

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Голик Оксана Вячеславівна

УДК 620.179.148:621.315.2

**МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ
ДВОШАРОВОЇ ПОЛІМІДНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬДРОТУ
В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Електроізоляційна та кабельна техніка» у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гурин Анатолій Григорович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри «Електроізоляційна
та кабельна техніка»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кондрашов Сергій Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри «Інформаційно-
вимірювальні технології та системи»

кандидат технічних наук, доцент
Кириленко Всеволод Михайлович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
доцент кафедри «Відновлювані
джерела енергії»

Захист відбудеться: « 12 » листопада 2009 р. о 12.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.09 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м.Харків, вул.Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м.Харків, вул.Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 07.10.2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Глоба С.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Відомо, що (85 – 95) % всіх відмов електричних машин відбуваються через виткові замикання, а пошкодження фазної і пазової ізоляції в двигунах із всипною обмоткою виникають як наслідок виткових замикань і розвиваються із останніх. Існує велика кількість традиційних методів випробувань емальдроту, при яких значення параметру, що визначається, співставляється з нормативною межею (наприклад пробивна напруга, механічна міцність, геометричні розміри), але цієї інформації може бути недостатньо. Тому виникає необхідність поряд з традиційними руйнівними випробуваннями впроваджувати у виробництво статистичні методи контролю параметрів та використання результатів неруйнівного контролю.

Сьогодні методи контролю параметрів кабельно-провідникової продукції складають одне ціле з конструкцією, технологією виготовлення і вимогами споживачів продукції, що визначає основний напрямок дисертаційного дослідження. Проблеми створення системи контролю у виробництві емальдроту пов'язані з наступним:

- існує необхідність одночасного контролю значної кількості параметрів, що мають різну фізичну природу (наприклад, температурний індекс ТІ, електричний опір жили Рж, пробивна напруга Упр, механічна міцність емальізоляції, адгезія та термопластичність емальізоляції і т.ін.) та різні нормативні границі для них (не більше, не менше тощо);
- очевидна взаємна залежність параметрів, що контролюються;
- технологічний дрейф параметрів;
- умовність ряду показників, наприклад, кількість дефектів в емальізоляції.

Ці проблеми у багатьох випадках зумовлюють непридатність для створення системи контролю у виробництві емальдроту класичних статистичних показників та потребують досліджень у сфері діагностики поліімідної ізоляції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ». Здобувач як виконавець проводила дослідження при виконанні держбюджетної теми «Розроблення стандартів, гармонізованих з міжнародними та європейськими» (замовник Держспоживстандарт України, ДР №1148/92873) та договору між НТУ «ХПІ» та ДП «УкрНДНЦ» (ДР № №767/81888).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка статистичного методу для порівняння та аналізу результатів вимірювань параметрів емальізоляції на основі математичного апарату інтервальних статистичних моделей та створення системи оперативного контролю двошарової поліімідної ізоляції емальдроту з температурним індексом 200⁰С .

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

- проаналізувати зв'язок технологічних параметрів виготовлення емальдроту з його характеристиками, які одержують в результаті комплексу руйнівного і неруйнівного контролю готової продукції;

- розробити статистичну модель дефектності емальізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід, придатну для аналізу результатів випробувань на сучасних швидкісних [(100-600) м/хв] емальагрегатах;
- виконати експериментальні дослідження електричної та механічної міцності двохшарової поліімідної ізоляції емальдроту в діапазоні номінальних діаметрів від 0.10 мм до 0.63 мм.;
- виконати експериментальні дослідження результатів неруйнівних випробувань емальізоляції високою напругою на прохід на сучасних агрегатах;
- розробити інтегральний показник дефектності поліімідної двохшарової ізоляції при неруйнівних випробуваннях;
- провести апробацію розробленого методу оперативного неруйнівного контролю ізоляції на реальному виробництві.

Об'єкт дослідження – процес визначення електрофізичних характеристик емальдроту з двохшаровою поліімідною ізоляцією з температурним індексом 200⁰С в результаті неруйнівного технологічного та руйнівних випробувань приймального контролю.

Предмет дослідження – емальдріт з двохшаровою поліімідною ізоляцією з температурним індексом 200⁰С.

Методи дослідження – базуються на використанні: теорії електромагнітного поля для дослідження електрофізичних параметрів емальізоляції на основі поліімідних співполімерів; теорій поляризації діелектриків для дослідження динаміки зміни струму через двохшарову емальізоляцію для вибору параметрів та методів зменшення похибки контролю; теорії ймовірностей для розроблення статистичної моделі дефектності емальізоляції при випробуваннях високою напругою на прохід; математичного апарату інтервальних статистичних моделей для дослідження максимальної ймовірності перевищення граничної дефектності, вибору цієї граничної дефектності за умов випробувань, порівняльного аналізу похибок при застосуванні класичних і інтервальних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- для оброблення результатів неруйнівного статистичного технологічного контролю виготовлення емальдроту вперше застосовано теорію інтервальних статистичних моделей, що дозволяє уникнути великої кількості повторних незалежних випробувань;
- вперше розроблено статистичну модель дефектності емальізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід, яка дозволила проаналізувати вплив швидкості руху проводу на вимірювані параметри дефектності і відповідно запропонувати метод експериментального вибору параметрів таких випробувань;
- вперше визначені параметри відомої експериментальної залежності середнього значення напруги пробою U від діаметральної товщини t шару емалі $U = 3096 \exp(0,014 t)$ для характеристики електричної міцності емальдроту ПЭЭИДХ з двохшаровою поліімідною ізоляцією в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до 0,63 мм, що дозволяє використовувати надану залежність для аналізу результатів поточних технологічних випробувань;

