,85$ мКл/м² (кривая 2 на рис. 3,а), напряженность электрического поля в диэлектрическом барьере превышает среднее значение на 50 % (кривая 2 на рис. 3,б), в подложке – ничтожно мала (кривая 2' на рис. 3,б).

На рис. 4 показана динамика изменения во времени распределения электрического поля при варьировании удельной проводимости, относительной диэлектрической проницаемости и толщины диэлектрического барьера.

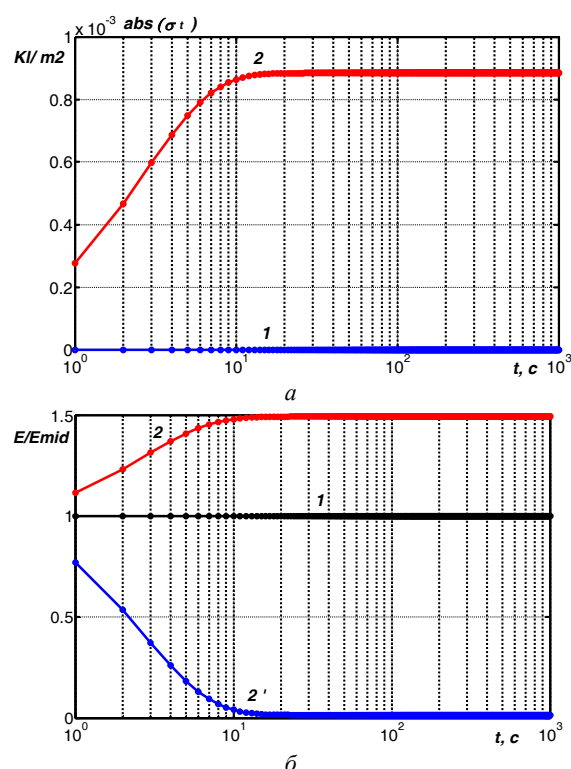


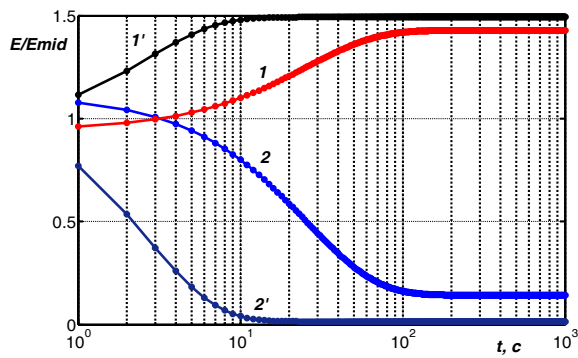
Рис. 3. Распределение плотности поверхностных зарядов (а) и напряженности электрического поля (б) на границе раздела подложка – диэлектрический барьер

На рис. 4,а,б кривые 1 и 2 соответствуют: $\varepsilon_1=4,5$, $\varepsilon_2=3,8$, $\gamma_1 = 2 \cdot 10^{-13}$ См/м, $\gamma_2 = 2 \cdot 10^{-12}$ См/м; кривые 1' и 2' – $\varepsilon_1 = 4,5$, $\varepsilon_2=3,8$, $\gamma_1 = 2 \cdot 10^{-13}$ См/м, $\gamma_2 = 2 \cdot 10^{-11}$ См/м соответственно. Толщина диэлектрического барьера принята равной $h_1 = 0,1$ мм, подложки – $h_2 = 0,05$ мм. Долевое содержание слюды в данном случае составляет 67 % от общего объема композитной изоляции.

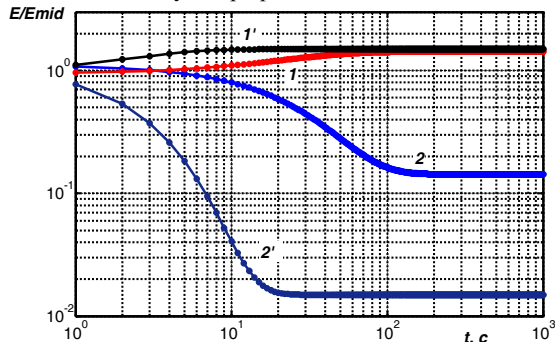
Влияние на распределение электрического поля относительной диэлектрической проницаемости и толщины барьера показано на рис. 4,в. Кривые 1 и 2 соответствуют характеристикам: $\varepsilon_1=4,5$, $\varepsilon_2=3,8$, $\gamma_1 = 2 \cdot 10^{-13}$ См/м, $\gamma_2 = 2 \cdot 10^{-12}$ См/м, $h_1 = 0,1$ мм, $h_2 = 0,05$ мм. Кривые 1' и 2': $\varepsilon_1=3,8$, $\varepsilon_2=4,5$, $\gamma_1 = 2 \cdot 10^{-13}$ См/м, $\gamma_2 = 2 \cdot 10^{-12}$ См/м; $h_1 = 0,1$ мм, $h_2 = 0,05$ мм. Кривые 1'' и 2'': $\varepsilon_1=4,5$, $\varepsilon_2=3,8$, $\gamma_1 = 2 \cdot 10^{-13}$ См/м, $\gamma_2 = 2 \cdot 10^{-12}$ См/м, $h_1 = 0,05$ мм, $h_2 = 0,1$ мм.

