

О.В. ГОЛИК, аспирант, НТУ "ХПИ", Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ НАГРЕВОСТОЙКИХ ПРОВОДОВ С ДВОЙНОЙ ПОЛИИМИДНОЙ ЭМАЛЬИЗОЛЯЦИЕЙ

Розроблено метод визначення інтегрального показника дефектності ізоляції емальпроводів з температурним індексом 200 °С.

Разработан метод определения интегрального показателя дефектности изоляции эмальпроводов с температурным индексом 200 °С.

Постановка проблемы. Изготовление эмальпроводов на современном оборудовании, на котором предусмотрен компьютерный мониторинг в режиме "он-лайн" наличия дефектов путем испытаний высоким напряжением на проход, обуславливает необходимость обработки и анализа одновременно большого количества различных количественных характеристик дефектности. Опыт использования результатов такого мониторинга на агрегатах фирмы MAG (Австрия) на заводе "Южкабель" свидетельствует о том, что существует необходимость разработки показателя, который учитывал бы не только измеренное количество дефектов на отдельных контрольных длинах катушки эмальпровода, но и распределение контрольных длин по уровню дефектности для всей катушки. Это дает возможность получить обобщенную информацию об однородности эмальизоляции для каждой изготовленной катушки и тем самым обеспечить возможность сопоставления результатов измерения дефектности с результатами последующих измерений при разрушающих приемочных испытаниях.

Анализ литературы. При нормативных приемочных испытаниях эмальпроводов осуществляется измерение напряжения пробоя эмальизоляции [1]. В этом случае сплошной контроль невозможен, так как данная операция носит разрушающий характер. Нормируемое количество измерений обуславливает вероятность ошибки в оценке минимального напряжения пробоя на уровне нескольких десятков процентов [2]. Методы испытаний высоким напряжением на проход путем измерения тока через эмальизоляцию непосредственно при движении провода на выходе из эмальагрегата обеспечивают неразрушающий сплошной контроль дефектности эмальизоляции [3]. Измеряемое количество дефектов при этом является величиной сугубо условной [3],

зависящей и от характеристик провода, и от технологических параметров, и от параметров измерительной системы, поэтому необходимо использование относительного показателя дефектности. Не соответствует сути испытаний и сложившееся понятие "точечное повреждение".

Во-первых, эмальизоляция, минимальное пробивное напряжение которой составляет не менее от 1000 В до 5500 В переменного тока, не повреждается соответственно при напряжениях от 300 В до 1500 В постоянного тока. Во-вторых, ослабленные участки эмальизоляции не обязательно являются "точечными". Распределение $F(\xi)$ размеров таких участков изоляции и исследование этого распределения позволили использовать в данной работе понятие "дефект изоляции" взамен понятия "точечное повреждение изоляции", принятого в нормативной документации [4].

Цель работы. Исследование распределения количества дефектов по группам дефектности при испытаниях на проход и разработка относительного интегрального показателя дефектности эмальизоляции по результатам испытаний высоким напряжением на проход.

Полученные результаты. Сопоставление информативности стандартных статистических параметров дефектности катушки эмальпровода при испытаниях на проход. При этом определяются следующие характеристики (длина провода на катушке 3000 м и более):

- число единиц длины N в катушке; за единицу длины принято 100 м;
- количества единичных длин четырех групп n_1 (0-3 дефекта), n_2 (4-9 дефектов), n_3 (10-18 дефектов), n_4 (более 18 дефектов);
- общее число точечных повреждений S в катушке;
- наибольшее число точечных повреждений E_{max} на единичной длине данной катушки;
- среднее число $M[E]$ точечных повреждений на единичной длине данной катушки;
- среднеквадратическое отклонение $\sigma[E]$ числа точечных повреждений на единичной длине для данной катушки.

На рис. 1 сопоставлены результаты измерений при испытаниях на проход на сертифицированном оборудовании фирмы MAG (Австрия) максимального E_{max} , среднего $M[E]$, среднеквадратического $\sigma[E]$ количества дефектов E на контрольной длине (100 м) и суммарного S количества дефектов на всей длине для 50 катушек в последовательности их изготовления для провода ПЭЭИДХ-200.

Сравнение данных рис. 1 свидетельствует о том, что, все четыре параметра дефектности фиксируют появление катушек с высокой дефектностью, однако обладают недостаточной чувствительностью при относительно малой дефектности провода. Целью измерений дефектности является получение информации о тенденции ее изменения при

нормальном ходе технологического процесса. Для этого необходимо исследование распределения дефектов на катушке и сопоставление их для катушек с различным уровнем дефектности.

