

Ю.А. АНТОНЕЦЬ, канд. техн. наук., ЗАТ Завод «Південкабель», Харків

А.Г. ГУРИН, д-р.техн.наук., проф., НТУ «ХП»

О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук, асс., НТУ «ХП»

СУЦЬЛЬНИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТНОСТІ ЕМАЛЬІЗОЛЯЦІЇ ПРИ ВИПРОБУВАННІ ВИСОКОЮ НАПРУГОЮ НА ПРОХІД

Выполнен анализ результатов контроля процесса изготовления эмальпровода при высоких скоростях работы современного оборудования, на котором предусмотрен компьютерный мониторинг количества слабых мест в эмальизоляции. Разработан интегральный показатель дефектности изоляции эмальпроводов и методика его определения.

The analysis of datas 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. Development of an integrated parameter of presence of defects of isolation of enameled wire and technique of its definition.

Постановка проблеми. Відомо, що (85 – 95) % всіх відмов електричних машин із всипною обмоткою відбуваються через виткові замикання емальізоляції, а пошкодження фазної і пазової ізоляції в двигунах із всипною обмоткою виникають як наслідок виткових замикань і розвиваються із останніх. Тому вимоги до міцності і однорідності емальізоляції є дуже високими. Існує велика кількість традиційних методів випробувань емальдроту, при яких значення параметру, що визначається, співставляють з нормативною межею (наприклад пробивна напруга, механічна міцність, геометричні розміри, термопластичність і т.ін.), але ці методи є руйнівними, а отже випробування є вибірковими, а їх результати не дають інформації про однорідність емальізоляції. Тому поряд з традиційними руйнівними вибірковими випробуваннями на сучасному обладнанні передбачено неперервний комп'ютерний моніторинг наявності слабких місць в емальізоляції шляхом випробувань високою напругою на прохід. При цьому фіксують цілий ряд статистичних показників кількості E слабких місць на одиничній контрольній довжині, зокрема: максимальної E_{max} , середньої $M[E]$, середньоквадратичної $\sigma[E]$, сумарної S кількості слабких місць на всій довжині. Крім того, фіксують приналежність кожної одиничної контрольної довжини до одного з чотирьох груп дефектності. Це зумовлює актуальність аналізу **інформативності стандартних статистичних параметрів дефектності котушки емальпроводу** при випробуваннях високою напругою на прохід і розробки статистичної моделі та відповідного програмного забезпечення, які б дозволили аналізувати та узагальнювати результати моніторинга дефектності емальізоляції у вигляді інтегрального показника однорідності емальпроводу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш сучасну статистичну шкалу рівня однорідності для різних виробників масової продукції пропонує так звана концепція “Шість 6 σ ” [1,2], сігм” (“в якій критерієм досягнутого рівня якості продукції є її однорідність [3]. В концепції “6 σ ” використовують класичний математичний апарат оцінювання середньоквадратичного відхилення σ параметра, що контролюється. В [4,5,6] запропоновано використання величини максимальної ймовірності виходу контрольованого параметра за нормативну межу як уніфікованого показника стабільності технологічного процесу. Проблема полягає в тому, що кількість слабких місць (далі – «дефектів») в емальізоляції, яку фіксують при випробуваннях високою напругою за неперервного руху ізолюваного проводу через електроди, є **величиною суто умовною**. Ця кількість визначається і параметрами випробувань (випробувальна напруга і критичний струм через ізоляцію регулюють в широких межах), і швидкістю руху проводу через електроди[4], і властивостями самої емаль ізоляції, яка швидко розвивається, та досягнутого рівня її однорідності.

Ціль, задачі дослідження. Розробка відносного показника дефектності для одиниці продукції (наприклад для котушки емальдроту) і методу настройки випробувань на прохід залежно від досягнутого рівня однорідності емальізоляції конкретної технологічної системи, а саме для двохшарової емальізоляції на основі поліамідних співполімерів з температурним індексом 200⁰С при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід, придатну для аналізу результатів випробувань на сучасних швидкісних [(100-600) м/хв] емальагрегатах.

Основний матеріал дослідження.

