

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОВОДА ПЭЭИДХ – 0,63

Виконано аналіз результатів контролю напруги пробоя емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів.

Виконан аналіз результатів контролю напруги пробоя емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Эмальпровод с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров – один из наиболее современных инновационных продуктов отечественного производства проводов для обмоток электрических машин и аппаратов. Достигнутый для этих проводов уровень электрической прочности эмальизоляции соответствует мировым стандартам. И главной технологической проблемой при освоении такой продукции является минимизация дисперсии значений пробивного напряжения $U_{пр}$ (далее U), что требует применения статистических методов контроля дисперсии этого параметра.

Изоляция провода ПЭЭИДХ является многослойной, состоящей, например, из десяти слоев полиэфиримидного полимера (ПЭИ) и четырех слоев полиамидимидного полимера (ПАИ). Двухслойной ее называют условно, поскольку она состоит из двух различных полимерных материалов. Особенностью слоистой изоляции при внесении в электрическое поле является присущий именно ей переходной процесс накопления слабо связанных зарядов диэлектрика на границе раздела материалов с различными электрофизическими характеристиками. Этот процесс (миграционная поляризация) обуславливает протекание через изоляцию дополнительного тока. Ток миграционной поляризации медленнее, чем другие поляризационные токи, спадает во времени, и, во-вторых, на него сильно влияют технологические факторы, например, степень полимеризации, наличие остатков растворителя и т.п. Поэтому учет миграционных токов необходим при проведении электрических испытаний изоляции и при анализе формирования электрофизических параметров изоляции в процессе эмалирования.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Расчетные соотношения для электрофизических характеристик двухслойного диэлектрика в однородном электрическом поле известны [1], они использованы при анализе тока через двухслойную изоляцию эмальпроводов в [2].

Два фактора не позволяют использовать эти решения непосредственно:

1) Провод ПЭЭИДХ – 0,63 относится к той части серии проводов ПЭЭИДХ, которая характеризуется сравнительно большими значениями диаметра проволоки и диаметральной толщины изоляции. Поэтому допущение в [1] об одинаковой площади поперечного сечения слоев диэлектрика с различными электрофизическими

зическими свойствами для них неверно, а влияние этого различия на характеристики готового провода, как минимум, требует проверки.

2) Для поставленной задачи, а именно, – исследования связи вида и размеров дефектов поверхности медного проводника с напряжением пробоя $U_{пр}$ эмалевого покрытия, целесообразно оценить такую связь в процессе нанесения слоев эмали. Очевидно, что влияние вида и размеров дефектов поверхности медного проводника на напряжение пробоя $U_{пр}$ сильно зависит от толщины и свойств слоя эмали. Чтобы учесть последнее обстоятельство необходима модель, позволяющая учесть, как минимум, три слоя эмали с различными электрофизическими свойствами.

Цель работы – разработка модели слоистого диэлектрика эмальпровода ПЭЭИДХ, учитывающей неоднородность электрического поля и наличие трех слоев диэлектрика с различными электрофизическими свойствами.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходные положения модели:

1) Электрическое поле в слоях диэлектрика радиальное. То есть силовые линии поля перпендикулярны границам раздела диэлектриков с различными электрофизическими свойствами. Следовательно, возможное преломление силовых линий поля на границе раздела сред, например из-за эксцентриситета эмалевого покрытия, не учитывается.

2) Диэлектрик в пределах одного слоя однородный. Следовательно, влияние неоднородностей в пределах одного слоя диэлектрика, которое может быть весьма существенным для эмали после прохождения первых калибров маршрута, в данной модели не учитывается.

Таким образом, общее в известной [1] и предложенной моделях следующее:

1) Диэлектрик в пределах одного слоя однородный.

2) Возможное преломление силовых линий поля на границе раздела сред не учитывается.

3) Емкость и сопротивление в каждом слое диэлектрика соединены параллельно, а слои диэлектрика с различными электрофизическими свойствами соединены последовательно. Соответственно исходные соотношения для плотности тока через слои диэлектрика и разности потенциалов, к нему приложенной:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot E_i + \varepsilon_i \cdot \frac{dE_i}{dt} = 0; & (1) \\ \sum_{i=1}^n U_i = U; & (2) \end{cases}$$

где n – количество слоев диэлектрика; ε_i, γ_i – диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость i -го слоя; E_i, U_i – напряженность электрического поля и напряжение для i -го слоя; t – время от момента включения постоянного напряжения.