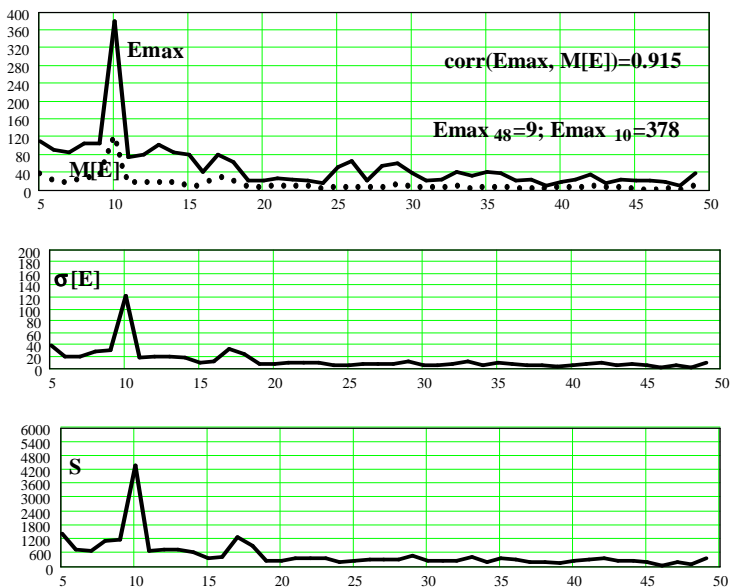


Рис. 1. Результаты измерений максимального E_{max} , среднего $M[E]$, среднеквадратического $\sigma[E]$ и суммарного S количества дефектов E на контрольной длине (100 м) для 50 катушек провода ПЭИДХ-200 в последовательности их изготовления

Исследование распределения количества дефектов на катушке эмальпровода. На рис. 2 представлены частоты n_j/N появления контрольных длин j ($j \in [1;4]$) для каждой из четырех групп дефектности для 50-ти катушек исследованной совокупности:

- быстрее всех растет частота первой группы n_1/N , быстрее всех уменьшается частота четвертой n_4/N , следовательно, в целом, дефектность катушек в течение технологического периода уменьшается;
- медленнее, чем для первой, но растет частота второй группы n_2/N , а у третьей – частота n_3/N сравнительно стабильна.

Это может означать, что у каждой катушки есть наиболее вероятная группа дефектности.

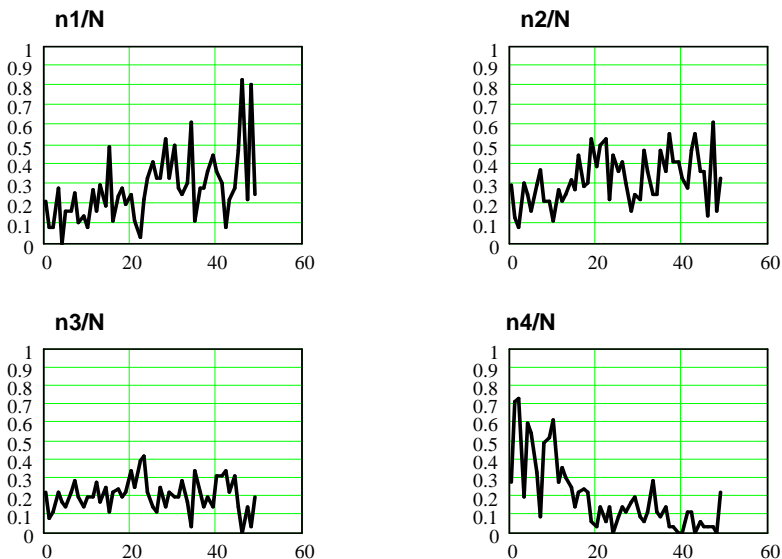


Рис.2. Частоты n_j/N появления контрольных длин j ($j \in [1;4]$) для каждой из четырех групп дефектности для 50-ти катушек провода ПЭЭИДХ-200

Для определения интегральной функции распределения количества дефектов на каждой катушке кроме частот появления контрольных длин различных групп дефектности n_j/N необходима оценка среднего количества дефектов на таких длинах Es_j :

$$Es_j = (\inf E_j + \sup E_j) / 2, \quad (1)$$

где i – номер катушки в последовательности изготовления; $\inf E_j$, $\sup E_j$ – наименьшие и наибольшие значения количества дефектов для группы j .