Основні традиційні вимірювані показники, за якими виконано аналіз стабільності технологічного процесу: діаметр провідника dp і емальдроту di (рис.1), напруга пробою U (мінімальна і середня), механічна міцність емалі N (мінімальна і середня), відносне видовження дроту при розриві \square .

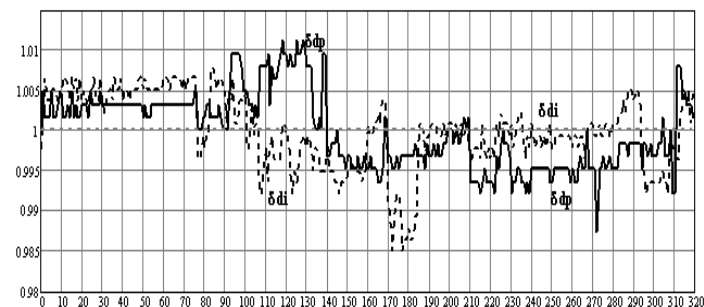


Рис. 1 – Результати вимірювань діаметру провідника dp і емальдроту di (відносні величини), напруги пробою U для 320 котушок дроту ПЭЭИДХ2-200 діаметром 0,630 мм в порядку їх виготовлення

Висновки цього аналізу наступні: за умови відповідності всіх характеристик дроту технічним вимогам, на механічну міцність емалі N (мінімальну і середню) найбільший вплив зумовлює нестабільність діаметра мідного провідника dp ; збільшення dp зумовлює нерівномірність шару емалі і, як наслідок, збільшення середньоквадратичного відхилення механічної міцності емалі $\sigma[Nm]$; чим більше відносне видовження дроту при розриві δ , тим вища механічна міцність, але одночасно більше її розсіяння.

В цілому одержані дані свідчать, що пріоритетною задачею технологічного контролю виготовлення дроту ПЭЭИДХ2-200 є забезпечення стабільності характеристик мідного провідника.

У двошаровій ізоляції емальдроту, яка складається з шарів з різними діелектричними властивостями, окрім типових видів поляризації при випробуваннях постійною високою напругою на прохід, виникає міграційна поляризація, яка супроводжується накопиченням об'ємних зарядів в ізоляції, що суттєво впливає на розподіл електричного поля в ізоляції. Розподіл поля встановлюється відповідно діелектричних проникностей шарів ізоляції: $\epsilon_1 E_1(0) = \epsilon_2 E_2(0)$. З часом виникає накопичування зарядів на межі розділу шарів та встановлюється стаціонарний стан. Тривалість цих переходних процесів визначає час релаксації τ . Для двошарової поліімідної ізоляції емальдроту ПЭЭИДХ в діапазоні номінальних діаметрів від 0.10 мм до 0.63 мм, де питомі провідності шарів мають різні значення, та товщина шарів теж різна, час релаксації досягає кількох секунд. Тому, кількість слабких місць, які фіксуються при випробуваннях високою напругою на прохід (при швидкостях емальювання більше 100 м/хв.) не тільки відображає наявність механічних неоднорідностей в ізоляції, але й прямо пов'язана з електричними властивостями двошарової емальізоляції[9].

Результати дослідження електричної і механічної міцності емальдроту співставлені з результатами методу неруйнівних випробувань високою напругою на прохід (рис. 2). В цих випробуваннях фіксують кількість дефектів на 100 м дроту. Дефектом вважається те місце емальізоляції, в якому зафіксовано струм через ізоляцію, який перевищує критичний. В даному експерименті критичний струм дорівнював 10 мкА.

Кількість дефектів n_j на на 100 м дроту, зафіксованих в результаті випробувань на прохід, за стандартною статистичною процедурою є підставою для віднесення цих 100 м до однієї з чотирьох груп дефектності: $n1 \in [0;3]$, $n2 \in [4;9]$, $n3 \in [10;18]$, $n4 \in [19;E_{max}]$.

