

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;

С.Ю. АНТОНЕЦ, инженер-технолог, ЗАТ «Завод Південкабель»,
Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА КОНТРОЛИРУЕМУЮ ДЕФЕКТНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛЬПРОВОДА

Выполнен анализ результатов контроля процесса изготовления эмалированного провода при высоких скоростях работы современного оборудования, на котором предусмотрен компьютерный мониторинг количества повреждений изоляционного слоя эмали.

Ключевые слова: эмалированный провод, контроль, полимер, дефектность.

Постановка проблемы. Контроль изготовления эмалированных проводов выполняют с помощью измерения целого ряда параметров: напряжения пробоя изоляции $U_{пр}$, числа двойных ходов N при истирании, числа er дефектов на единичной длине провода при испытаниях высоким напряжением на проход и др. Величина er (еггог) ограничена сверху (не более), причем, ограничения различны (от 3 до 180) для различных групп однородности изоляции (п.1.4.2 ТУ 16.К71-278-98) и по результатам контроля определяют, к какой группе относится данный провод. Для инновационной продукции, к которой относятся провода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров, на скоростных (до 700 м/мин и более) эмалированных агрегатах предусмотрен компьютерный мониторинг однородности эмалированной изоляции, также определяется число er дефектов на единичной длине, однако и параметры испытания, и нормативы, в соответствии с которыми определяют, к какой группе относится данный провод, иные. Для сопоставления результатов указанных двух видов контроля количества дефектов необходимо исследование влияния основных факторов, влияющих на однородность изоляции эмалированного провода. Данная работа направлена на установление такого влияния со стороны дефектов поверхности медного проводника.

Анализ литературы. Наиболее современную статистическую шкалу уровня однородности для различных видов массовой продукции предлагает так называемая концепция «Шесть сигм» («6 σ ») [1,2], в которой критерием уровня качества продукции является ее однородность [3]. В концепции «6 σ » используется классический математический аппарат нормального распределения критических ошибок (еггог). При испытаниях эмалированной изоляции высоким

© Л. А. Щебенюк, С. Ю. Антоненц, 2013

напряжением на проход величина сильно зависит от скорости движения изолированного провода через электроды [4]. В [5,6] предложено использование не абсолютного (er), а вероятностного параметра дефектности эмалированного провода. Очевидно, что без анализа причин неоднородности изоляции эмалированного провода сопоставление результатов указанных двух видов контроля числа er дефектов на единичной длине провода при испытаниях высоким напряжением на проход невозможно.

Цель работы. Исследование влияния дефектов поверхности медной проволоки на контролируемую дефектность изоляции эмалированного провода.

Основные результаты. Очевидно, что на показатели однородности эмали по мере прохождения маршрута эмалирования оказывают влияние и характеристики самой эмали, изменяющиеся по мере прохождения маршрута, и неоднородности на поверхности проволоки. Статистическая модель распределения дефектов в одномерном объекте известна применительно к дефектам изоляции [7]. Исходные статистические соотношения этой модели универсальны, однако физический и статистический смысл решающих соотношений, входящих в них переменных и постоянных для анализа распределения дефектов поверхности меди иной.

Если принять, что точечный пробой на единичной контрольной длине определен с помощью высоковольтного электрода, через который протягивается образец провода (стандартные испытания) вызван наличием дефекта (выступа, заусенца и т.п.) на поверхности меди, то размер дефекта на медной проволоке под высоковольтным электродом – величина случайная. Обозначим её x . Если размер минимального дефекта, который может вызвать пробой изоляции $x_{кр}$, то для каждой длины провода, соответствующей отрезку провода под высоковольтным электродом L , возможны только два события: появление и не появление пробоя, что равносильно появлению и не появлению дефекта размером, равным или большим критического $x \geq x_{кр}$.

Функция распределения относительного размера дефекта $\xi = x/t$, где толщина слоя эмали, на длине электрода L может быть представлена формулой из [7] и имеет вид:

$$F(\xi) = P\{x < \xi\} = e^{-pa} \left[1 + \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\xi} \frac{(pae)^{a\xi}}{(a\xi)^{a\xi} \sqrt{a\xi}} d\xi \right], \quad (1)$$

где значение параметра p по условию отражает степень неоднородности поверхности медного проводника $0 \leq p \leq 1$; значение

параметра a представляет собой предел отношения длины высоковольтного электрода к линейному размеру минимального фиксируемого дефекта.

Статистический смысл a – максимальное количество повреждений изоляции, которое может быть зафиксировано при данных испытаниях. Если учесть, что в данных испытаниях дефект фиксируется либо нет на длине электрода, то в этом случае в качестве оценки a можно принять отношение единичной контрольной длины Lk ($Lk = 30$ м) к длине высоковольтного электрода L ($L = 0,125$ м), откуда ориентировочная оценка $a \approx 240$.