- вперше запропоновано інтегральний показник дефектності котушки, який дозволяє об'єднати всі результати неруйнівних випробувань для даної котушки, заснований на експоненційному законі експериментального розподілу кількості дефектів емальізоляції ;

- вперше розроблено метод оперативного неруйнівного контролю кількості дефектів емальізоляції при випробуваннях на прохід для котушок емальдроту, апробація якого проведена на реальному кабельному виробництві;

- подальший розвиток здобуло використання статистичного показника – максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну межу при обмеженні значень цього параметри знизу та двосторонньому обмеженні, який раніше виокристовувався при обмеженні зверху для контролю тангенсу кута діелектричних втрат; досліджено чутливість цього статистичного показника до дисперсії параметра, що контролюється;

- науково обґрунтовано теоретично і перевірено емпірично необхідність удосконалення попередньої поляризації ізоляції емальдроту, що дозволило зменшити похибку при визначенні кількості дефектів емальізоляції у неруйнівних поточних випробуваннях високою напругою на прохід.

Практичне значення одержаних результатів для галузей електромашинобудування та кабельної техніки полягає в тому, що:

- застосування для поточного технологічного контролю виготовлення емальдроту максимальної ймовірності виходу параметра за встановлену технологічну межу, що забезпечує завчасне попередження появи емальдроту, який має недопустимі параметри щодо будь-яких його властивостей, які контролюються у вигляді кількісних показників;

- запропонований експериментальний критерій вибору параметрів (випробувальної напруги і критичного струму), за яких фіксується дефект, безпосередньо в процесі виготовлення дозволив підвищити точність результатів випробувань високою напругою на прохід;

- оптимізація попередньої поляризації ізоляції емальдроту перед випробуванням високою напругою шляхом збільшення діаметру зарядного електроду, що дозволило зменшити похибку вимірювань кількості дефектів емальізоляції при неруйнівному контролі;

- використання методу оперативного неруйнівного контролю кількості дефектів емальізоляції при випробуваннях на прохід для котушок емальдроту на основі запропонованого інтегрального показника дефектності дозволяє об'єднати всі результати неруйнівних випробувань для даної котушки і тим самим забезпечити оперативний порівняльний неруйнівний контроль продукції.

Результати даної роботи використані:

- у сфері контролю характеристик емальдроту з двохшаровою поліімідною ізоляцією у ЗАТ «Завод Південкабель» м. Харків;

- при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт з розроблення державних стандартів України, гармонізованих з європейськими та світовими стандартами в сфері контролю характеристик кабелів і проводів;

- в навчальному процесі на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки за фахом 7.0906.04 «Техніка та електрофізика високих напруг» в курсах

«Кабельна техніка», «Розрахунок та конструювання силових кабелів», «Технологія виготовлення проводів», «Надійність та діагностика ізоляції».

Особистий внесок здобувача. Всі основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: застосування для обробки результатів технологічного контролю виготовлення емальдроту теорії інтервальних статистичних моделей; дослідження чутливості максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну межу до дисперсії параметра, що контролюється; розробка статистичної моделі дефектності емальізоляції при неруйнівному контролі високою напругою на прохід; обґрунтування методу експериментального вибору параметрів випробувань емальдроту високою напругою на прохід; обґрунтування теоретично і перевірка експериментально можливості зменшення залежності похибки від швидкості руху при визначенні кількості дефектів емальізоляції у неруйнівних поточних випробуваннях високою напругою на прохід за рахунок оптимізації попередньої поляризації ізоляції емальдроту; експериментальне визначення залежності середнього значення напруги пробою U від діаметральної товщини t шару емалі $U = 3096 \exp(0,014 t)$ для характеристики електричної міцності емальдроту з двохшаровою поліімідною ізоляцією; розробка методу оперативного неруйнівного контролю кількості дефектів емальізоляції при випробуваннях на прохід для котушок проводу марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК на основі інтегрального показника дефектності.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались й одержали позитивну оцінку на: міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні та комп'ютерні технології в народному господарстві» (м. Харків, 2000 р.); республіканському науково-технічному семінарі «Нові розроблення в галузі електричної ізоляції» (м. Харків, 2003 р.); X, XII, XII, XVI міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2002, 2004, 2005, 2008 рр.); міжнародному симпозіумі «Проблема удосконалення електричних машин та апаратів» SIEMA (м. Харків, 2006 – 2007 рр.).