Если для двух соседних слоев отношение диэлектрических проницаемостей слоев $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ не равно отношению удельных проводимостей соответствующих слоев γ_2/γ_1 , то плотности токов утечки в соседних слоях неодинаковы, что приводит к накоплению свободных зарядов на границе между слоями.

Создание заряда на границе между слоями связано с появлением соответствующего зарядного тока, определяющегося скоростью переходного процесса. Характеристикой длительности переходного процесса является время релаксации миграционной поляризации τ .

Решение системы уравнений (1) и (2) для двухслойной изоляции в однородном электрическом поле и одинаковой площади поперечного сечения слоев известно и для времени релаксации миграционной поляризации τ составляет:

$$\tau = (d_1\varepsilon_2 + d_2\varepsilon_1) / (d_1\gamma_2 + d_2\gamma_1). \quad (3)$$

Это соотношение использовано нами для проверки приемлемости представления изоляции эмальпровода ПЭЭИДХ2-200 в виде двухслойного плоского диэлектрика. Отличие электрического поля в двухслойной эмальизоляции от плоского (модель (3)) в том, что это радиальное поле и площади поперечного сечения соседних слоев различны. Особенно существенно это различие для провода ПЭЭИДХ2-200, в котором толщины слоев основного и покровного лаков значительно отличаются друг от друга. Причем указанное различие изменяется в процессе эмалирования.

Для этого система уравнений (1), (2) записана для двух слоев изоляции с различными электрофизическими характеристиками в радиальном электрическом поле:

$$\begin{cases} \gamma_1 \cdot E_1 + \varepsilon_1 \cdot \frac{\partial E_1}{\partial t} = \gamma_2 \cdot E_2 + \varepsilon_2 \cdot \frac{\partial E_2}{\partial t}; & (4) \\ U = E_1 \cdot r \cdot \ln[(r + d_1)/r] + E_2 \cdot (r + d_1) \times \\ \times \ln[(r + d_1 + d_2)/(r + d_1)]; & (5) \end{cases}$$

где E_1, E_2 – максимальные напряженности электрического поля в первом и втором слоях эмальизоляции; $\gamma_1, \varepsilon_1, \gamma_2, \varepsilon_2$ – удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость, соответственно, первого и второго слоев эмальизоляции; r – радиус медного проводника; d_1, d_2 – толщина, соответственно, первого и второго слоев эмальизоляции; U, t – напряжение и время от момента включения напряжения.

Система уравнений (4), (5) приводит к дифференциальному уравнению относительно максимальной напряженности электрического поля E_1 в первом слое:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_1}{\partial t} \cdot \{ \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \cdot [r \cdot \ln[(r + d_1)/r] / (r + d_1) \times \\ \times \ln[(r + d_1 + d_2)/(r + d_1)]] + \\ + E_1 \cdot \{ \gamma_1 + \gamma_2 \cdot [r \cdot \ln[(r + d_1)/r] / (r + d_1) \times \\ \times \ln[(r + d_1 + d_2)/(r + d_1)]] \} = \\ = \gamma_2 \cdot U / (r + d_1) \cdot \ln[(r + d_1 + d_2)/(r + d_1)]. \end{aligned} \quad (6)$$

откуда время релаксации миграционной поляризации τ для двухслойной изоляции с различными электрофизическими характеристиками в радиальном электрическом поле:

$$\begin{aligned} \tau = \{ \varepsilon_1 \cdot (r + d_1) \cdot \ln[(r + d_1 + d_2)/(r + d_1)] + \\ + \varepsilon_2 \cdot [r \cdot \ln[(r + d_1)/r]] / \{ \gamma_1 \cdot (r + d_1) \times \\ \times \ln[(r + d_1 + d_2)/(r + d_1)] + \gamma_2 \cdot [r \cdot \ln[(r + d_1)/r]] \}. \end{aligned} \quad (7)$$

Очевидно, что формулы (3) и (7) дают практически одинаковые результаты в тех случаях, когда в радиальном и плоском электрических полях площади поперечного сечения соседних слоев отличаются незначительно или различие соотношения площадей и электрофизических характеристик компенсируют друг друга. Это иллюстрирует рис. 1, на котором приведены значения относительной погрешности при расчете с помощью (3) при нанесении основного лака (ПАИ). Такая погрешность не превышает минус 0,5 %.