В области малых времен переходного процесса (10 мс – 1 с) на характер распределения электрического поля существенное влияние оказывает соотношение между диэлектрическими проницаемостями барьера и подложки при их неизменной толщине. В случае, когда $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$, напряженность электрического поля в барьере превышает среднее значение в 1,05, в то время как в подложке – в 1,1 раза соответственно (сравни кривые 1' и 2 рис. 4,в). Данный факт особенно важен при работе под переменным напряжением: диэлектрический барьер обеспечивает длительную электрическую прочность композитной изоляции.

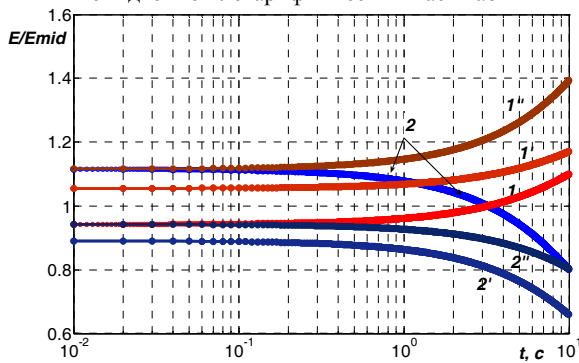
Уменьшение толщины диэлектрического барьера (долевого содержания) при условии, что $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, приводит к повышению напряженности электрического поля, хотя и «разгружает» в электрическом отношении подложку (сравни кривые 1'' и 1' рис. 4,в).



а – полулогарифмический масштаб



б – двойной логарифмический масштаб



в – полулогарифмический масштаб

Рис. 4. Влияние на распределение электрического поля электрофизических характеристик и толщины компонентов на границе раздела подложка – диэлектрический барьер

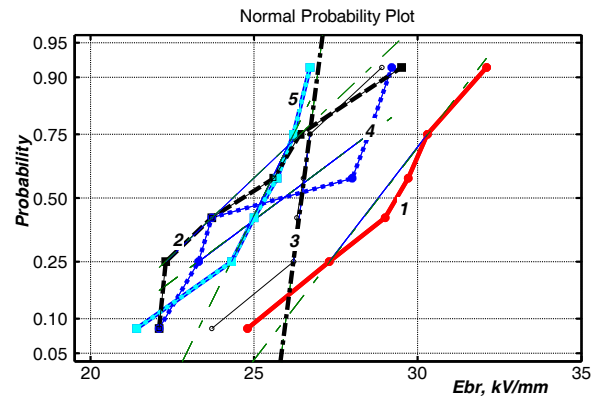
Экспериментальная проверка влияния долевого содержания слюдобумажной ленты на длительную электрическую прочность образцов композитной высоковольтной изоляции. Для опробования лент в отвержденном состоянии изготовлено по 5 макетов с каждой стеклослюдобумажной лентой разной толщины разных производителей: 1 – $h = 0,15$ мм, 2 – $h = 0,14$ мм, 3 – $h = 0,14$ мм, 4 – $h = 0,18$ мм, 5 – $h = 0,18$ мм.

Макеты представляют медные шины размером $6 \times 30 \times 800$ мм, которые изолированы на лентоизолирующем станке ЛИСП-4 с подогревом ленты до температуры $50-60$ °С и натяжением $40-60$ Н. Макеты, закрытые планками по широким граням, опрессованы гидростатическим способом. Длительная электрическая прочность готовых макетов определена при непрерывной выдержке под напряжением из расчета 15 кВ/мм промышленной частоты.