Публікації: основні результати дисертації опубліковані у 8 наукових працях, у тому числі 6 статей у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, списку використаних джерел висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 180 сторінок. Робота містить 63 ілюстрації по тексту, 7 ілюстрацій на 7 сторінках, 7 таблиць по тексту, 1 таблицю на 1 сторінці, 2 додатки на 9 сторінках та 128 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі відзначена актуальність теми дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, вказана наукова новизна та практичне значення роботи, розглянуто особистий внесок здобувача у друкованих роботах із співавторами, наведена апробація роботи та її структура.

У першому розділі розглянуто одну з найбільш актуальних проблем електромашинобудування – проблему підвищення надійності виткової ізоляції виспних обмоток електричних машин. Розглянуто і проаналізовано існуючі методи визначення характеристик основного елементу, що забезпечує надійність цієї ізоляції, а саме емальдроту. Проаналізовані основні методи випробувань емальдроту: руйнівні та неруйнівні. Розглянуто чотири основні види властивостей емальдроту, які характеризують їх придатність до використання за призначенням: механічні, електрофізичні, теплофізичні характеристики і хімічна стійкість. Відповідно розглянуто прилади вимірювання цих характеристик. Зазначено, що незалежно від того, які саме методи, – механічні, електричні, теплові чи хімічні, використовують в цих приладах, випробування є руйнівними. Тому у масовому виробництві кабельно-провідникової продукції є необхідним використання оперативного неруйнівного контролю.

Другий розділ присвячено дослідженню характеристик двошарової поліімідної ізоляції у процесі виробництва, електричної та механічної міцності емальдроту, статистичних аспектів методів руйнівного контролю емальпроводів. Виконано аналіз методу неруйнівного контролю емальізоляції, а також запропоновано модель розподілу дефектів в двошаровій ізоляції при неруйнівному контролі в процесі виробництва емальдроту.

У двошаровій ізоляції, яка складається з шарів з різними діелектричними властивостями, окрім типових видів поляризації у електричному полі, виникає міграційна поляризація, яка суттєво впливає на розподіл електричного поля в ізоляції. Запропоновано використання схеми заміщення для послідовного з'єднання двох шарів діелектрика з границею між ними, яка є перпендикуляром напрямку силових ліній електричного поля. Схему такого діелектрика наведено на рис.1. Якщо до двошарового діелектрика прикласти постійне електричне поле, то розподіл поля встановлюється відповідно діелектричних проникностей шарів ізоляції: $\varepsilon_1 E_1(0) = \varepsilon_2 E_2(0)$. З часом виникає накопичування зарядів на межі розділу шарів та встановлюється стаціонарний стан. Тривалість цих переходних процесів визначає час релаксації τ . В ізоляції, 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 емалювання більше 100 м/хв.) не тільки відображає наявність механічних неоднорідностей в ізоляції, але й пов'язана з електричними властивостями двошарової емальізоляції.

Рис.1 – Двошарова ізоляція (а) та її схема заміщення (б).

За допомогою результатів руйнівних методів випробувань експериментально досліджено електричну і механічну міцність емальдроту ПЭЭИДХ2-200 з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до 0,63 мм. Розглянуто вплив технологічних параметрів на електричну і механічну міцність. Визначено залежність напруги пробою емалі від товщини як експоненційну функцію середньої напруги пробою від середньої товщини (рис.2). Середні значення U і t для окремих котушок характеризуються значним розсіянням у різні хронологічні періоди виготовлення дроту. При цьому вид статистичного емпіричного розподілу $F(U)$ може суттєво відрізнятися від загальноприйнятого нормального розподілу. Більше того, кореляція між результатами вимірювань U і t для котушок одного діаметра практично відсутня, наприклад, для дроту діаметром 0,630 мм відповідний коефіцієнт близький до нуля: $\text{Korr}(U,t) = 0,136$. Досліджені показники кореляції між характеристиками електричної і механічної міцності для кількох сотень тисяч метрів емальдроту. Показано, що спостерігається кореляція між середнім показником міцності і його середньоквадратичним відхиленням. Наприклад, для дроту діаметром 0,630 мм відповідний коефіцієнт для механічної міцності емалі близький до одиниці: $\text{Korr}(M[Nm],y[Nm]) = 0,877$.

Проаналізовано стабільність технологічного процесу виготовлення дроту на сучасних емальагрегатах за допомогою співставлення дисперсій параметрів і визначення відповідних коефіцієнтів кореляції. На рис. 3 наведено приклад даних, використаних для такого аналізу. На рис.3 надано результати вимірювань діаметру провідника dp і емальдроту di , напруги пробою U для котушок дроту ПЭЭИДХ2-200 діаметром 0,630 мм в порядку їх виготовлення (довжина дроту

Рис. 2 – Залежність напруги пробою U від товщини ізоляції t емальдроту ПЭЭИДХ2-200: чорні точки зправа вверху: кожна точка – середні значення U і t для 20 котушок дроту діаметром 0,63мм; чорні точки зліва внизу: кожна точка – середні значення U і t для 20 котушок дроту діаметром 0,10 мм; пусті точки: кожна точка – середні значення U і t для 20 котушок дроту діаметром 0,56 мм; пряма: емпірична залежність $\ln U = \ln 3096 + 0,014 t$, де U в вольтах, а t в мікронах; пусті великі квадрати і пунктирна пряма – дані з інших джерел.