Произведение средних значений количества дефектов на контрольных длинах Es_j на количество соответствующих контрольных длин на катушке, определенное в результате испытаний на проход, равно суммарному количеству дефектов для каждой группы:

$$Ej_i = Es_j \cdot nj_i, \quad (2)$$

где n_j – количество контрольных длин группы j на катушке № i .

Эмпирические функции распределения количества дефектов $F(E)_i$ для каждой катушки определены как эмпирические вероятности того, что количество дефектов меньше или равно данному.

Тогда функция распределения может быть определена по резуль-

татам испытаний на проход для каждой катушки:

$$F\left(\sum E_{j_i}\right) = P\left\{E_i < \sum E_{j_i}\right\} = \frac{\sum_{k=1}^j nk_i}{\sum_{k=1} nk_i}, \quad (3)$$

где $\sum E_{j_i}$ – суммарное количество дефектов для всех групп от первой до группы $j, j \in [1;4]$, где E_{j_i} определены в соответствии с (2).

На рис. 3 приведены графики функций распределения количества зафиксированных дефектов, рассчитанные с помощью соотношения (3) для нескольких катушек из рассмотренной совокупности. Эти графики представляют собой геометрически однотипные ломаные линии и описаны экспоненциальными функциями, так как экспериментальные точки этих графиков в линейных координатах экспоненциального распределения представляют собой прямые (рис. 4).

Таким образом, для описания $F(\sum E_{j_i})$ использован экспоненциальный закон распределения вероятностей в виде однопараметрической экспоненты: $F(E)_i = 1 - \exp(-1/e_i; E)$, где e_i – параметр распределения, имеющий смысл интенсивности появления дефектов на данной катушке, E – аргумент функции, имеющий смысл суммарного количества дефектов на катушке. На основе полученного распределения дефектов разработан относительный интегральный показатель дефектности эмальизоляции.

Разработка интегрального показателя дефектности эмальизоляции. Экспоненциальный эмпирический показатель дефектности D_i определен по результатам испытаний всего провода на катушке как вероятность того, что дефектов на катушке больше, чем максимальное заданное значение E_m :

$$D_i = \exp\left[-\left(\frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 \frac{-\ln(1 - F(E_{j_i}))}{E_{j_i} + 1}\right) E_m\right] \quad (4)$$

где E_m – максимальное допустимое количество дефектов на катушке, которое является технологической контрольной границей и, в принципе, может быть выбрано различным.

На рис. 5 представлены результаты определения эмпирического показателя дефектности D , рассчитанные с помощью (4), по результатам измерений количества дефектов для катушек исследованной совокупности в последовательности их изготовления при использовании двух контрольных границ.

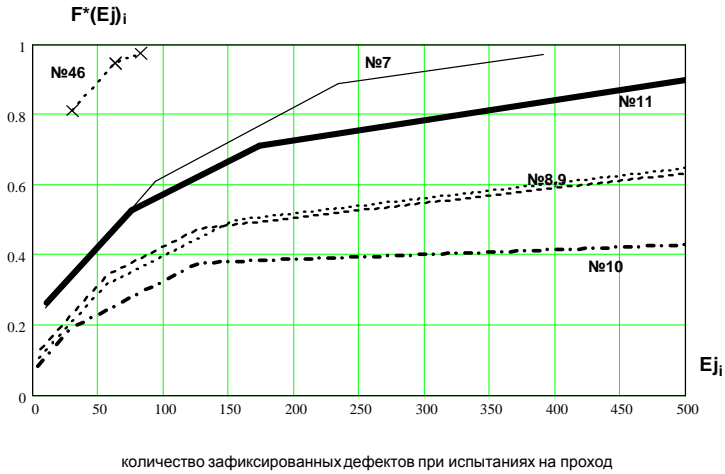


Рис. 3. Функции распределения количества дефектов, зафиксированных при испытаниях на проход провода ПЭЭИДХ-200

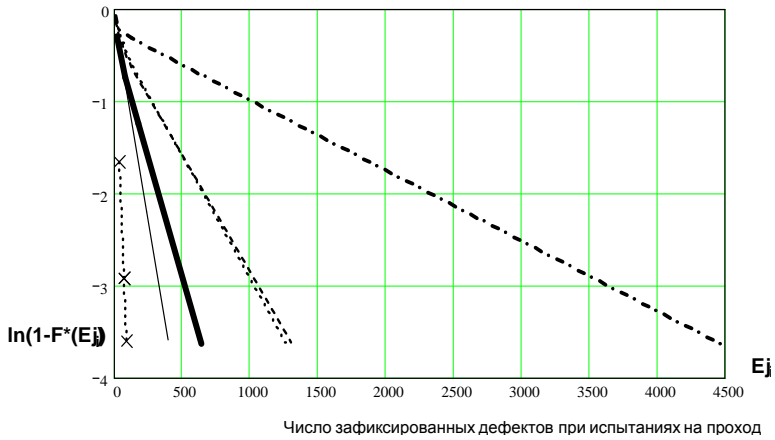


Рис. 4. Функции распределения количества дефектов, зафиксированных при испытаниях на проход провода ПЭЭИДХ-200 в линейных координатах экспоненциального распределения