Залежність струму через ізоляцію від часу дії напруги зумовлює збільшення похибки при вимірюванні кількості дефектів при збільшенні швидкості V . Для залежності на рис. 3: похибка $\pm 2\%$ є випадковою похибкою використаної системи вимірювання; систематична похибка від мінус 1% до мінус 8% лінійно зростає із зростанням швидкості; якщо попередня зарядка недостатня, то систематична похибка збільшується втричі: до мінус 30% за 1000 м/х

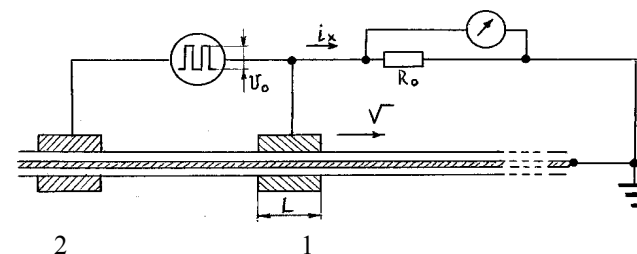


Рис. 2 – Схема розташування електрода 1 довжиною L , на який подана постійна напруга U_0 , через який рухається із швидкістю V емальдріт з заземленою жилою; паралельно до електрода L підключено зарядний електрод 2 для компенсації струму абсорбції через двошарову емальізоляцію

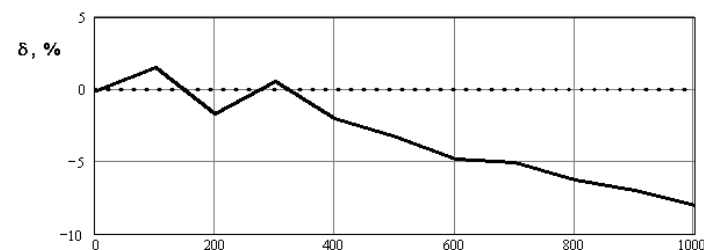


Рис. 3 – Залежність відхилення виміряної кількості дефектів для від швидкості виробництва за умови попередньої зарядки емаль ізоляції, коли довжини електродів 1 і 2 однакові

За результатами дослідження електрофізичних характеристик двошарової ізоляції на основі поліімідних співполімерів для емальдроту марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК, зокрема часу релаксації, струму діелектричної абсорбції та розподілу напруженості електричного поля, запропоновано збільшення часу попередньої зарядки ізоляції шляхом збільшення діаметра зарядного роликкового електрода[9].

Комплекс неруйнівних випробувань в режимі он-лайн для контролю однорідності емальдроту потребує настройки при його виготовленні. Запропонований і перевірений в умовах виробництва експериментальний критерій вибору параметрів (випробувальної напруги і критичного струму), за яких фіксується дефект, що полягає у регулюванні параметрів безпосередньо в процесі виготовлення так, щоб були зафіксовані щонайменше перші три групи дефектності.

Якщо ця умова виконана, то можливе дослідження функції розподілу кількості дефектів по групам дефектності при випробуваннях на прохід $F(E)$. Результати експериментального дослідження цього розподілу для ПЭЭИДХ2-

200-МЭК представлені на рис. 4 у вигляді емпіричних функцій $F^*(E)_i$ для окремих котушок за номером i у процесі їх виготовлення.

Емпірична функція $F^*(E)_i$ розподілу кількості дефектів на окремій котушці i визначена за результатами випробувань напругою на прохід:

$$F^* \left(\sum E_j \right)_i = F^* \left\{ E_i \left\langle \sum E_j \right\rangle \right\} = \frac{\sum_{k=1}^j nk_i}{\sum_{k=1}^4 nk_i}, \quad (1)$$

де $\sum E_j$ – сумарна кількість дефектів для всіх груп від першої до $j \in [1; 4]$.

Емпіричні функції розподілу функції $F^*(E)$ для різних котушок описані експоненційним законом, оскільки в відповідних лінійних координатах експериментальні точки розташовані на прямих для всіх котушок. Емпірична оцінка сумарного експоненційного множника S_i для кожної котушки № i визначена як сума оцінок в чотирьох групах S_j :

$$S_i = \sum_{k=1}^4 \frac{-\ln(1 - F(E_j)_i)}{E_j + 1} \quad (2)$$

де $F(E_j)_i$ - емпірична функція розподілу сумарної кількості дефектів для групи j контрольних довжин відповідної дефектності, $j \in [1; 4]$.