на котушці 3600 м); наведені значення відносні до середніх: $\delta dp = dp / dp_{cp}$; $\delta di = di / di_{cp}$; $\delta U = U / U_{cp}$; $\delta t = t / t_{cp}$; $K\sigma$ - коефіцієнт однорідності за електричною міцністю відповідно до методології “Six Sigma” ($K\sigma_{cp} = 3,16$); $\text{Kor}(U,t)$ - коефіцієнт кореляції між напругою пробою і товщиною; δU_{min} – мінімальне допустиме відносне зменшення напруги пробою.

Основні вимірювані показники, за якими виконано аналіз стабільності технологічного процесу: діаметр провідника dp і емальдроту di , напруга пробою

U , механічна міцність емалі N (мінімальна і середня), відносно видовження дроту при розриві δ .

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 ; вплив на механічну міцність діаметра мідного провідника dp і товщини t емальізоляції відповідає принципу суперпозиції, тобто відповідний контроль може бути організований за їх сумою: $di = dp + t$; збільшення dp і t зумовлює нерівномірність шару емалі i , як наслідок, збільшення середньоквадратичного відхилення механічної міцності емалі $y[Nm]$; чим більше відносно видовження дроту при розриві δ , тим вища механічна міцність, але одночасно більше її розсіювання. В цілому одержані дані свідчать, що пріоритетною задачею технологічного контролю виготовлення дроту ПЭИДХ2-200 є забезпечення стабільності характеристик мідного провідника.

Рис. 3 – Результати вимірювань діаметру провідника dp і емальдроту di , напруги пробою U для котушок дроту ПЭИДХ2-200 діаметром 0,630 мм в порядку їх виготовлення.

Результати дослідження електричної і механічної міцності емальдроту співставлені з результатами методу неруйнівних випробувань високою напругою на прохід (рис. 4). 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.

Рис. 4 – Схема розташування електрода 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 для компенсації струму абсорбції через двохшарову емальізоляцію.

Кількість дефектів n_j на 100 м дроту є підставою для віднесення цих 100 м до однієї з чотирьох груп: $n_1 \in [0;3]$, $n_2 \in [4;9]$, $n_3 \in [10;18]$, $n_4 \in [19;E_{max}]$.

Співставлення результатів неруйнівного контролю дефектності з даними щодо електричної і механічної міцності свідчить про те, що за однакових параметрів неруйнівного контролю дріт типу 1 (зафіксовані всі чотири групи дефектності) характеризується суттєво меншими розсіюваннями електричної і механічної міцності емаль ізоляції, ніж дріт типу 2 (зафіксовані лише перша і четверта групи дефектності). Аналіз ризиків прийняття технологічних рішень за результатами руйнівних випробувань виконано в рамках класичної імовірнісної моделі (ІМ) за допомогою відомого гіпергеометричного розподілу ймовірностей. Статистичний аспект руйнівних випробувань полягає в тому, що зменшення ризику прийняття неправильного рішення до прийнятного для виробника рівня (наприклад, до кількох відсотків) значно (до 80 % і більше) збільшує ризик невідповідної продукції для користувача. Протиріччя між ризиками виробника і

користувача щодо результатів руйнівних випробувань в рамках ІМ є принциповим. Воно може бути пом'якшене тільки значним збільшенням відносної кількості зруйнованої продукції.

Для розроблення статистичної моделі неруйнівного контролю високою напругою на прохід розроблено імовірнісну модель однорідності емальізоляції.

Результати дослідження параметрів розподілу $F(o)$ за різних швидкостей руху емальдроту через електроди свідчать про те, що залежно від однорідності емальізоляції завжди є така досить велика швидкість руху, за якої система випробувань напругою на прохід фіксує лише наявність або відсутність дефектів на контрольній довжині, тобто контроль з кількісного стає альтернативним. Цей аналіз дозволив в подальшому зформулювати рекомендації для забезпечення ефективності неруйнівного технологічного контролю емальізоляції.

У **третьому розділі** досліджено залежність максимальної ймовірності $P_{\max}(\sigma, x_{gr})$ виходу параметра x , що контролюється в процесі виробництва, за встановлену технологічну межу x_{gr} від поточного статистичного розсіювання цього параметра σ . Метою дослідження є використання для функції $P_{\max}(\sigma, x_{gr})$ аналітичної моделі, яка забезпечує встановлення такої технологічної межі, яка б, з одного боку, включала поточне статистичне розсіювання параметра (контроль від «досягнутого рівня»), а з іншого, – забезпечувала максимальну чутливість контролю до зміни розсіювання параметра в процесі виробництва. Така функція дозволяє ввести в технологічний контроль в процесі виробництва єдиний спосіб визначення поточної технологічної межі для всіх параметрів, які контролюються у вигляді числових показників.

