

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Антонець Станіслав Юрійович**



УДК 620.179.148:621.315.2

**МЕТОД І ПРИСТРІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО  
КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ЕМАЛЬОВАНОГО ПРОВОДУ 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 – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету «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», м. Харків,  
завідувач кафедрою електроізоляційної та  
кабельної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Стороженко Володимир Олександрович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, м. Харків,  
професор кафедри фізики

кандидат технічних наук, доцент  
**Волохін Віталій Васильович**,  
Сумський державний університет, м. Суми,  
доцент кафедри електроенергетики

Захист відбудеться: 04.06.2015 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 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 « 27 » квітня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Глоба С. М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Емальовані проводи для обмоток електричних машин і апаратів мають високі електрофізичні характеристики і їх створення є одним із вагомих досягнень світової кабельної техніки. Освоєння виготовлення такої продукції вітчизняною кабельною технікою дозволило забезпечити найвищий сучасний рівень характеристик виткової ізоляції обмоток електричних машин і апаратів, і тим самим збільшити конкурентоспроможність продукції вітчизняної електротехніки.

В процесі впровадження цієї продукції не припинялась робота над вдосконаленням системи контролю емальованого проводу в процесі виробництва. В цих умовах виникла конкуренція виробників щодо однорідності параметрів емальованого проводу, а саме, - мінімізації статистичного розсіяння електромеханічних параметрів. Така ситуація вимагає дослідження причин появи розсіяння, а також пошук технологічних рішень, що забезпечують сталу тенденцію його зменшення.

Вивчення впливу дефектності поверхні мідної проволочки на напругу пробою і кількість точкових пошкоджень на одиничній довжині емальованого проводу на сьогоднішній день є актуальною задачею, вирішення якої визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХПІ». Здобувач, як виконавець, брав участь у науково-дослідних держбюджетних роботах: «Розроблення стандартів, гармонізованих з міжнародними та європейськими» (Держспоживстандарт України, м. Харків ДР № 1148/92873), співпраці НТУ «ХПІ» та ДП «УкрНДНЦ», м. Харків (ДР № 767/81888), «Дослідження ефективності технологічного контролю в забезпеченні надійності кабельно-провідникової продукції в умовах діючого виробництва з метою розширення впровадження інноваційних продуктів в енергосистеми України» (ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ», м. Харків, ДР № 81085).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка удосконаленого методу технологічного контролю електромеханічних параметрів емальованого проводу, що полягає в додатковій оцінці дефектності поверхні мідної проволочки, яка зумовлює кількість точкових пошкоджень в ізоляції проводу на одиничній довжині за неруйнівних випробувань напругою на прохід.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні задачі:

- виконати експериментальні дослідження формування електрофізичних параметрів ізоляції емальованого проводу в процесі виготовлення шляхом вимірювання параметрів після проходження кожного калібру маршруту;
- проаналізувати вплив складу речовини ізоляції емальованого проводу щодо двошаровості на його електрофізичні параметри;
- розробити фізико-математичну модель нерівності на поверхні проволочки, яка б дозволила кількісно характеризувати розмір критичної нерівності при випробуваннях напругою на прохід, та електрофізичну модель процесу нанесення емальізоляції;

- розробити показник дефектності мідної проволочки для використання в технологічному контролі емальізоляції та провести апробацію розробленого методу технологічного контролю емальпроводу на реальному виробництві.

*Об'єкт дослідження* – процес формування електрофізичних параметрів, зокрема електричної та механічної міцності, двохшарової ізоляції емальованого проводу в технологічному процесі ізолювання проволочки.

*Предмет дослідження* – технологічний контроль електромеханічних параметрів емальованого проводу марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56 на всіх етапах емальювання мідної проволочки впродовж технологічного маршруту.

**Методи дослідження** базуються на використанні: методів вирішення основної електростатичної задачі – знаходження розподілу потенціалу в замкненій області для дослідження формування електричної міцності емальізоляції; теорії поляризації неоднорідних діелектриків для дослідження перехідного процесу в ізоляції за неруйнівних випробувань високою напругою на прохід на сучасних швидкісних емальагрегатах; методів дисперсійного аналізу для розробки статистичної моделі дефектності поверхні мідної проволочки та дослідження дисперсії електричної міцності емальованого проводу марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Запропоновано новий метод оцінки розміру типового дефекту поверхні емальованої проволочки, який зумовлює кількість точкових пошкоджень в ізоляції на одиничній довжині проводу. Розмір дефекту визначають як середнє значення за двома способами оцінки:

- впродовж маршруту емальювання контролюється кількість точкових пошкоджень, діаметр проволочки та проводу, і знаходиться середній розмір типового дефекту  $\zeta_1$  з однопараметричної експоненційної залежності;

- впродовж маршруту емальювання контролюється напруга пробою і виконується розрахунок максимальної напруженості електричного поля  $E_{max}(t(i))$  на типовому дефекті  $\zeta_1$ , за оцінку  $\zeta_2$  приймають половину товщини ізоляції  $t(i)$ , при якій залежність  $E_{max}(t(i))$  характеризується мінімумом.

2. Вперше запропоновано запатентований експериментальний метод видалення емальізоляції, що полягає в наступному: кінці зразка витримують у ванні з мурашиної кислотою для видалення ізоляції на потрібній ділянці, провідник підключають до електричної схеми індикації контакту ножового затиску і за допомогою останнього видаляють локально ізоляцію проводу. Таким чином надана можливість визначення складу поверхні проволочки і зниження похибки при оцінці електричного опору проволочки до декількох десятків часток відсотка в порівнянні з існуючими способами механічної зачистки емалі.