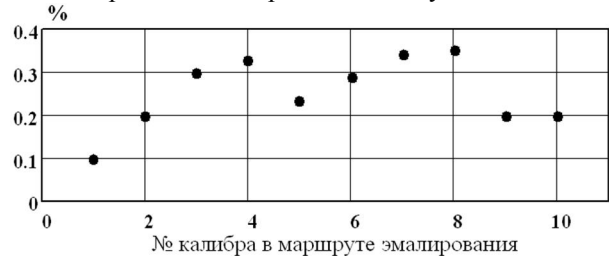


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности при расчете времени релаксации миграционной поляризации τ с помощью (3) при нанесении основного лака (ПАИ) для провода ПЭЭИДХ2 – 200 – 0,63 в процессе эмалирования

Для готового провода ПЭЭИДХ2 – 200 – 0,63 (основной и покровный лак, полностью полимеризованные) относительной погрешности при расчете времени релаксации миграционной поляризации τ с помощью (3) значительно больше и составляет минус 7 %. Таким образом, при расчете τ для проводов с двойной эмальизоляцией следует использовать соотношение (7). Очевидно, что погрешность растет с увеличением диаметра провода. Это означает недооценку величины тока через изоляцию в процессе высоковольтных испытаний постоянным напряжением на проход.

Для анализа изменения свойств слоя эмали в течение маршрута эмалирования необходима модель, позволяющая учесть, как минимум, три слоя эмали с различными электрофизическими свойствами. Для определения времени релаксации миграционной поляризации τ решением системы двух уравнений (1) и (2) для трех слоев можно использовать известное соотношение [3]:

$$\sum d_i/\gamma_i \cdot (1 - \varepsilon_i/\gamma_i \cdot \tau) = 0, \quad i \in \{1; 2; 3\}. \quad (8)$$

Подобные уравнения можно составить для произвольного количества слоев эмали, если это технически целесообразно.

Из (8) определены расчетные значения τ эмальизоляции после калибров маршрута, на которых нано-

сится покровный лак (№ 11 – № 14). На рис. 2 приведены результаты расчета времени релаксации миграционной поляризации τ в процессе эмалирования для провода ПЭЭИДХ2 – 200 – 0,63 с помощью (7) (калибры № 2 – № 10) и (8) (калибры № 11 – № 14 $\varepsilon_3/\varepsilon_0 = 5$; $\gamma_3 = 10^{-9}$ См/м). На график нанесено произведение емкости изоляции на ее сопротивление после прохождения первого калибра (однослойная изоляция).

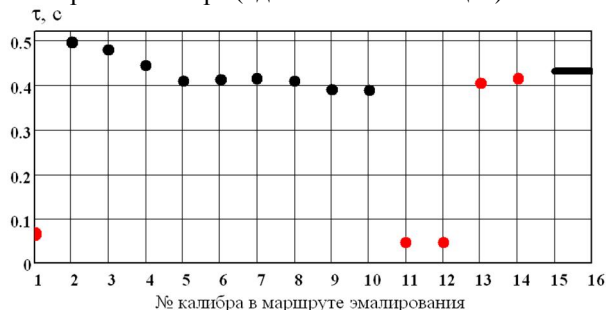


Рис. 2. Зависимость времени релаксации миграционной поляризации τ для провода ПЭЭИДХ2 – 200 – 0,63 в процессе эмалирования: № 1 – измеренное значение RC после первого калибра; № 2 – № 10 нанесение полиэфиримидного полимера (ПЭИ): $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = 3,5$; $\gamma_1 = 10^{-12}$ См/м; № 11 – № 14 нанесение полиамидимидного полимера (ПАИ): $\varepsilon_2/\varepsilon_0 = 4,2$; $\gamma_2 = 10^{-10}$ См/м; прямая – значение τ для готового провода