$$D=P\{E >36\}$$



$$D=P\{E >18+6*18\}$$

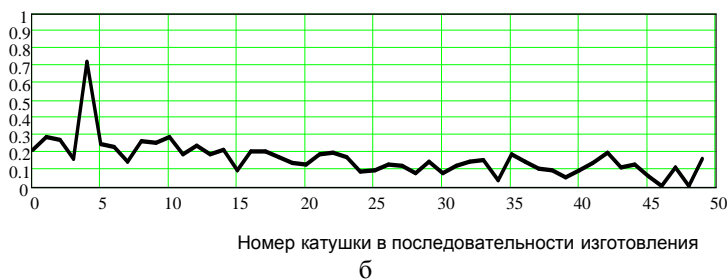


Рис. 5. К сопоставлению результатов контроля дефектности катушек эмалипровода по эмпирическому относительному показателю дефектности D при использовании различных контрольных границ: а) 36 дефектах на катушке; б) 126 дефектах на катушке

При контроле по эмпирическому показателю дефектности наиболее дефектной является катушка № 4, у которой контрольных длин первой группы (практически бездефектных) нет, поэтому при контрольной границе, равной 36 (только первая группа) ее показатель дефектности высок и равен 0,9 (рис. 5, а). При увеличении контрольной границы дефектность катушки № 4 уменьшается и при $E_m = 126$ показатель $D = 0,7$. Для катушек с малой дефектностью (№ 46 и № 48) использование контрольной границы $E_m = 36$ позволяет сделать измерение дефектности чувствительным к небольшим изменениям дефектности. В табл. 1 результаты измерений показателей дефектности на сертифицированном оборудовании фирмы MAG (Австрия) сопоставлены с результатами определения разработанного эмпирического показателя дефектности.

Таблица 1 – Результаты испытаний на проход для отдельных катушек эмалипровода с двойной эмальизоляцией на основе полиамидных сополимеров

Измеряемый параметр	Катушка № 4	Катушка № 10	Катушка № 46	Катушка № 48
Количество контрольных длин с $E=(0\div 3)$, группа 1	0	3	30	29
Количество контрольных длин с $E=(4\div 9)$, группа 2	8	4	5	6
Количество контрольных длин с $E=(10\div 18)$, группа 3	6	7	0	1
Количество контрольных длин с $E > 18$, группа 4	23	22	1	0
Количество дефектов на контрольной длине с наибольшим количеством дефектов, E_{max}	125	378	21	9
Среднее количество дефектов на контрольной длине, $M[E]$	42	121	1	2
Среднеквадратическое отклонение количества дефектов на контрольной длине, $\sigma[E]$	36	119	4	2
Интегральный эмпирический показатель дефектности, D	0,912	0,708	0,177	0,191
Суммарное количество дефектов на катушке, S	1512	4356	36	72

Таким образом, использование экспоненциального эмпирического показателя дефектности D позволяет получить обобщенную и более чувствительную информацию об однородности эмальизоляции, поскольку этот показатель более чувствителен к наличию на катушке контрольных длин с относительно малой дефектностью. Другим достоинством показателя D является то, что для его определения необходим выбор контрольной границы E_m , что обеспечивает гибкость соответствующего контроля.

Выводы. Исследование распределения количества дефектов при испытаниях на проход позволило разработать относительный интегральный показатель дефектности эмальизоляции по результатам испытаний высоким напряжением на проход.

Список литературы: 1. *Пешков И.Б.* Обмоточные провода. Учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с. 2. *Шторм Р.* Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Шторм Р. – М.: Мир, 1970. – 268 с. 3. *Чередниченко С.Ю.* Новое эмальоборудование на заводе "Южкабель" // Вестник ХГПУ. – 2000. – Вып. 127 – С. 45-56. 4. Силлові кабелі низької та середньої напруги / Конструювання, технологія та якість: підручник: *Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.А.* и др. – Х.: Регіон-інформ, 2000. – 376 с.

Поступила в редколлегию 20.01.2009