3. Побудовано електрофізичну модель процесу емальювання проводу, який складається з двох етапів: на першому товщина діаметрального шару нанесеної висушеної емалі менше, ніж подвоєний розмір критичного дефекту поверхні  $(di-dp) < 2 \cdot \zeta$ , на другому – навпаки  $(di-dp) > 2 \cdot \zeta$ . Це дозволяє використовувати товщину висушеної емалі в якості кількісної характеристики розміру критичного

дефекту поверхні провідника, що зумовлює кількість точкових пошкоджень в ізоляції на одиничній довжині проводу.

4. Обґрунтовано забезпечення часу попередньої зарядки ізоляції не менше, ніж подвоєний час релаксації міграційної поляризації. Таким чином зменшується похибка при визначенні кількості точкових пошкоджень в ізоляції на одиничній довжині проводу з (15-30) % (в залежності від швидкості емальювання) до (5-10) %.

**Практичне значення одержаних результатів** для галузі електромашинобудування і кабельної техніки:

1) застосування методу оцінки показника дефектності поверхні проволони з використанням статистичної процедури ведення контрольної карти максимальної ймовірності виходу параметру за встановлену нормативну межу забезпечує попередження появи емальованого проводу, що має неприпустимі значення кількості дефектів при випробуванні напругою на прохід;

2) розроблено та апробовано в умовах діючого виробництва комплекс апаратури для вимірювання параметрів емальованого проводу вздовж технологічного маршруту. Комплекс включає у себе як сертифіковані прилади та устаткування, так і новий запатентований пристрій для очищення емальованого проводу від ізоляції без ушкодження мідної проволони з подальшим вимірюванням її електричного опору (патенти України № 94324 та № 94444).

Результати роботи використано при виконанні Держбюджетних науководослідницьких робіт по розробці державних стандартів України, узгоджених з європейськими і світовими стандартами в сфері контролю характеристик кабелів і проводів на ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ» та в навчальному процесі кафедри електроізоляційної і кабельної техніки за спеціальністю 7.0906.04 «Техніка і електрофізика високих напруг» в практичних і лабораторних заняттях за курсами «Кабельна техніка», «Технологія виготовлення проводів», «Надійність і діагностика ізоляції».

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи, що винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка методу технологічного контролю електромеханічних параметрів емальованого проводу; введення емпіричної моделі для розрахунку розсіяння напруги пробою ізоляції емальованого проводу; проведення експерименту з визначення характеристик проводу ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56 впродовж маршруту емальювання; створення комплексу апаратури, що включає новий запатентований пристрій для очищення емальованого проводу від ізоляції без ушкодження мідної проволони та подальшого вимірювання її електричного опору; теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка способу зменшення похибки при визначенні кількості точкових пошкоджень в ізоляції на одиничній довжині проводу за рахунок оптимізації часу попередньої зарядки ізоляції; виконання класифікації дефектів поверхні проволони для проводу ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались на: Міжнародних науково-практичних конфере-

нціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2010, 2012, 2013, 2014 рр.), Міжнародному симпозиумі «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів» (м. Харків, 2011 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 17 наукових публікаціях, з них: 10 статей у наукових фахових виданнях України (1 – у виданні, включеному до міжнародних наукометричних баз) і 1 стаття у закордонному періодичному фаховому виданні, 2 патенти України, 4 тези доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 183 сторінки, з них: 73 рисунки по тексту; 5 рисунків на 5 окремих сторінках; 11 таблиць по тексту; списку використаних джерел з 173 найменувань на 17 сторінках, 2 додатки на 8 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, наведено особистий внесок здобувача у друкованих роботах із співавторами, наведена апробація роботи та її структура.

**У першому розділі** виконано аналіз сучасних матеріалів, технологій і методів контролю параметрів емальованих проводів.

Склад речовини ізоляції проводів відрізняється тим, що поверх шару основного поліефірмідного (ПЕІ) емальлаку наноситься шар покривного поліамідмідного (ПАІ) емальлаку. Особливістю ПЕІ емальлаків є те, що повне завершення процесу полімеризації плівки лаку відбувається тільки в дуже тонких шарах, товщина яких співмірна із розмірами нерівностей на поверхні проволочки. Це вказує на доцільність вивчення складу поверхні і типів нерівностей.

Аналіз діючої нормативної документації щодо методів випробувань продукції засвідчив перспективність подальшої розробки і впровадження у виробництво додаткових методів контролю параметрів емальованого проводу.

В практиці світових виробників емальованих проводів використовують контроль кількості точкових пошкоджень ізоляції проводу. Саме ця характеристика є критерієм ефективності маршруту калібрів емальювання.

**Другий розділ** присвячено дослідженню формування характеристик двошарової поліімідної ізоляції у процесі виробництва.

Емальований провід марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56 є найбільш масовою продукцією з усього діапазону емальованих проводів. Експериментальне дослідження розсіяння параметрів вибраного проводу засвідчило, що визначені за нормативами значення основних параметрів, а саме, – напруги пробою  $U$ , механічної міцності ізоляції  $N$ , кількості слабких місць  $er$  мають суттєве розсіяння у різні хронологічні періоди виготовлення проводу. За кількісну характеристику розсіяння  $U$  вибрано середньоквадратичне розсіяння  $\sigma^*[\ln U]$ . Це дозволило виконати аналіз розсіяння  $U$  у вигляді статистичної моделі розсіяння напруги

пробою емальізоляції як суми двох характеристик розсіяння експериментально визначених характеристик проводу: середньоквадратичного розсіяння товщини ізоляції і середньоквадратичного розсіяння відносного видовження при розриві (табл. 1 і рис. 1). Коефіцієнт при  $\sigma^*[t]$  є емпіричним параметром залежності  $\ln U = f(t)$ . Аналіз експериментальних даних засвідчив те, що розсіяння напруги пробою визначається розсіянням товщини ізоляції і пов'язане з розсіянням відносного видовження проводу при розриві.

Таблиця 1 - Фактори впливу на розсіяння напруги пробою  $U$ .