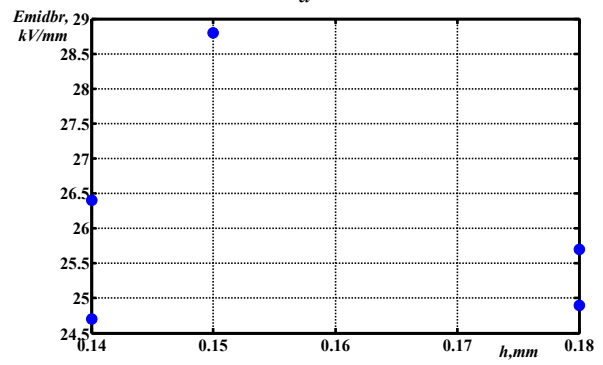
Корректность адекватности результатов моделирования на постоянном токе экспериментальными исследованиями на переменном допустима, т.к. в области малых времен переходного процесса проявляется влияние, как электрофизических характеристик, так и долевого содержания диэлектрического барьера

на распределение электрического поля в композитной изоляции (см. рис. 4,а-в) [длительная электрическая прочность на переменном токе частоты 50 Гц меньше в сравнении с постоянным за счет больших потерь, обусловленных процессом поляризации].

На рис. 5 приведены результаты испытаний длительной электрической прочности макетов в зависимости от толщины композитной изоляции. Интегральные функции распределения длительной электрической прочности приведены на рис. 5,а, средние значения – на рис. 5,б.



а



б

Рис. 5. Влияние слюдинитового барьера на длительную электрическую прочность композитной высоковольтной изоляции электрических машин

Наименьший разброс значений пробивной электрической прочности имеют системы изоляции толщиной $h = 0,14$ мм (кривая 3 рис. 5,а), что может быть связано с более равномерной толщиной стеклослюдобумажной ленты за счет применения другого типа связующего. Наклон интегральной функции распределения электрической прочности макетов с данной системой изоляции существенно отличается от остальных (сравни кривую 3 с кривыми 1, 2, 4, 5 на рис. 5,а).

Для образца толщиной композитной изоляции $h = 0,15$ мм (кривая 1 рис. 5,а) наблюдается наибольшее значение длительной электрической прочности: на уровне 50% вероятности среднее значение равно $28,75$ кВ/мм (рис. 5,б). В данном макете применена лента с повышенным содержанием слюдинитового барьера и стеклоткань меньшей толщины (в соответствии с техническим описанием на ленту).

Выводы. Впервые получено распределение электрического поля в высоковольтной композитной изоляции электрических машин на основе предложенной математической модели накопления поверхностного заряда на плоской границе раздела подложка – диэлектрический барьер.

Установлено, что в установившемся режиме напряженность электрического поля в барьере превышает среднее значение на 50 % в зависимости от электрофизических характеристик и толщины компонентов.

В области малых времен переходного процесса (до 1 с) существенное влияние на характер распределения электрического поля в композитной изоляции оказывает относительная диэлектрическая проницаемость барьера. Применение диэлектрического барьера с большей диэлектрической проницаемостью и долевым содержанием в сравнении с подложкой приводит к увеличению на 5 % напряженности электрического поля относительно среднего значения.

Экспериментальные исследования длительной электрической прочности макетов стеклослюдобоужных лент в отвержденном (термореактивном) состоянии согласуются с результатами моделирования.

Композитная изоляция на основе стеклослюдиновой ленты с повышенным содержанием слюдинитового барьера и стеклотканью меньшей толщины имеет на (8 – 16) % более высокие значения длительной электрической прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 / В.Г. Огоньков и др.; под ред. В.Г. Огонькова, С.В. Серебрянникова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 304 с.
2. Пак В.М., Трубочев С.Г. Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 416 с.
3. Ребиндер П.А. О влиянии изменений поверхностной энергии на спайность, твердость и другие свойства кристаллов // Съезд русских физиков. Перечень докладов, представленных на съезд, с кратким их содержанием. – М. – Л.: ГИЗ, 1928. – С. 29.
4. Гиббс Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика. – М.: Наука, 1982. – 584 с.
5. Михайлов В.М. Исходные соотношения и приближенные граничные условия для расчета поля в системах с тонкими слоями // Электричество. – 2007. – №3. – С. 49-55.
6. Ким Ен Дар, Калмыков В.Л. Исследование электрического поля изоляционной конструкции с тонкими протяженными областями // Вестник НТУ «ХПИ». – 2005. – №42. – С. 65-70.
7. Безпрозванных А.В., Бойко А.Н. Распределение плотности поверхностных зарядов на границе раздела контактирующих изолированных проводников // Технічна електродинаміка. – 2014. – №6. – С. 18-23.
8. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 439 с.
9. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.