Відповідне дослідження складається з двох основних частин. Перша, – вирішення прикладної математичної задачі дослідження функції для обмеження параметра знизу (не менше) і для двостороннього обмеження. Цю задачу ставить необхідність поточного контролю електричної і механічної міцності емальізоляції (не менше) і поточного контролю діаметрів проволочки та емальдроту (не менше, не більше).

Для цього проаналізовано структури класичних ймовірнісних і інтервальних статистичних моделей, достовірність статистичних висновків цих моделей.

Досліджено функцію максимальної ймовірності виходу параметра за технологічну межу при двосторонньому обмеженні. Розроблено алгоритм побудови відповідної контрольної карти, який може бути заправданий на сучасних емальагрегатах без додаткових витрат. Наведено приклад побудови контрольної карти за результатами моніторингу діаметра емальдроту в процесі виробництва. Зроблено висновок про доцільність використання таких контрольних карт: діаметра проволочки $P_{\max}(\partial dp)$; діаметра емальдроту $P_{\max}(\partial di)$; кількості дефектів $P_{\max}(\partial def)$; показника дефектності $P_{\max}(D)$, розроблення якого представлено у четвертому розділі. Для $P_{\max}(D)$ передбачено збереження даних на магнітних носіях.

За поточними даними контрольних карт $P_{\max}(\partial dp) \cap P_{\max}(\partial di)$ передбачено настройку випробувань на прохід щодо випробувальної напруги і критичного струму. Таким чином, використання максимальної ймовірності

$P_{\max}(\sigma, x, \rho)$ виходу параметра x , що контролюється в процесі виробництва, за встановлену технологічну межу забезпечує єдиний метод оперативного оброблення і представлення результатів контролю різних параметрів, що є особливо необхідним при неруйнівних випробуваннях на прохід високою напругою безпосередньо в процесі виробництва емальдроту на сучасних агрегатах, обладнаних системою моніторингу кількості дефектів емальізоляції.

У **четвертому розділі** експериментально досліджено дефектність емальдроту методом випробувань високою напругою на прохід, за результатами яких встановлено аналітичну функцію розподілу $F(m)$ сумарної кількості дефектів m на котушці:

$$F(m) = 1 - \exp\left(-\frac{m}{\lambda}\right).$$

Проаналізовано електрофізичні процеси при протіканні струму через емальізоляцію, який складається з струму електропровідності ($\gamma = 1/\rho$) і струму зміщення зарядів діелектрика

$$I = \frac{U(t) \cdot F}{\rho \cdot \Delta} + \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{F}{\Delta} \left(\frac{U(t)}{\rho} + \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \cdot U(t) + \varepsilon(t) \frac{dU(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

де F , Δ – площа поперечного перерізу і товщина ізоляції; $U(t)$, $Q(t)$, $\varepsilon(t)$ – відповідно, напруга, заряд на електроді і діелектрична проникність в момент t .

Струм електропровідності зумовлений температурною дисоціацією низькомолекулярних домішок, тому величина відображає чистоту матеріала, зокрема наявність залишків розчинника в емальізоляції. Струм зміщення зумовлений двома складовими: перша, – протіканням в часі процесів поляризації діелектрика, вона характеризується часом встановлення поляризації τ для всіх зв'язаних зарядів діелектрика, які приймають участь у процесі поляризації. Друга, – зміною в часі напруги на зразку діелектрика, яка визначається ємністю зразка і параметрами схеми вимірювання. Вплив останньої складової виключено попередньою зарядкою зразка постійною напругою

Рис. 5 – Залежність відхилення вимірної кількості дефектів для від швидкості виробництва за умови попередньої зарядки емальізоляції.

В шаруватій ізоляції емальдроту має місце міжшарова поляризація, яка супроводжується накопиченням об'ємних зарядів в ізоляції і відповідним перерозподілом напруженості електричного поля. Залежність струму через ізоляцію від часу дії напруги зумовлює збільшення похибки при вимірюванні кількості дефектів при збільшенні швидкості V . Для залежності на рис. 5: 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/хв.

Емпіричні функції $F^*(E)_i$ розподілу кількості дефектів на окремій котушці i визначена за результатами випробувань напругою на прохід наведені на рис.6. Емпіричні функції розподілу функції $F^* \in \bar{E}$ для різних котушок описані експоненціальним законом, оскільки в відповідних лінійних координатах експе-

риментальні точки розташовані на прямих для всіх катушок. Визначення і порівняння параметрів відповідних розподілів для окремих катушок дозволило запропонувати в якості показника дефектності катушки емальдроту емпіричний показник дефектності D_i : $D_i = \exp[-(S_i/4) \cdot E_{\max}]$, де $E_{\max}$ – максимальна кількість дефектів на катушці, яка є технологічною межею, що може бути вибрана залежно від досягнутого рівня однорідності.