Размеры дефектов поверхности меди не зависят от количества проходов через эмалировочную ванну, а по мере прохождения маршрута изменяется относительный размер изоляционного слоя эмали в месте дефекта поверхности медного проводника (противоположно статистической модели в [7]). Соответственно соотношение (1) в данном случае является не функцией распределения относительного размера дефекта ξ на длине электрода L , а функцией распределения относительного размера дефекта изоляционного слоя эмали в месте дефекта поверхности медного проводника.

Измеренное количество er точечных пробоев на единичной контрольной длине дает возможность экспериментально оценить вероятность появления критического размера дефекта $\Delta_{кр}$ поверхности медного проводника, при котором фиксируется точечный пробой:

$$P\{\Delta > \Delta_{кр}\} = P\{\xi < \xi_{кр}\} = F(\xi_{кр}) = er / a. \quad (2)$$

На рисунке 1 представлены графики, рассчитанные по данным таблиц 1 и 2 и по соотношению (2).

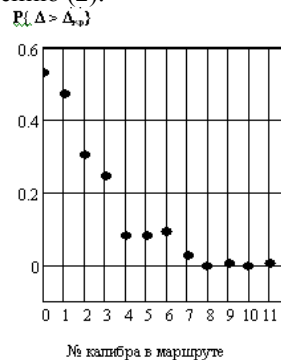


Рис.1 – Экспериментальные оценки вероятности появления критического размера дефекта $\Delta_{кр}$ поверхности медного проводника, при котором фиксируется точечный пробой: а) после изготовления провода; б) после кондиционирования в течение 48 часов

Данные, приведенные на рис.1 дали возможность оценить вероятности появления критического размера дефекта $\Delta_{кр}$ поверхности медного проводника на первых семи калибрах. А поскольку размеры дефектов поверхности меди не зависят от количества проходов через эмалировочную ванну, то по мере прохождения маршрута изменяется только относительный размер изоляционного слоя эмали в месте дефекта поверхности медного проводника

Логично полагать, что именно изменение относительного размера изоляционного слоя эмали является причиной изменения вероятности повреждения изоляции. Средний размер критического дефекта $\Delta_{кр}$ для первых семи калибров примерно одинаковый и может быть ориентировочно оценен. В сумме размер выступа на проводнике и толщина слоя эмали составляют экспериментально определяемую толщину изоляции t (разность диаметров):

$$\xi_{кр} = (t - \Delta_{кр}) / t. \quad (3)$$

Экспоненциальный множитель в (1) это вероятность отсутствия повреждения эмали, а показатель степени для основания натуральных логарифмов имеет смысл среднего размера дефекта, поэтому с учетом (1), можно оценить средний размер критического дефекта поверхности медного проводника, приводящего к повреждению эмали в процессе испытаний:

$$P\{\Delta < \Delta_{кр}\} = P\{\xi > \xi_{кр}\} = 1 - F(\xi_{кр}) = 1 - er / a = e^{-\Delta_{кр} cr / t}, \quad (4)$$

где неизвестная $\Delta_{кр} cr$ может быть оценена из экспериментальных данных для первых семи калибров

$$\Delta_{кр} cr = t \cdot [-\ln(1 - er / a)]. \quad (5)$$

На рисунке 2 приведены соответствующие оценки. Важно то, что из рис. 2 видно: во-первых, как и следовало ожидать, размеры дефектов поверхности меди мало зависят от количества проходов через эмалировочную ванну;

во-вторых, оценка размера критического дефекта поверхности медного проводника, приводящего к повреждению эмали в процессе испытаний, находится в достаточно узком диапазоне от 2 мкм до 6 мкм и в среднем равен ориентировочно 4,5 мкм.

Эта оценка основана на том предположении, что вероятность появления точечного повреждения при испытании высоким напряжением на проход, с одной стороны, может быть экспериментально определена как отношение количества точечных повреждений на единично контрольной длине к максимальному количеству повреждений изоляции a , которое может быть зафиксировано при данных испытаниях.

С другой – может быть описана экспоненциальной функцией распределения среднего размера критического дефекта поверхности медного проводника под испытательным электродом (1).

Реальные размеры дефектов поверхности медного проводника могут быть определены визуально при микроскопическом исследовании. Результаты некоторых из таких измерений приведены в таблице при увеличении $\times 100$. Однако визуальные оценки не разграничивают критические и некритические дефекты.

Для сопоставления с расчетными оценками, условно могут быть использованы оценки максимальных размеров дефектов меди. С этой точки зрения данные рис. 2, во-первых, не противоречат экспериментальным оценкам, приведенным в таблице. И, во-вторых, свидетельствуют о том, что после прохождения первых четырех калибров маршрута характер поверхности провода изменяется.