№№ котушок	$\sigma^*[\ln U]$ , де $U$ у В	$\sigma^*[t]$ , мм	$\sigma[\ln U] = 0,014 \cdot 2 \cdot \sigma^*[t] \cdot 10^3 + \sigma^*[\delta]/\delta^*_{cp}$
0 - 19	0,082	$1,265 \cdot 10^{-3}$	0,104
20 - 39	0,171	$2,594 \cdot 10^{-3}$	0,141
40 - 59	0,136	$1,828 \cdot 10^{-3}$	0,120

Ізоляція емальованого проводу марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56 складається з одинадцяти шарів (ПЕІ) лаку і чотирьох шарів (ПАІ) лаку, які є різними за полярністю та електропровідністю. Для такої ізоляції характерним є процес накопичення зарядів на межах між матеріалами з різними електрофізичними характеристиками (міграційна поляризація). Процес зумовлює протікання струму, який залежить і від структури ізоляції і від електрофізичних параметрів її складових, тобто змінюється впродовж технологічного процесу емальювання. Кількісною характеристикою міграційної поляризації в конкретному об'єкті є тривалість перехідного процесу – час релаксації міграційної поляризації  $\tau$ .

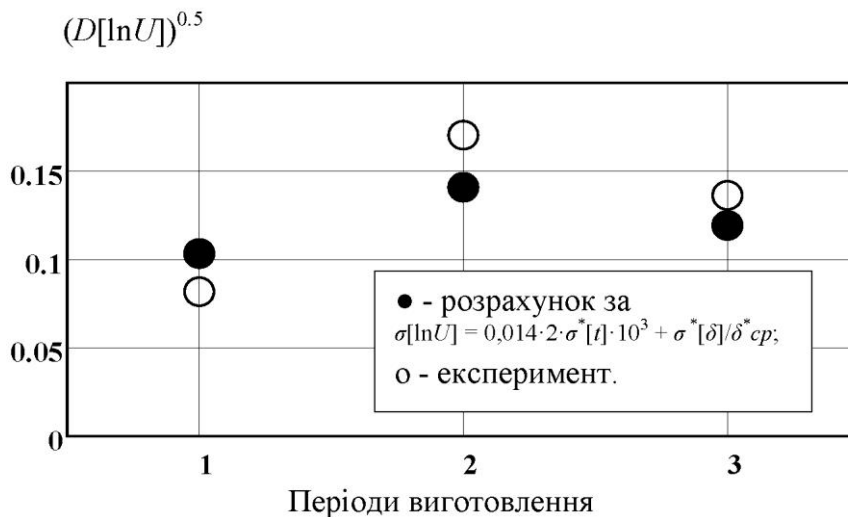


Рисунок 1 - Результати оцінки  $\sigma[\ln U]$  ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56 в три різні технологічні періоди виготовлення: 1 – №№ 0-19; 2 – №№ 20-39; 3 – №№ 40-59 (табл. 1).

Електрофізична модель емальованого проводу в процесі емальювання базується на таких вихідних положеннях:

1) електричне поле в шарах ізоляції радіальне, тобто можливе заломлення силових ліній на межах шарів, наприклад через ексцентриситет емалі, не врахо-

ується, але площа сусідніх шарів не може бути прийнята однаковою, як це прийнято у відомих моделях;

2) діелектрик в межах одного шару однорідний, а кількість шарів в моделі вибирається на основі припущення, що після проходження через полімеризаційну піч двічі, електрофізичні параметри полімеру є усталеними, що дозволяє обмежити найбільшу кількість шарів у моделі трьома, наприклад: ПЕІ висушений, ПАІ висушений, ПАІ висушений частково;

3) схема заміщення кожного шару – це паралельно з'єднані ємність і опір, а шари діелектрика з різними електрофізичними характеристиками з'єднані послідовно, що описує система рівнянь

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (\gamma_i \cdot E_i + \varepsilon_i \cdot \frac{dE_i}{dT}) = 0 & (1) \\ \sum_{i=1}^n U_i = U & (2) \end{cases}$$

де  $n$  – кількість шарів в моделі;  $\varepsilon_i$ ,  $\gamma_i$  – абсолютна діелектрична проникність і питома електропровідність  $i$ -того шару;  $E_i$ ,  $U_i$  – напруженість електричного поля і напруга для  $i$ -того шару;  $T$  – час від моменту включення напруги.

Час релаксації міграційної поляризації  $\tau$  як рішення (1) і (2) для трьох радіальних шарів з різними електрофізичними параметрами

$$\sum_{i=1}^n R_i / \frac{R_i C_i}{1-\tau} = \frac{(2\pi\gamma_1)^{-1} \cdot \ln(\frac{r_1}{r_0})}{\tau - \frac{\varepsilon_1}{\gamma_1}} + \frac{(2\pi\gamma_2)^{-1} \cdot \ln(\frac{r_2}{r_1})}{\tau - \frac{\varepsilon_2}{\gamma_2}} + \frac{(2\pi\gamma_3)^{-1} \cdot \ln(\frac{r_3}{r_2})}{\tau - \frac{\varepsilon_3}{\gamma_3}} = 0, \quad (3)$$

де  $R_i$ ,  $C_i$  – опір і ємність шарів діелектрика,  $r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  – радіуси шарів діелектрика.

На рис. 2 наведено результати оцінки динаміки змінення  $\tau$  впродовж процесу емалювання емальованого проводу марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56. Одержані значення  $\tau$  використані для визначення часу попередньої зарядки діелектрика при неруйнівному випробуванні напругою на прохід. Це дозволило зменшити похибку при оцінюванні кількості точкових пошкоджень в ізоляції проводу з (15-30) % до (5-10) %.

