

**С.Ю. АНТОНЕЦ**, инженер-технолог, ЗАТ «Завод Південкабель», Харьков;  
**Л.А. ЩЕБЕНЮК** к.т.н., проф., НТУ «ХПИ»

### К РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛЬПРОВОДА С ИЗОЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДНЫХ СОПОЛИМЕРОВ

Выполнено моделирование электрического поля в эмальизоляции, оценен размер области концентрации напряженности вокруг дефекта поверхности проводника. Новые для отечественной промышленности эмальпровода с изоляцией из полиимидных сополимеров имеют очень высокие электрофизические характеристики, в том числе, высокий уровень пробивных напряжений.

**Ключевые слова:** эмальпровод, дефект медного провода, напряженность электрического поля.

**Постановка проблемы.** Для изоляции эмальпроводов практически не пользуются понятием напряженности электрического поля: определяют экспериментально и нормируют пробивное напряжение [1]. Такой подход обусловлен опытом и объясним теоретически тем, что при толщинах изоляции, как минимум на порядок меньших радиуса кривизны электрода, и отсутствии закраин, электрическое поле в изоляции близко к однородному. Новые для отечественной промышленности эмальпровода с изоляцией из полиимидных сополимеров, имеют очень высокие электрофизические характеристики, в том числе, высокий уровень пробивных напряжений. Одновременно возник вопрос о влиянии локальных неоднородностей поверхности проволоки на пробивное напряжение, поскольку разброс значений пробивных напряжений значителен [2].

**Анализ литературы.** В фундаментальных исследованиях пробоя диэлектриков мерой электрической прочности, являющейся физической характеристикой материала, принимают напряженность электрического поля при пробивном напряжении, измеренном в однородном электрическом поле [3]. Испытания для определения напряжения пробоя (breakdown voltage  $U$ ) эмальпроводов с изоляцией на основе полиимидных сополимеров в европейской лаборатории [1] свидетельствуют о том, что одной из основных причин нестабильности

© С.Ю. Антоненц, Л.А. Щебенюк, 2014

$U$  является состояние поверхности медного проводника перед эмальированием. Поэтому оценка напряженности электрического поля у дефектов поверхности медного проводника является необходимым этапом в анализе причин значительного разброса значений пробивных напряжений изоляции эмальпроводов.

**Цель работы.** Экспериментальное исследование дефектов поверхности проводника эмальпровода ППЭИДХ – 0,56 и оценка напряженности электрического поля у типичных дефектов поверхности.

**Основные результаты.** Выполнены исследования поверхности медного проводника эмальпровода марки ППЭИДХ – 0,56 по мере прохождения маршрута эмальирования при наложении основного (полиэфиримидного, ПЭИ) эмальлака. Данные после выхода из первых четырех калибров маршрута эмальирования, после которых толщина высушенного лака не превышает 6 мкм и его прозрачность достаточна для детального исследования поверхности проволоки с помощью металлографического микроскопа, позволили все неровности поверхности провода разделить на четыре основные группы: 1) наиболее типичная, представляющая собой следы волочения проволоки – продольные бороздки шириной от 10 мкм до 50 мкм (чаще большие значения) и глубиной до приблизительно 5 мкм; 2) отдельные овальные и овально-продолговатые углубления глубиной до 5 мкм (названные нами «раковины») и размером до 0,002 мм<sup>2</sup>; 3) волнообразные поперечные неровности на поверхности меди с высотой «волны», не превышающей (2 – 3) мкм, покрывающие поверхность провода своеобразной «рябью»; 4) медная пыль, не превышающая размером 1 мкм.

Наиболее типичной и одновременно имеющей наибольший размер выбрана полу-цилиндрическая выпуклость, расположенная параллельно оси проволоки, радиусом  $\xi = 5 \pm 2$  мкм.

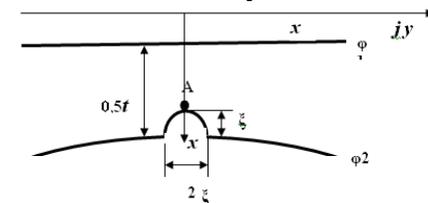


Рис. 1 – Модель типичного дефекта на поверхности проводника в виде полу-цилиндрической выпуклости радиусом  $\xi$ , расположенной параллельно оси проволоки:  $t$  – толщина эмальизоляции

Приведенная на рис. 1 модель использована для расчета максимальной напряженности у дефекта на поверхности проводника в различных реальных расположениях электродов при испытаниях:

1) для случая испытания на скрутках (параллельные одинаковые цилиндры) горизонтальная прямая – ось симметрии поля;

2) для случая испытания на проход в роликовых электродах (цилиндр малого радиуса против цилиндра большого радиуса) горизонтальная прямая – фрагмент цилиндра большого радиуса.