Рис. 6 – Емпіричні функції розподілу функції $F^* \in \bar{E}$.

Емпіричний показник дефектності D враховує кількість всіх груп дефектності на катушці (див. рис. 7), отже є показником однорідності емальізоляції.

Рис. 7 – Результати контролю дефектності катушок емальдроту за емпіричним показником дефектності D при використанні контрольної границі: не більше 36 дефектів на катушці.

Використання цього показника D дає можливість отримання більш повної, достатньо чутливої до змін інформації, щодо однорідності емальізоляції, оскільки цей показник, на відміну від інших ($E_{\max}$, $M[E]$, $y[E]$, S), відображає наявність контрольних довжин з відносно малою дефектністю. До того ж цей показник має уніфікований і простий діапазон значень $D \in [0;1]$. Іншою перевагою показника D є те, що для його визначення потрібне визначення контрольної границі $E_{\max}$, що забезпечує гнучкість відповідного контролю. Виконані дослідження дозволили запропонувати нову схему контролю стабільності технологічного процесу виготовлення емальдроту з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів. Схемою передбачено ведення в режимі он-лайн трьох допоміжних контрольних карт максимальної ймовірності виходу наступних параметрів за технологічний норматив: 1) відносного змінення діаметра провідника ∂dp та відповідної величини $P_{\max}(\partial dp)$; 2) відносного змінення діаметра емальдроту ∂di та відповідної величини $P_{\max}(\partial di)$; 3) експоненційного емпіричного показника дефектності D та відповідної величини $P_{\max}(\partial D)$; для останньої контрольної карти експоненційного емпіричного показника дефектності D передбачено зберігання даних на магнітних носіях. Передбачено також додаткову технологічну контрольну операцію настройки випробувань на прохід за величиною випробувальної напруги в діапазоні від 400 В до 2000 В. Критерієм настройки є наявність зафіксованих щонайменше трьох перших груп дефектності.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-прикладна задача створення методу оперативного неруйнівного контролю двохшарової поліімідної ізоляції емальдроту з температурним індексом 200 °С. Основні результати роботи такі:

1. На основі аналізу зв'язку технологічних параметрів виготовлення емальдроту з його характеристиками, які одержують в результаті комплексу руйнівних і неруйнівних випробувань готової продукції, запропоновано комплекс випробувань для емальдроту, який включає нормативні випробування на електричну і механічну міцність (руйнівні) і комплекс неруйнівних випробувань в режимі он-лайн, для контролю стабільності характеристик емальдроту і потребують настройки при його виготовленні.

2. Розроблено статистичну модель дефектності емальізоляції при неруйнівних випробуваннях високою напругою на прохід, придатну для аналізу результатів випробувань на сучасних швидкісних (100-600)м/хв емальагрегатах: досліджено вплив швидкості руху дроту в емальагрегаті на похибку результатів.

3. Експериментально встановлено залежність середнього значення напруги пробою U від діаметральної товщини t шару емалі $U = 3096 \exp(0,014 t)$ для характеристики електричної міцності емальдроту з двохшаровою поліімідною ізоляцією в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до 0,63 мм. Показано, що пластичність міді є важливою складовою забезпечення стабільності технологічного процесу емалювання і що її пластичність суттєво впливає на величину і стабільність напруги пробою дроту.

4. За результатами дослідження електрофізичних характеристик двохшарової ізоляції на основі поліімідних співполімерів для емальдроту марки ПЭИДХ2-200-МЭК у процесі випробувань високою напругою на прохід, зокрема часу релаксації, струму діелектричної абсорбції та розподілу напруженості електричного поля, запропоновано збільшення часу попередньої зарядки ізоляції шляхом збільшення діаметра зарядного роликового електрода. Проаналізовано відповідне зменшення похибки результатів випробувань високою напругою на прохід.

5. Встановлено експоненційний закон розподілу кількості дефектів емальізоляції при випробуваннях високою напругою на прохід, експериментально визначені значення його параметру для котушок проводу марки ПЭИДХ2-200-МЭК, на його основі запропоновано інтегральний показник дефектності котушки, який дозволяє об'єднати всі результати неруйнівних випробувань для даної котушки.

6. Розроблено метод визначення статистичного показника стабільності технологічних параметрів P_{max} на базі математичного апарату інтервальних статистичних моделей при двосторонніх і односторонніх обмеженнях (технологічних нормативах). Експериментально досліджено застосування такого показника до результатів руйнівного і неруйнівного контролю емальдроту.

7. Виконані дослідження дозволили запропонувати схему організації контролю стабільності технологічного процесу виготовлення емальдроту з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів, якою передбачено введення в технологічний процес трьох допоміжних контрольних карт максимальної ймовірності виходу наступних параметрів за технологічний норматив і однієї контрольної карти експоненційного емпіричного показника дефектності D , для якої передбачено зберігання даних на магнітних носіях.