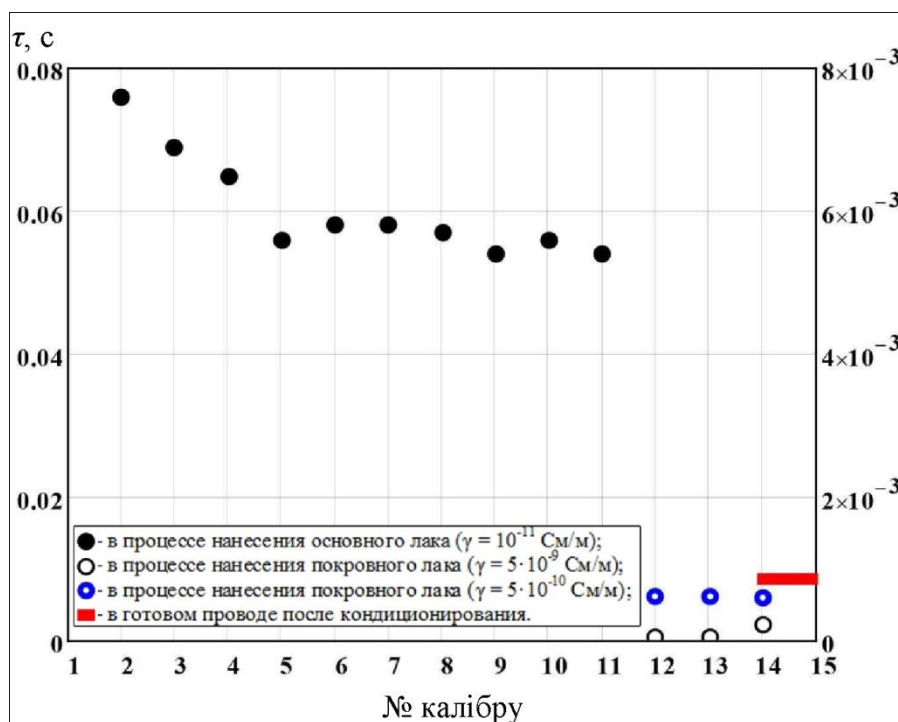


Рисунок 2 - Динаміка змінення часу релаксації міграційної поляризації  $\tau$  за (3) проводу марки ПЭЭИДХ2-200-МЭК 0,56 в процесі емалювання.



**Третій розділ** присвячено дослідженню впливу параметрів мідної проволочки на електрофізичні характеристики емальізоляції, зокрема на динаміку зменшення точкових пошкоджень впродовж проходження маршруту емальювання.

Експериментально відзначено, що при проходженні маршруту кількість точкових пошкоджень  $er$  зменшується експоненційно. Залежність цього параметру від товщини ізоляції  $er = f(t)$  описана сумою двох експонент (рис. 3). Перша експонента оснований на припущенні про те, що на початку маршруту типовий дефект поверхні зменшує локальне значення товщини ізоляції, друга – практично не залежить від розміру типового дефекту

$$er(i) = A \cdot \exp\{-\lambda_1 \cdot [t(i) - \zeta]\} + B \cdot \exp[-\lambda_2 \cdot t(i)], \quad (4)$$

де  $\lambda_1, \lambda_2$  – параметри експонент,  $\lambda_1$  – величина, обернена до середньої ефективної товщини ізоляції (зменшеної на розмір критичного дефекту  $\zeta$ );  $\lambda_2$  – величина, обернена до середньої товщини ізоляції;  $t(i)$  – товщина ізоляції після проходження  $i$  калібрів маршруту. Параметри експонент для перших п'яти калібрів, визначені як спільне рішення (4) для експериментальних значень  $t(i)$  і  $er(i)$ :  $A = 130$ ;  $\lambda_1 = 4,6 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ ;  $\zeta = 6,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $B = -14,4$ ;  $\lambda_2 = 2,2 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ .

Залежність (4) дозволила оцінити:

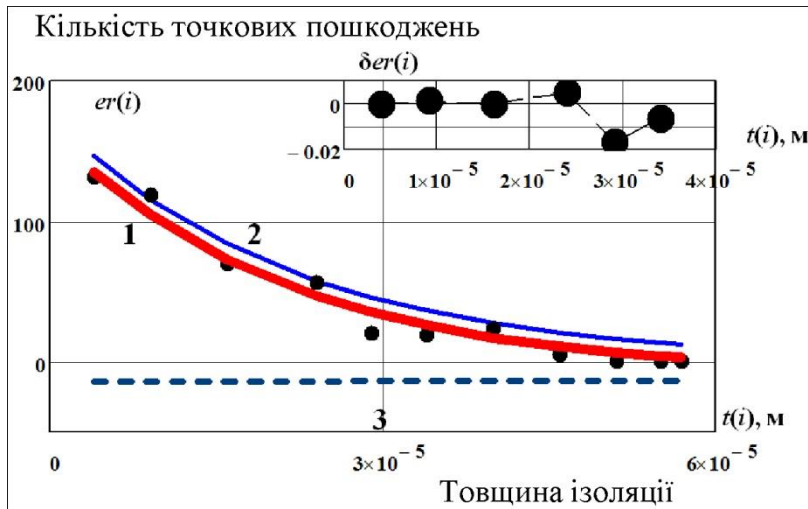
1) середній розмір критичного дефекту поверхні проволочки, що визначає кількість слабких місць на першій ділянці маршруту  $\zeta = 6,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , що приблизно співпадає з результатами прямих вимірювань:  $(5 \pm 1) \text{ мкм}$  (табл. 2);

2) середня діаметральна товщина ізоляції на першій ділянці маршруту, одержана за (4)  $\lambda_1^{-1} = (4,6 \cdot 10^4)^{-1} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  відповідає експериментальним даним (рис. 3). Це дозволило виділити серед різних дефектів поверхні проволочки типовий, який є основним фактором, що визначає появу слабких місць в ізоляції, а відтак розробити модель такого дефекту (рис. 4) і його впливу на формування електричної міцності ізоляції в процесі емальювання.