Для модели, представленной на рис. 1 применено известное решение плоской полевой задачи в системе плоскость и параллельный ей цилиндр [4]. Отличие представленной на рисунке модели в том, что проводник, которому принадлежит выступ, также влияет на максимальную напряженность. Если учесть, что таких цилиндрических выступов много и они расположены параллельно, то может быть применена известная модель, с помощью которой определяют максимальную напряженность у жилы, скрученной из одинаковых круглых проволок. Преимущество первой модели в том, что она дает возможность определить напряженность в любой точке пространства вокруг цилиндра, а указанное выше отличие обеспечивает оценку максимальной напряженности снизу. Вторая модель дает возможность определить напряженность в одной точке, самой близкой к внутренней поверхности коаксиального цилиндра, радиус которого больше на толщину изоляции. То есть эта модель обеспечивает оценку максимальной напряженности сверху.

Влияние дефектов поверхности электродов на распределение электрического поля в диэлектрике – классическая задача электростатики, аналитическое решение которой находят с помощью конформных преобразований. Решение в системе плоскость и параллельный ей цилиндр основано на конформном преобразовании системы плоскость и параллельный ей цилиндр, изображенной в комплексной плоскости  $Z(x; jy)$ , с помощью превращения системы координат  $W = 1/Z$  в комплексную плоскость  $W(u; jv)$ :

$$u = x/(x^2 + y^2); v = -y/(x^2 + y^2). \quad (1)$$

При этом условии Коши-Римана о равенстве частных производных выполняется:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2}; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{-2xy}{(x^2 + y^2)^2}, \quad (2)$$

Следовательно, в обеих системах координат разности потенциалов на неограниченно близких расстояниях одинаковы:  $dU = -E_w dW = -E_z dZ$ , откуда неизвестная напряженность электрического поля в

плоскости  $Z$  определяется известной напряженностью в системе двух коаксиальных цилиндров в  $W$ . При этом расположение точек в двух плоскостях различно (см. рис. 2), что необходимо учитывать при определении неизвестной напряженности электрического поля.

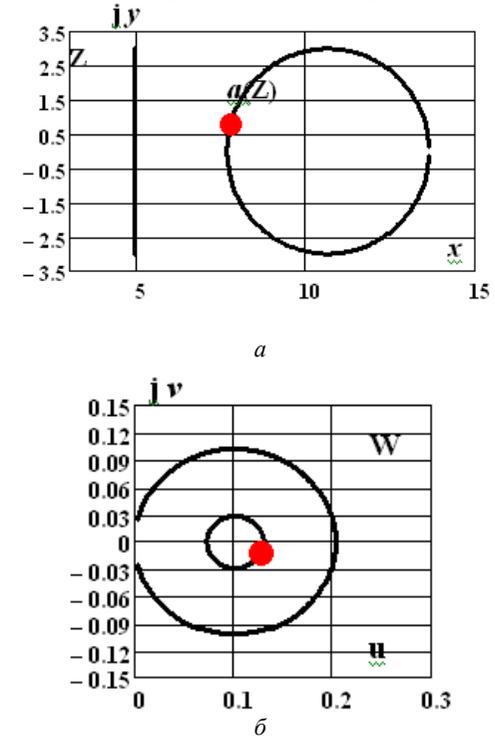


Рис. 2 – Иллюстрация расположения точки  $a$  при преобразовании системы плоскость и параллельный ей цилиндр, изображенной в комплексной плоскости:  $a - Z(x; jy)$  с помощью преобразования системы координат  $W = 1/Z$  в комплексную плоскость  $б - W(u; jv)$

Для определения напряженности в любой точке пространства вокруг цилиндра радиусом  $r$  (например, рис. 1, точка А) важно то, что указанное преобразование позволяет аналитически построить эквипотенциали в плоскости  $Z$  путем двойного комплексного преобразования, что иллюстрирует рисунок 3.