Δкр ср, мм

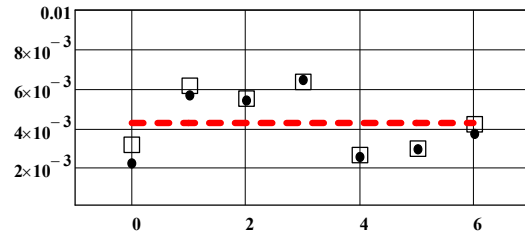


Рис. 2 – Экспериментальные оценки (см. (5)) среднего размера критического дефекта на поверхности медного проводника, приводящего к повреждению эмали в процессе испытаний высоким напряжением на проход для первых семи калибров маршрута эмалирования провода ПЭЭИДХ – 0,63:
● – сразу после изготовления провода; □ – после кондиционирования(48 ч)

Таблица – К оценке размеров дефектов поверхности проводника

№ калибра	Дефекты типа «фраковина»			Дефекты типа «продольная бороздка»			Дефекты типа «поперечная трещинка»		Расчет по (5) Δкр ср, мм
	Парал. оси Δmax, Δmin, мм	Глубина а h, мм	Глубина б h, мм	Парал. оси Δmax, Δmin, мм	Глубина h, мм	Ширина Δ, мм	Длина l, мм		
0	0,01	0,05	0,01	0,001	0,01	0,005	нет	нет	0,0032
1	<0,01	0,03	0,01	≈≈≈	≈≈≈	≈≈≈	нет	нет	0,0062
2	<0,01	0,0	0,01	≈≈≈	≈≈≈	≈≈≈	нет	нет	0,0055

		3							
3	<0,01	≈≈≈	?	≈≈≈	≈≈≈	≈≈≈	0,0005	0,02	0,0064
4	<0,01	≈≈≈	?	≈≈≈	≈≈≈	≈≈≈	0,0005	0,02	0,0027
5	<0,01	≈≈≈	?	≈≈≈	≈≈≈	≈≈≈	0,01	0,05	0,0030
6	<0,01	≈≈≈	?	≈≈≈	≈≈≈	≈≈≈	0,01	0,05	0,0042

Выводы. Экспериментальные данные, полученные по мере увеличения количества проходов через эмальагрегат, однозначно свидетельствуют о том, что зависимости напряжения пробоя от толщины эмали для готового эмалированного провода, с одной стороны, и для провода на различных участках маршрута отличаются принципиально. Это отличие обусловлено значительным отличием влияния практически неизменных неровностей медного проводника на электрическую прочность эмали с изменяющейся толщиной.

Этот вывод подтверждение достаточно сильной корреляцией между напряжением пробоя и количеством точечных пробоев на единичной контрольной длине er : $Kor(U, E) = -0,884$, где

$$Kor(U, E) = \Sigma\{[U_i - U_{cp}] \cdot [E_i - E_{cp}]\} \cdot (n \cdot \sigma[U] \cdot \sigma[E])^{-1}, \quad (6)$$

где n – количество одинаковых по номеру в ряду измерений значений переменных U и er ;

U_{cp} и er_{cp} – средние значения ряда измерений для переменных U и er ;

$\sigma[U]$ и $\sigma[er]$ – корни квадратные из дисперсий переменных, которые определены по формуле, например:

$$\sigma[U] = (D[U])^{0,5} = \{ \Sigma(U_i - U_{cp})^2 \cdot (n - 1)^{-1} \}^{0,5}$$

Список літератури: 1. Dave Harrold. Designing for Six Sigma Capability.-Control Engineering, 1999, January.-Pg.62-70. 2. Адлер Ю.П., ШнерВ.Л. «Шесть сигм»: еще одна дорога, ведущая к храму. // Методы менеджмента качества. Октябрь 2000.-С. 15 – 23. 3. Mary Walton. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming. New York, NY 10016, Copyright 1986, p.262. 4. Золотарьов В.М., Науменко О.А. Стандартизація випробувань ізоляції на прохід. // КарпушенкоВ.П., Щепенюк Л.А., Антоненць Ю.О., НауменкоО.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. 5.Щепенюк Л.А. Контрольна карта – інструмент якості кабельної продукції // КарпушенкоВ.П., Щепенюк Л.А., Антоненць Ю.О., НауменкоО.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289. 6. Методика построения контрольной карты вероятности выхода признака

за нормативный предел // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Выпуск 127. - С. 35-38. 7. Голик О.В. Метод оперативного контроля параметров двухслойной полиимидной изоляции эмальпровода в процессе производства: дисс.канд. техн. наук: 05.11.13 / Голик Оксана Вячеславовна. – Х., 2009. – 219 с.

Надійшла до редколегії 01.07.2013

УДК 621.315.2

Исследование влияния дефектов поверхности медной проволоки на контролируемую дефектность изоляции эмальпровода / Л.А. Щепенюк, С. Ю. Антоненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність і ефективність. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 59 (1032) – С. 188 – 194 Бібліогр.: 7 назв.

Виконаний аналіз результатів контролю процесу виготовлення эмальпровода при високих швидкостях роботи сучасного обладнання, на якому передбачений комп'ютерний моніторинг кількості пошкоджень ізоляційного шару емалі.

Ключові слова: емальований дріт, контроль, дефектність, полімер.

The analysis of data of monitoring of the technological process is carried out of enamelled wire attached to high work speeds of contemporary equipment, on which a computer number monitoring foreseen of damages of isolating enamel layer.

Keywords: monitoring, enamelled wire, damage