Таблиця 2 - Оцінки розмірів дефектів поверхні проволочки за збільшення  $1 \times 100$ .

№ калібру	Дефекти типу «раковина»		Дефекти типу «борозенка»			Поперечні дефекти		Розрахунок
	Розміри в мм							
	мін.	макс.	мін.	макс.	сер.	мін.	макс.	сер.
0	<0,01	0,05	0,001	0,01	0,005	–	–	0,0032
1	<0,01	0,03	0,001	0,01	0,005	–	–	0,0062
2	<0,01	0,03	0,001	0,01	0,005	–	–	0,0055
3	<0,01	0,03	0,001	0,01	0,005	0,0005	0,02	0,0064
4	<0,01	0,03	0,001	0,01	0,005	0,0005	0,02	0,0027
5	<0,01	0,03	0,001	0,01	0,005	0,0100	0,05	0,0030
6	<0,01	0,03	0,001	0,01	0,005	0,0100	0,05	0,0042
11	<0,01	0,03	0,001	0,01	0,005	0,0005	0,005	–

Залежність (4) для розрахунку максимальної напруженості електричного поля на дефекті (6), (7), яка має місце при випробуваннях на пробій на скрутках:



паралельні циліндри, горизонтальна пряма – вісь симетрії поля.

Рисунок 3 - Експериментальна оцінка  $er(i)$  від товщини ізоляції  $t(i)$  (точки) і представлення її сумою (1) двох експонент (2 і 3), відносна похибка апроксимації до експоненційної оцінки на першій ділянці маршруту не перевищує 2 %.

В точці  $A$  напруженість електричного поля максимальна, електроди розташовані в комплексній площині  $Z(x; jy)$  для застосування конформного перетворення нерадіального поля в поле двох концентричних кіл  $W = 1/Z$ . Рішення для точки  $A$  є відомим і використане для перевірки моделі. Для будь-якої точки навколо дефекту аналітичне рішення полягає в конформному перетворенні системи в площині  $Z(x; jy)$ , в площину  $W(u; jv)$ :  $u = x/(x^2 + y^2)$ ;  $v = -y/(x^2 + y^2)$ . При цьому умову Коші-Римана виконано:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{-2xy}{(x^2 + y^2)^2}. \quad (5)$$

Тому  $dU = -E_w dW = -E_z dZ$ , а  $E_w$  знаходиться за відомими формулами для поля двох концентричних кіл. Реалізація цього перетворення в поставленій задачі для будь-якої точки навколо дефекту, зокрема, для шаруватого діелектрика, що утворюється на різних етапах маршруту емалювання наведена в (6), (7).

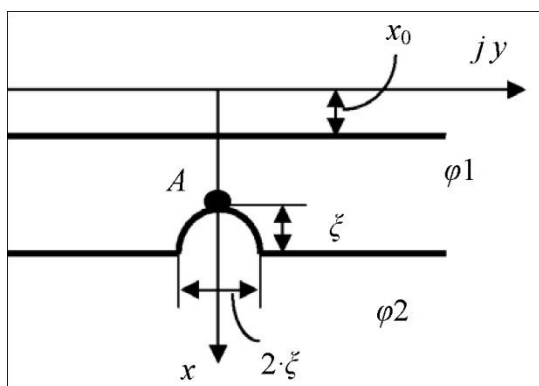


Рисунок 4 - Модель типового (характерний результат операції волочіння) дефекту поверхні проволочки  $\xi$ :  $A$  – точка в ізоляції, де  $E = E_{max}$ ;  $\xi$  – розмір типового дефекту поверхні проволочки;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – потенціали поверхні провідника і лінії симетрії в скрутці;  $x_0$  – допоміжний параметр конформного перетворення.

Оскільки товщина ізоляції впродовж маршруту емалювання змінюється, то для забезпечення співпадання центрів кіл у площині  $W$  геометричні параметри перетворення  $W = 1/Z$ ,  $x_0$ ,  $a$ ,  $\rho$  системи електродів в площині  $Z$ , змінюються, що ілюструє рис. 5 і формули (6), (7). Розроблено програми обчислень для подвій-

ного конформного перетворення з урахуванням того, що діелектрик складається з шарів з різними електрофізичними параметрами.

Для обчислень при подвійному конформному перетворенні геометричні параметри мають забезпечити розташування ліній рівного потенціалу у площині  $W$  за вибраної постійної різниці потенціалів між ними. Використано експериментальні значення діаметру проволочки  $dp(i)$ , діаметральної товщини ізоляції  $t(i)$ , модель типового дефекту поверхні проволочки  $\zeta$ . Характерні картини поля в емалізольції після проходження одинадцятого калібру, тобто до накладання покривного лаку з іншими електрофізичними параметрами, побудовані за цим алгоритмом, за відсутності дефекту поверхні проволочки та навколо дефекту поверхні проволочки розміром  $\zeta = 4$  мкм, наведені на рис. 6.