Для модели, изображенной на рис. 1 максимальная напряженность электрического поля при пробивном напряжении

определена соотношением согласно [4] с помощью конформного преобразования:

$$E_{\text{пр}}(\xi) = U_{\text{пр}}/2 \cdot (x_A - a x_A^2) \cdot \ln \{ a / [a^2 - (x_0 + 0,5t)^2 - \xi^2]^{-1} \}^{0,5}, \quad (3)$$

где  $x_A$  – координата точки А, лежащей на оси  $x$  в комплексной плоскости  $Z(x; jy)$ ;  $x_A = x_0 + 0,5t - \xi$ ;

$U_{\text{пр}}$  – пробивное напряжение, определенное экспериментально на двойной толщине эмальизоляции;  $t$  – диаметральной толщина эмальизоляции, определенная экспериментально как разность диаметров проводника и изолированного провода;  $\xi$  – размер типичного дефекта в виде полу-цилиндрической выпуклости, расположенной параллельно оси проволоки;  $x_0$  – расстояние от эквипотенциала  $\varphi^1$  до оси  $jy$ ;  $x_0 = [(0,5t - \xi)^2 - \xi^2]^{0,5}$ ;  $a$  – координата центра коаксиальных окружностей в комплексной плоскости  $W(u; jv)$ , соответствующих эквипотенциалам  $\varphi^1$  и  $\varphi^2$  в комплексной плоскости  $Z(x; jy)$ :

$$a = \{2 \cdot [0,5t - \xi]^2 - \xi^2\}^{-1}. \quad (4)$$

При этом необходимо учитывать, что точки, практически совпадающие на эквипотенциалах в плоскости  $W$  могут иметь различное положение на соответствующей эквипотенциалах в плоскости  $Z$ .

Параметры конформного преобразования различны для разных калибров маршрута, поскольку различна толщина изоляции, от которой зависит положение системы координат в плоскости  $Z$ . Выбор системы координат определен условием совпадения центров окружностей в плоскости  $W$ .

Модель на рис.1 (плоскость и параллельный ей цилиндр) и формула (3) использованы для оценки влияния характерных для данного провода выступов на максимальную напряженность в эмальизоляции, поскольку выступ малого радиуса закругления создает область повышенной напряженности, которая может определять локализацию пробоя и пробивное напряжение.

При допущениях относительно однородности изоляции, малого размера дефекта по сравнению с размером проводника, цилиндрической поверхности дефекта, вероятными являются две различные тенденции относительно влияния его размера на максимальную напряженность электрического поля в точке А.

Первая заключается в том, что чем меньше радиальный размер дефекта, тем концентрация напряженности электрического поля в точке А выше. Вторая заключается в том, что чем меньше радиальный размер дефекта, тем больше, при прочих равных, толщина изоляции у этой точки.

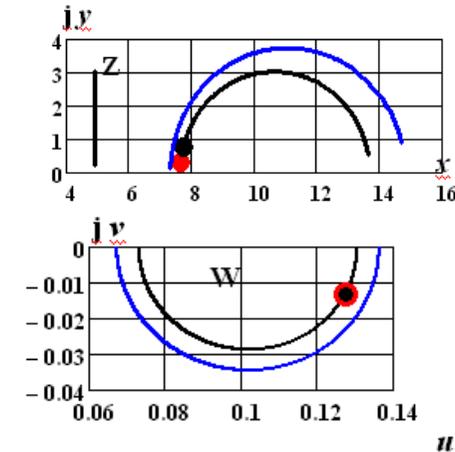


Рис. 3 – Иллюстрация расположения точек на эквипотенциалах при двойном комплексном преобразовании системы плоскость и параллельный ей цилиндр, изображенной в комплексной плоскости  $Z(x; jy)$ , в комплексную плоскость  $W(u; jv)$

На рис. 4 приведены результаты расчетов с помощью (3), выполненные для различных значений размера дефекта (в диапазоне наблюдаемых экспериментально), и для различных экспериментально определенных значений толщины изоляции и пробивного напряжения.

Рисунок 4 отражает указанные тенденции в диапазоне толщин изоляции, нанесенных после калибров № 3 и № 4. Ни одна из указанных тенденций не является преобладающей при значениях  $\xi / 0,5t$  от 0,3 до 0,5.

Важно то, что за пределами значений соотношения  $\xi / 0,5t$  от 0,3 до 0,5 зависимости максимальной напряженности электрического поля при пробое от размера дефекта для различных экспериментально определенных значений толщины изоляции имеют такой характер, который позволяет предположить наличие других тенденций.