8. Результати дисертаційної роботи щодо визначення статистичного показника стабільності технологічних параметрів при двосторонніх і односторонніх обмеженнях у вигляді методики побудови контрольної карти максимальної ймовірності виходу параметра за технологічний норматив впроваджено в ЗАТ «Південкабель».

9. Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки в НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Голик О.В. Исследование электрической и механической прочности изоляции эмальпроводов. / А.Г. Гурин, Ю.А. Антонец, Л.А. Щебенюк, О.В. Голик // Вістник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2004. – Вип.7. – С.111– 115.

Здобувачем виконано експерименти по визначенню електричної і механічної міцності емальдроту діаметром 1,06 мм з поліефірмідною ізоляцією.

2. Голик О.В. Контроль технологического процесса изготовления эмальпровода./ Ю.А. Антонец, Л.А. Щебенюк, О.В. Голик // Вістник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2005. – Вип.42.– С.43 – 46.

Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку максимальної ймовірності виходу контрольного параметра за встановлену межу при обмеженні параметра знизу(не менше).

3. Голик О.В. Метод контроля параметров эмальпровода./ Л.А.Щебенюк, О.В. Голик // Вістник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2006. – Вип.7. – С.89 – 93.

Здобувачем розроблено статистичну модель розподілу розмірів дефектів емальізоляції.

4. Голик О.В. Анализ возможности использования методов интервальной статистики для создания модели изоляции эмальпровода./ А.Г. Гурин, О.В. Голик // Вістник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2006. – Вип.34.– С.35 – 39.

Здобувачем проаналізовано можливість використання поняття ймовірності в задачах, які баються на постулатах теорії інтервальних статистичних моделей, що базується на первинних середніх.

5. 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. – Вип. 1. – С. 12 –17.

Здобувачем досліджено вплив електрофізичних процесів міжшарової поляризації у подвійній емальізоляції на тривалість та величину струму крізь ізоляцію при випробуваннях на прохід для зменшення похибки при оцінюванні кількості дефектів.

6. Голик О.В. Разработка интегрального показателя дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной изоляцией. / О.В. Голик // Вістник НТУ «ХП». – 2009. – Вип.8. – С. 36 – 44.

Здобувачем запропоновано в результаті дослідження розподілу кількості дефектів використання відносного інтегрального показника дефектності емальізоляції при випробуваннях високою напругою на прохід.

7. Голик О.В. Повышение однородности продукции при волочении – путь к прямой экономии цветного металла: інформація по 10-й міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (Харків, 16-17 травня 2002.) / Л.А. Щебенюк, О.В. Голик. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002.

Здобувачем проаналізовано прямий економічний ефект від зменшення розсіяння діаметру мідної проволочки після середнього волочіння.

8. Голик О.В. Дослідження дефектності ізоляції емальпроводів неруйнівним методом технологічних випробувань високою напругою: інформація по XVI міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», (Харків, 4-6 червня 2008 р.) / Л.А. Щебенюк, О.В. Голик. — Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 504 с.

Здобувачем наведені загальні аспекти результатів досліджень дефектності ізоляції емальдроту в умовах неруйнівних випробувань.

АНОТАЦІЇ

Голик О.В. Метод оперативного контролю параметрів двошарової поліімідної ізоляції емальдроту в процесі виробництва. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

Дисертація присвячена: створенню системи технологічного контролю, метою якої є неухильне підвищення надійності продукції у виробництві емальдроту з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів марки ПЭИДХ2-200-МЭК; розробленню статистичного методу для оброблення, порівняння та аналізу результатів вимірювань параметрів емальізоляції цього емальдроту на основі математичного апарату інтервальних статистичних моделей для застосування в активному технологічному контролі; виробленню рекомендацій щодо параметрів такого контролю, придатних для використання на сучасних швидкісних емальагрегатах і апробація цих рекомендацій на реальному обладнанні. Теоретично обґрунтовано і перевірено експериментально можливість зменшення залежності похибки від швидкості руху при визначенні кількості дефектів емальізоляції у неруйнівних поточних випробуваннях високою напругою на прохід за рахунок оптимізації попередньої поляризації ізоляції емальдроту ПЭИДХ; експериментально встановлено залежність середнього значення напруги пробою U від діаметральної товщини t шару емалі для характеристики електричної міцності емальдроту ПЭИДХ2-200-МЭК з двошаровою поліімідною ізоляцією в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до

0,63 мм; розроблено метод оперативного неруйнівного контролю кількості дефектів емалізоляції при випробуваннях на прохід; розроблено інтегральний показник дефектності котушки проводу, використання якого для неруйнівного контролю кількості дефектів емалізоляції при випробуваннях на прохід дозволяє об'єднати всі результати неруйнівних випробувань і тим самим забезпечити оперативний порівняльний неруйнівний контроль продукції.