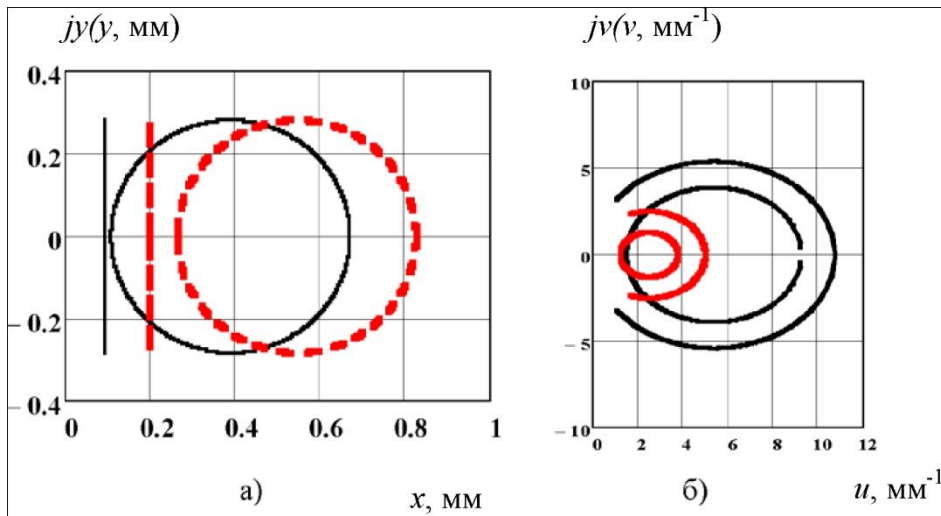


Рисунок 5 - Змінування геометричних параметрів при перетворенні  $W = 1/Z$  для другого і тринадцятого калібрів у маршруті за відсутності дефектів на поверхні проволочки.

Розподіл для двохшарової ізоляції з різними діелектричними проникностями при емалюванні визначено формулами:

$$E(i, p) = \frac{U \cdot (xv(i, p))^{-2}}{(\ln(\frac{Rwv(i)}{\rho(i)}) \cdot \varepsilon_1^{-1} + \ln(\frac{a(i)}{Rwv(i)}) \cdot \varepsilon_2^{-1}) \cdot Rw(i, p) \cdot \varepsilon_1}; \quad (6)$$

$$E(i, g) = \frac{U \cdot (xv(i, g))^{-2}}{(\ln(\frac{Rwv(i)}{\rho(i)}) \cdot \varepsilon_1^{-1} + \ln(\frac{a(i)}{Rwv(i)}) \cdot \varepsilon_2^{-1}) \cdot Rw(i, g) \cdot \varepsilon_1}, \quad (7)$$

де  $i$  – номер калібру;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – відносні діелектричні проникності двох шарів ізоляції;  $Rw(i, p)$ ,  $Rw(i, g)$  – поточні радіуси в двох шарах ізоляції у площині  $W$ ;  $xv(i, p)$ ,  $xv(i, g)$  – поточні значення координати  $x$  в двох шарах ізоляції у площині  $Z$ ;  $U$  – напруга пробою при випробуванні на скрутках;  $p$ ,  $g$  – номери еквіпотенціалей в шарі ізоляції  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ , відповідно;  $Rwv$  – радіус межі розділу двох шарів ізоляції у площині  $W$  за товщини  $\Delta$  шару ізоляції у площині  $Z$ , прилеглого до прямої  $x = x_0$ ;  $a(i)$ ,  $\rho(i)$  – геометричні параметри перетворення:

$$a(i) = (2 \cdot x_0(i))^{-1}; \quad (8)$$

$$\rho(i) = \left[ (a(i))^2 - \left[ \left( x_0(i) + \frac{t(i)}{2} \right)^2 - \xi^2 \right]^{-1} \right]^{0.5}; \quad (9)$$

$$x_0(i) = \left[ \left( \frac{t(i)}{2} \right)^2 - \xi^2 \right]^{0.5}; \quad (10)$$

$$Rwv(i) = (x_0(i) + \Delta)^{-1} - a(i). \quad (11)$$

Приклад результатів розрахунку за (6), (7) для  $\varepsilon_1 = 3,5$  (ПЕІ лак),  $\varepsilon_2 = 1$  (повітря),  $\zeta = 4$  мкм,  $\Delta = 0,0025$  мм на різних ділянках маршруту наведено на рис. 7.

Вплив прошарку повітря при випробуванні скрутки на пробій тим менший, чим більша товщина ізоляції. Для готового емальованого проводу критерієм електричної міцності ізоляції вибрано максимальну напруженість  $E_{max}$  біля дефекту. Спостерігається дві різні тенденції: різке зменшення  $E_{max}$  на перших калібрах і поступове збільшення після четвертого калібру. На калібрах №№ 2, 3 плівка емалі приблизно повторює рельєф міді. Кількість перших калібрів, на яких спостерігається перша тенденція, є критерієм дефектності поверхні проволочки. На залежності коефіцієнта неоднорідності електричного поля  $k(E) = E_{max}/E_{ср}$  від номера калібру цей критерій дефектності відповідає мінімуму (рис. 8).