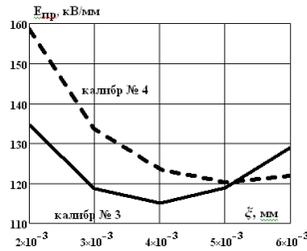


Рис. 4 – Зависимости максимальной напряженности электрического поля при пробое от размера дефекта (модель на рис. 3.8) для различных экспериментально определенных значений толщины изоляции: калибр № 3:  $0.5t = 0,011$  мм; калибр № 4:  $0.5t = 0,015$  мм

Высокие расчетные значения максимальной напряженности электрического поля при пробое для толщины изоляции, равной размеру дефекта (калибр № 2) могут быть объяснены только тем, что первые слои эмали лака обволакивают всю поверхность проводника, примерно повторяя его рельеф.

Таким образом, для однородной изоляции, малого размера дефекта по сравнению с размером проводника, цилиндрической поверхности дефекта, вероятными являются две различные тенденции относительно влияния его размера на максимальную напряженность электрического поля в точке А. Первая заключается в том, что первые слои эмали лака обволакивают всю поверхность проводника, примерно повторяя его рельеф. Тем самым отражается свойство адгезии жидкого лака к медному проводнику.

Вторая отражает влияние дефектов поверхности проводника на напряжение пробоя по мере прохождения маршрута эмалирования.

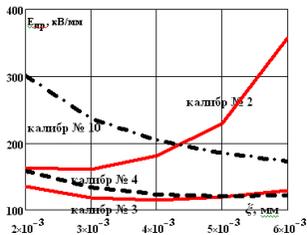


Рис. 5 – Расчетные зависимости максимальной напряженности электрического поля от размера дефекта для различных экспериментально определенных значений толщины изоляции

Расчет максимальной напряженности электрического поля у поверхности проводника с помощью конформного преобразования системы координат позволил проанализировать влияние дефектов поверхности проводника на напряжение пробоя по мере прохождения маршрута эмалирования.

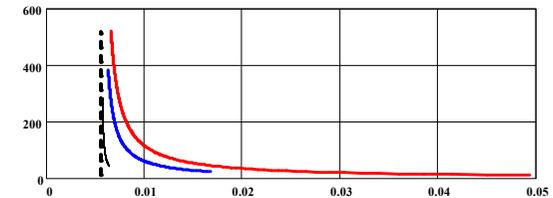


Рис. 6 – Распределение напряженности электрического поля  $E=f(x)$ , где  $E$  в кВ/мм,  $x$  в мм вдоль эквипотенциал в изоляции провода

**Выводы:** Аналитическое построение эквипотенциалей в плоскости  $Z$  позволило моделировать электрическое поле в эмальизоляции: – оценить размер области концентрации напряженности вокруг дефекта поверхности проводника (рис. 6), из которого видно, что напряженность вдоль эквипотенциали быстро снижается, а область концентрации напряженности вокруг дефекта поверхности не превышает 2 мкм; – оценить влияние размеров неоднородностей на напряженность электрического поля в эмальизоляции.

**Список литературы:** 1. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p.18. 2. Л.А. Щебенюк, С.Ю. Антонеч Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емаль проводів. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 23. – С.166 – 169. 3. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Сканави Г.И. – М.: Физматиздат, 1958. – 908 с. 4. В.П.Карпушенко. Силовые кабели низкой та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / В.П.Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антонеч, О.А. Науменко – Х.: Регіон-інформ, 2000.– С. 235–269.

**Bibliography (transliterated):** 1. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. 2. L.A. Shhebenjuk, S.Ju. Antonec' Statistichnij aparat zabezpechennja bezdefektnosti produkcii v virobnictvi emal' provodiv. Vistn. Har'k politehni-ta. Harkiv: NTU «HPI», 2012. No. 23. 166 – 169. Print 3. Skanavi G.I. Fizika dijelektrikov (oblast' sil'nyh polej). Moscow: Fizmatizdat, 1958. 4. Karpushenko V.P., Shhebenjuk L.A., Antonec' Ju.O., Naumenko O.A. Silovi kabeli niz'koj ta seredn'oi naprugy. Konstrujuvannja, tehnologija, jakist': Kharkov: Region-inform, 2000.

Надійшла (received) 01.03.2014