Ключові слова: метод оперативного неруйнівного контролю, емальдріт з поліімідною ізоляцією, активний контроль, похибки від швидкості руху при визначенні кількості дефектів емалізоляції, випробування напругою на прохід.

Голик О.В. Метод оперативного контроля параметров двуслойной полиимидной изоляции эмальпровода в процессе изготовления. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2009.

Диссертация посвящена: созданию системы технологического контроля, целью которой является повышение надежности продукции в производстве эмальпровода марки ПЭИДХ2-200-МЭК с двуслойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров; разработан статистический метод для обработки, сравнения и анализа результатов измерений параметров эмалезоляции этого эмальпровода на основе математического аппарата интервальных статистических моделей для применения в активном технологическом контроле; выработке рекомендаций для параметров такого контроля, пригодных для использования на современных скоростных эмальагрегатах и апробация этих рекомендаций на реальном оборудовании. Теоретически обосновано и проверено экспериментально возможность уменьшения зависимости ошибки от скорости движения провода при определении количества дефектов эмалезоляции в неразрушающих испытаниях высоким напряжением на проход за счет оптимизации предварительной поляризации изоляции эмальпровода ПЭИДХ; экспериментально определена зависимость среднего значения напряжения пробоя U от диаметральной толщины t слоя эмали для характеристики электрической прочности эмальпровода ПЭИДХ2-200-МЭК с двухслойной полиимидной изоляцией в диапазоне номинальных диаметров от 0,10 мм до 0,63 мм; разработан метод оперативного неразрушающего контроля количества дефектов эмалезоляции при испытаниях на проход; разработан интегральный показатель дефектности катушки провода, использование которого для неразрушающего контроля количества дефектов эмалезоляции позволяет объединить все результаты неразрушающих испытаний и тем самым обеспечить оперативный сравнительный неразрушающий контроль продукции.

Основными направлениями усовершенствования приборов для неразрушающих испытаний были:

- применение критерия регулирования испытательного напряжения и критического тока универсального устройства для испытаний на проход, при которых фиксируется дефект с учетом электрической и механической пронос

ти эмали и соответствующих статистических параметров рассеяния этих характеристик. Критерием настройки является наличие зафиксированных, как минимум, первых трех групп дефектности. Настройка производится непосредственно в процессе испытаний напряжением на проход;

- усовершенствование конструкции роликовых электродов универсального устройства для испытаний на проход на основе исследования влияния скорости движения эмальпровода, с одной стороны, и временных характеристик поляризации двухслойной полиимидной изоляции с другой, на погрешность в определении количества дефектов с целью уменьшения этой погрешности. Предусмотрено увеличение времени предварительной зарядки изоляции перед испытаниями напряжением на проход (ориентировочно в 1.5 – 2 раза) путем увеличения диаметра зарядного электрода;

- применение метода обработки и анализа результатов неразрушающих испытаний на основе статистической модели дефектности эмальизоляции с использованием математического аппарата интервальных статистических моделей.

Ключевые слова: метод оперативного неразрушающего контроля, эмальпровод с полиимидной изоляцией, активный технологический контроль, погрешность под влиянием скорости движения провода при определении количества дефектов эмальизоляции, испытания напряжением на проход.

O.V.Golik. Method for control parameters in enameled wire insulated articles – manuscript.

The dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.11.13 – devices and methods testing and determination of materials composition of materials.—National Technical University “Kharkov Polytechnical Institute”, Kharkiv. – 2009.

The dissertation work is devoted: to creation of a system of technological monitoring, which purpose is the increase of reliability of production in production of enameled wire the mark ПЭЭИДХ2-200-МЭК with two-sheeted isolation because of poliimid polymer; the statistical method for processing, comparison and analysis of outcomes of measurements of parameters isolation it enameled wire because of mathematical means of interval statistical models for application in active technological monitoring is developed; to development used of the recommendations for parameters of such monitoring, suitable for used on modern high-speed enameled equipment and approbation of these recommendations on the actual equipment. Is theoretically justified and the possibility of a diminution of dependence of an error from a velocity of movement of a wire for want of quantifying of defects enameled isolation in not destroying tests by high voltage on pass is checked experimentally at the expense of optimization of preliminary polarization of isolation enameled wire ПЭЭИДХ. The dependence of average value of voltage of a breakdown U from a diametrical thicknesst of a stratum of an enamel for performance of electrical strength enameled wire ПЭЭИДХ2-200-МЭК with two-layer poliimid by isolation in a range of nominal diameters from 0,10 mm up to 0,63 mm is experimentally determined; the method of operating not destroying monitoring of an amount of defects enameled iso

lation for want of tests for pass is developed; the integrated parameter of presence of defects of a spool of a wire is developed, which use for not destroying monitoring of an amount of defects enameled isolation allows to unit all outcomes of not destroying tests and by that to supply operating comparative not destroying monitoring of production.

Keywords: method of operating not desroying, enameled wire with poliimid isolation, active technological monitoring, error under influence of a velocity of movement of a wire for want of quantifying of defects enameled isolation, test by voltage on pass.