REFERENCES

1. Ogonkov V.G., Serebryannikov S.V. *Elektroizoliatsionnye materialy i sistemy izoliatsii dlia elektricheskikh mashin. V dvukh knigakh. Kn. 2* [Electrical insulation materials and insulation systems for electrical machines. In 2 books. Book 2]. Moscow, Publishing house MEI, 2012. 304 p. (Rus).
2. Pak V.M., Trubachev S.G. *Novye materialy i sistemy izoliatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin* [New materials and systems for isolation of high-voltage electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2007. 416 p. (Rus).
3. Rebinder P.A. *O vliianii izmenenii poverkhnostnoi energii na spainost', tverdst' i drugie svoistva kristallov* [On the effect of changes in surface energy on the cleavage, hardness and other properties of crystals]. Congress of Russian physicists. The list of reports submitted to the congress, with a brief summary. Moscow - Leningrad, 1928. 29p. (Rus).
4. Gibbs J.V. *Termodinamika. Statisticheskaya mekhanika*

[Thermodynamics. Statistical mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 584 p. (Rus).

5. Mikhailov V.M. Initial relations and approximate boundary conditions for calculating the field in systems with thin layers. *Electricity*, 2007, no.3, pp. 49-55. (Rus).
6. Kim Yong Dar, Kalmykov V.L. Study of the electric field of an insulating structure with thin extended areas. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2005, no.42, pp. 65-70. (Rus).
7. Bezprozvannykh G.V., Boyko A.N. Distribution of surface density of charges on the interface between contacting isolated conductors of the cables. *Technical Electrodynamics*, 2014, no.6. pp. 18-23. (Rus).
8. Hippel A.R. *Dielektriki i volny* [Dielectrics and waves]. Moscow, Publ. House of Foreign Literature, 1960. 439 p. (Rus).
9. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: V 3-kh t. Uchebnik dlia vuzov* [Theoretical bases of electrical engineering. In 3 vols.]. St. Petersburg, Piter Publ, 2003. 463 p. (Rus).

Поступила (received) 14.07.2018

Безпрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
Бойко Антон Николаевич², к.т.н.,

Рогинский Александр Владимирович³, аспирант,

¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

² Компания «WebMeridian в Украине»,
61002, Харьков, ул. Чернышевского, 13,

³ Государственное предприятие «Завод «Электротряжмаш»,
61089, Харьков, Московский проспект, 299,
e-mail: roginский.av@gmail.com

G.V. Bezprozvannykh¹, A.N. Boyko², A.V. Roginsky³

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² Company «WebMeridian in Ukraine»,
13, Chernyshevskogo Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

³ SE Plant Elektrotyazhmash,
299, Moskovsky Ave., Kharkiv, 61089, Ukraine.

Effect of a dielectric barrier on the electric field distribution in high-voltage composite insulation of electric machines.

Introduction. Modern high-voltage systems for composite insulation of electrical machines consist of tape glass mica paper materials (dry or pre-impregnated). The electrical characteristics of a multilayer composite insulation system are determined by both the fractional content of the individual components and their electrophysical properties. **Purpose.** The analysis of the influence of electrophysical characteristics and thickness (fraction) of the dielectric barrier on the distribution of the electric field in the composite high-voltage insulation of electrical machines. **Methodology.** Simulation of surface charge accumulation at the interface between the substrate and the dielectric barrier is based on the Maxwell–Wagner theory for interfacial polarization. **Practical value.** The influence of the electrophysical characteristics and thickness of the dielectric barrier on the distribution of the electric field has been established. In the steady state, the electric field strength in the dielectric barrier exceeds the average value by 50 %. In the region of small transition times (up to 1 s), the relative dielectric constant of the barrier has a significant effect on the distribution of the electric field. The use of a dielectric barrier with a higher dielectric constant and fractional content in comparison with the substrate leads to an increase in electric field strength by 5 % relative to the average value in composite insulation. Experimental studies of the long-term electrical strength of glass mica-belt ribbons in the cured (thermosetting) state are consistent with the simulation results. Composite insulation based on glass fiber mica tape with a high content of the mica barrier and fiberglass of smaller thickness has (8-16) % higher values of long-term electric strength. References 9, figures 5.

Key words: high-voltage composite insulation, dielectric barrier, fiberglass substrate, interfacial polarization, electric field distribution, long-term electrical strength.