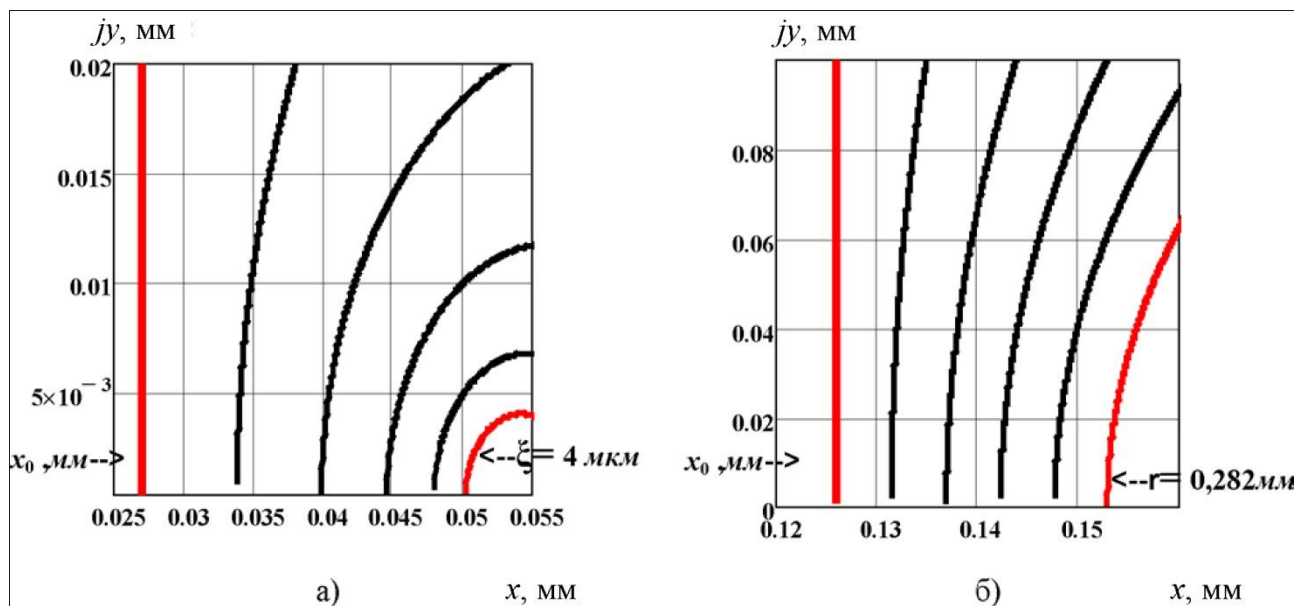


Рисунок 6 - Еквіпотенціали поля в емальізоляції після проходження одинадцятого калібру: а) навколо дефекту проволочки розміром  $\zeta = 4$  мкм; б) за відсутності дефекту поверхні проволочки радіусом  $r = 0,282$  мм;  $x_0$  – координата зсуву на осі  $x$  системи електродів в площині  $Z$  за (2) і (1) відповідно.

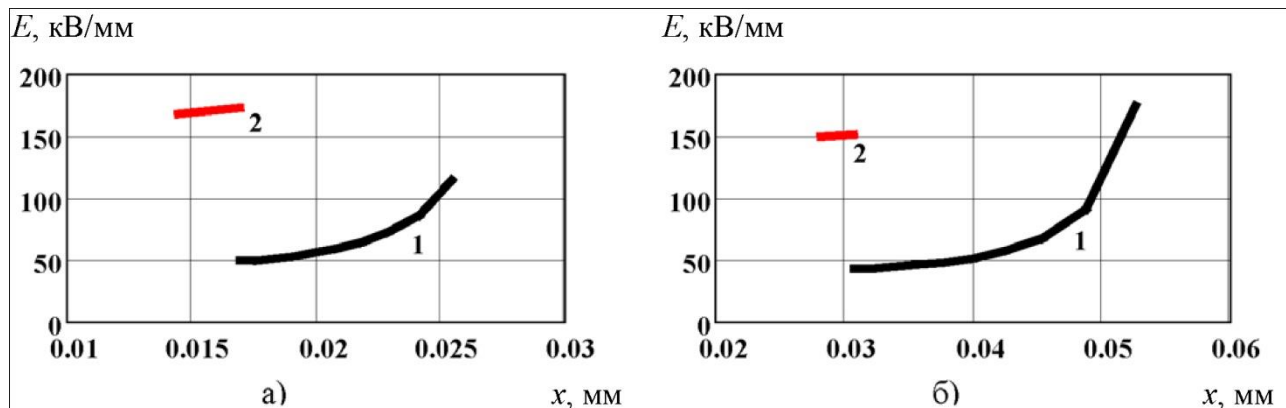


Рисунок 7 - Розподіл напруженості електричного поля вздовж осі  $x$  в площині  $Z$  для ізоляції з двох шарів з різними діелектричними проникностями при випробуваннях на пробій на скрутках після четвертого (а) і десятого (б) калібрів

впродовж проходження маршруту емалювання: 1 – напруженість в емальізоляції; 2 – напруженість в прошарку повітря.

Експериментально визначений розмір типового дефекту емальованого проводу  $\xi = (5 \pm 1)$  мкм, а половина вимірної діаметральної товщини ізоляції після четвертого калібру становить 5 мкм і саме на калібрах № 4 і № 5 спостерігається мінімум на залежності  $k(E) = E_{max}/E_{cp}$  від номера калібру (рис. 8).

Весь маршрут емалювання проводу марки ПЭЭИДХ2-200-МЭЖ 0,56 складається з двох ділянок: перші чотири калібри – ділянка «тонкої плівки», на якій емальізоляція приблизно повторює рельєф міді; від п'ятого до чотирнадцятого калібру – ділянка, для якої максимальна напруженість  $E_{max}$  біля поверхні дефекту є критерієм електричної міцності ізоляції (оскільки прошарок повітря між емальованими проводами в скрутках різко змінює розподіл електричного поля), вона поступово зростає і для готового проводу складає (150-180) кВ/мм. Перехід від першої ділянки до другої супроводжує мінімум на залежності  $k(E) = E_{max}/E_{cp}$  від номера калібру.

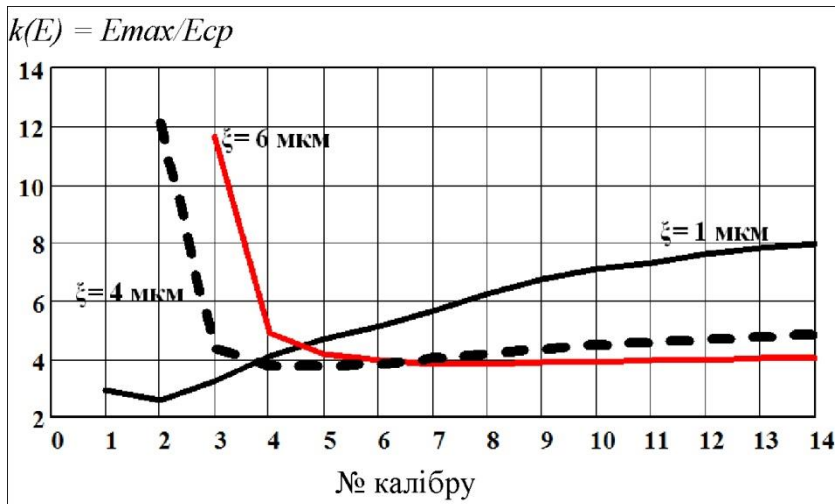


Рисунок 8 - Залежності коефіцієнта неоднорідності електричного поля  $k(E) = E_{max}/E_{cp}$  від номера калібру за різних значень розміру типового дефекту поверхні проволони.