Динамика изменения времени релаксации миграционной поляризации отражает изменение электрофизических свойств изоляции в процессе эмалирования. По мере нанесения основного лака (ПЭИ) с высокими электроизоляционными свойствами, время релаксации остается высоким, постепенно снижаясь за счет нанесения слоев лака, содержащих остатки растворителя и недостаточно полимеризованных. После нанесения покровного лака (ПАИ) с менее высокими электроизоляционными свойствами, время релаксации резко снижается (несколько сотых долей секунды) и повышается за счет полимеризации покровного лака и соответственно повышения его электроизоляционных свойств.

Резкое повышение после калибра № 12 почти до уровня, характерного для готового провода свидетельствует о формировании границы раздела между двумя используемыми полимерами по мере полимеризации покровного лака. Роль границы раздела заключается в перераспределении зарядов в течение переходного процесса миграционной (междуслойной) поляризации между двумя слоями. На этой границе раздела различие между электроизоляционными свойствами соседних слоев наибольшее.

ВЫВОДЫ

На основе разработанной модели изменения электрофизических параметров изоляции в процессе эмалирования выполнен общий анализ динамики изменения τ в течение процесса эмалирования провода ПЭЭИДХ2-200 – 0,63. При этом принято, что слой лака, нанесенный последним, существенно отличается по электрофизическим характеристикам от предыдущих слоев, которые принимаем полностью отвержденными. Очевидно, что на самом деле отверждение

эмальлака происходит в течение всего маршрута и электрофизические параметры изменяются постепенно. Поэтому принятые в этих расчетах электрофизические параметры материалов с помощью предложенной модели могут быть проверены экспериментально. Это позволит:

1) Оценить уровень тока через изоляцию при испытаниях высоким постоянным напряжением на проход, поскольку значение τ является параметром известной экспоненциальной модели для тока миграционной поляризации.

2) Оценить влияние электрофизических свойств используемых при нанесении двухслойной изоляции полимеров на электрофизические параметры провода.

3) Оценить оптимальные параметры испытаний высоким постоянным напряжением на проход, которые для провода ПЭЭИДХ2 являются основными неразрушающими испытаниями в процессе технологии его изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканава Г.И. Физика диэлектриков / Сканава Г.И. – М.: Физматгиздат, 1958. – 908 с.
2. Голик О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмальизоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход / О.В. Голик // Український метрологічний журнал. – Харків, 2009. – № 1. – С. 12-17.
3. Харитонов Е.В. Диэлектрические материалы с неоднородной структурой. / Харитонов Е.В. – М.: Радио и связь, 1983. – 127 с.

Bibliography (transliterated): 1. Skanavi G.I. Fizika di'elektrikov / Skanavi G.I. - M.: Fizmatizdat, 1958. - 908 s. 2. Golik O.V. Issledovanie defektnosti nagrevostojkih provodov s dvojnnoj poliimidnoj `emal'izolyaciej pri ispytaniyah vysokim napryazheniem na prohod / O.V. Golik // Ukraїns'kij metrologičnij zhurnal. - Harkiv, 2009. - № 1. - S. 12-17. 3. Haritonov E.V. Di'elektricheskie materialy s neodnorodnoj strukturoj. / Haritonov E.V. - M.: Radio i svyaz', 1983. - 127 s.

Поступила 11.05.2013

Гурин Анатолий Григорьевич, д.т.н., проф.,
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
кафедра "Электроизоляционной и кабельной техники"
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
тел. (057) 7076663, e-mail: AGurin@kpi.kharkov.ua

Антонец С.Ю.
Публичное акционерное общество "Завод Южкабель"
61099, Харьков, ул. Автогенная, 7
тел.(057) 7545248
e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua

Gurin A.G., Antonets S.Yu. Experimental research on dielectric strength of PEEIDH-0.63 wire.

Monitoring data on the breakdown voltage of an enameled wire with double polyimide interpolymer insulation are analyzed.

Key words – experimental research, enameled insulated wire, dielectric strength, voltage monitoring.