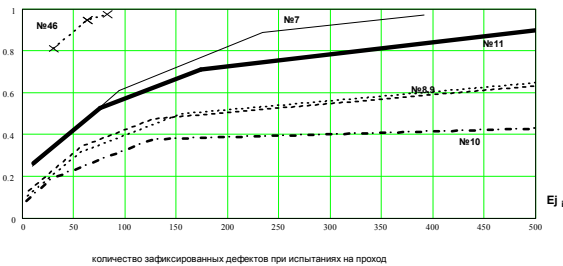


Рис. 4 – Емпіричні функції розподілу $F^*(E)$

Визначення і порівняння параметрів відповідних розподілів для окремих котушок дозволило запропонувати в якості показника дефектності котушки емальдроту емпіричний показник дефектності D_i .

Експоненційний емпіричний показник дефектності D_i визначений за результатами випробувань всього проводу на котушці як ймовірність того, що дефектів на котушці більше, ніж максимальне задане значення E_{max} :

$$D_i = \exp\left[-\left(\frac{S_i}{4}\right)E_{max}\right], \quad (3)$$

де E_{max} – максимальна кількість дефектів на котушці, яка є технологічною межею, що може бути вибрана залежно від досягнутого рівня однорідності.

Емпіричний показник дефектності D враховує кількість всіх груп дефектності на котушці (див. рис. 5), отже є показником однорідності емальзіоляції.

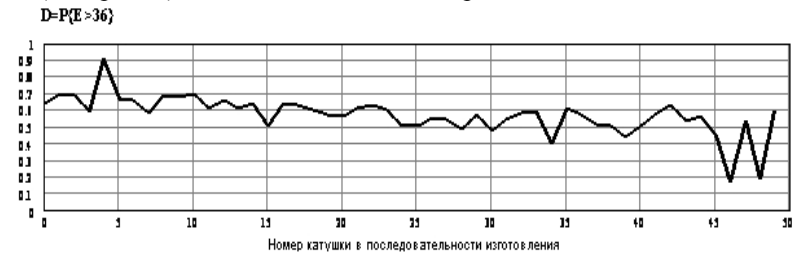


Рис. 5 – Результати контролю дефектності котушок емальдроту за емпіричним показником дефектності D при використанні контрольної границі: не більше 36 дефектів на котушці

Висновки. 1. Запропоновано інтегральний показник дефектності котушки емаль проводу, оснований на експериментально визначеному експоненційному законі розподілу кількості дефектів емаль ізоляції, який дозволяє об'єднати всі результати неруйнівних випробувань високою напругою на прохід на сучасних швидкісних [(100-600) м/хв] емальагрегатах.

2. Обгрунтовано теоретично і перевірено експериментально необхідність удосконалення попередньої поляризації ізоляції емальдроту, що дозволяє в 2 – 3 рази зменшити похибку при визначенні кількості дефектів емальзіоляції у неруйнівних поточних випробуваннях високою напругою на прохід.

Список літератури: 1. Harrold Dave Designing for Six Sigma Capability / Dave Harrold // Control Engineering. – 1999. – P.62-70. 2. Адлер Ю.П. «Шесть сигм»: еще одна дорога, ведущая к храму. Методы менеджмента качества / Ю.П.Адлер, В.Л. Шнер. – 2000. – С. 15 – 23. 3. Walton M. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming / M. Walton: NY 10016, Copyright 1986. – p.262. 4. Золотарьов В.М., Науменко О.А. Стандартизація випробувань ізоляції на прохід // КарпушенкоВ.П., Щербенюк Л.А., Антоненко Ю.О., НауменкоО.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. - Харків: Регіон-Інформ, 2000.- С. 270 – 289. 5.Щербенюк Л.А. Контрольна карта – інструмент якості кабельної продукції // КарпушенкоВ.П., Щербенюк Л.А., Антоненко 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. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели / В.П. Кузнецов. – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с. 8. Пешиков И.Б. Обмоточные провода: учебное пособие для вузов / И.Б.Пешиков. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с. 9. Гурин А.Г., Голик О.В. Патент на корисну модель №49286.- опубл. Бюл.№8. - 26.04.2010.

Надійшла в редакцію 03.09.2010