Мінімум відображує той факт, що радіальна товщина ізоляції вдвічі перевищила розмір типового дефекту поверхні проволони, і цей мінімум запропонований як метод оцінки  $\xi$ . Положення мінімуму залежить від розміру типового дефекту, який зумовлює точкові пошкодження.

**Четвертий розділ** присвячено розробленню методу контролю дефектності поверхні проволони для зменшення дисперсії пробивної напруги емальізоляції і відповідного комплексу апаратури.

Для зменшення дисперсії пробивної напруги емальізоляції запропоновано використовувати контрольну карту дефектності поверхні мідної проволони, як один із засобів технологічного контролю. Для цього виконано аналіз технологічних причин появи двох ділянок маршруту емалювання.

На рис. 9 наведено експериментальні дані, що пояснюють технологічні причини переходу від першої до другої ділянки. На перших чотирьох калібрах  $\Delta t_{лак}$  найбільша, а  $\Delta t_{cp}$  – найменша, що протирічить загальним уявленням про технологію емалювання. Якщо до цього додати, що ПЕІ лаки ефективно полімеризуються тільки в тонких ( $\sim 2$  мкм) шарах, єдиною реальною причиною вка-

заного протиріччя є нерівності на поверхні проволочки. На перших калібрах рідкий лак заповнює впадини, а на поверхні виступів створюється плівка силами адгезії лаку до міді і силами поверхневого тяжіння. Виконано кількісну перевірку такого пояснення.

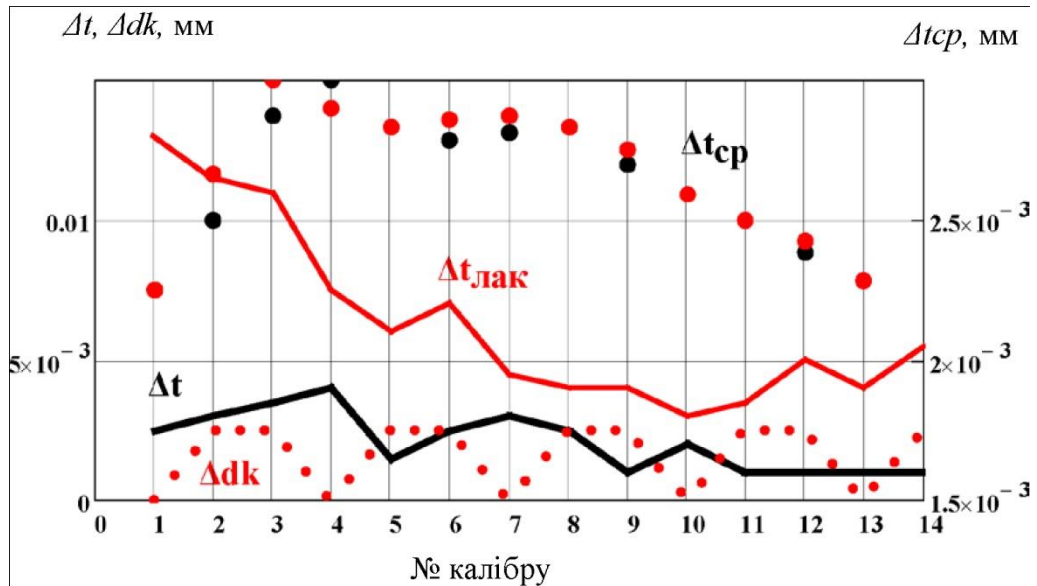


Рисунок 9 - До аналізу динаміки процесу емалювання проволочки марки ПЭЭИ-ДХ2-200-МЭК 0,56:  $\Delta t_{\text{лак}}$  – товщина рідкого лаку, мм;  $\Delta t$  – товщина полімеризованого лаку, мм;  $\Delta dk$  – збільшення діаметру калібру маршруту емалювання, мм;  $\Delta t_{\text{ср}}$  – середнє збільшення товщини ізоляції за один прохід (дві точки – вимірювання після виготовлення і через 2 доби).

Аналіз технологічних причин наявності двох ділянок технологічного маршруту емалювання дозволив запропонувати перспективну схему організації контролю технологічного процесу виготовлення емальованих проволочок (рис. 10):

1) на початку і в кінці кожного технологічного циклу відбирають для випробувань зразки емальованого проволочки після проходження кожного калібру маршруту;

2) випробування зразків виконують за існуючою схемою контролю, додатково оцінюють показник дефектності поверхні проволочки  $\zeta$ , за оцінку приймають половину товщини ізоляції  $t(i)$ , при якій залежність  $E_{\text{max}}(t(i))$  характеризується мінімумом (якщо такий є);

3) результати оцінювання дефектності  $\zeta$  наносять на контрольну карту  $P_{\text{max}}(\zeta)$ , відповідні критичні значення  $P_{\text{max}}$  є підставою для рішення про корегування технологічного процесу емалювання.

Використання запропонованої схеми і необхідного для її реалізації комплексу апаратури (рис. 10) дозволяє:

- врахувати особливості процесу емалювання лаками, які ефективно полімеризуються лише в тонких шарах;
- врахувати вплив дефектності поверхні мідної проволочки на електрофізичні характеристики емальованого проволочки.

У **додатках** наведено приклади побудови контрольної карти виходу параметру, що контролюється, за допустиму границю.

Наведено документи, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи у промислове виробництво емальованих проводів ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ» та у навчальний процес кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ «ХП».

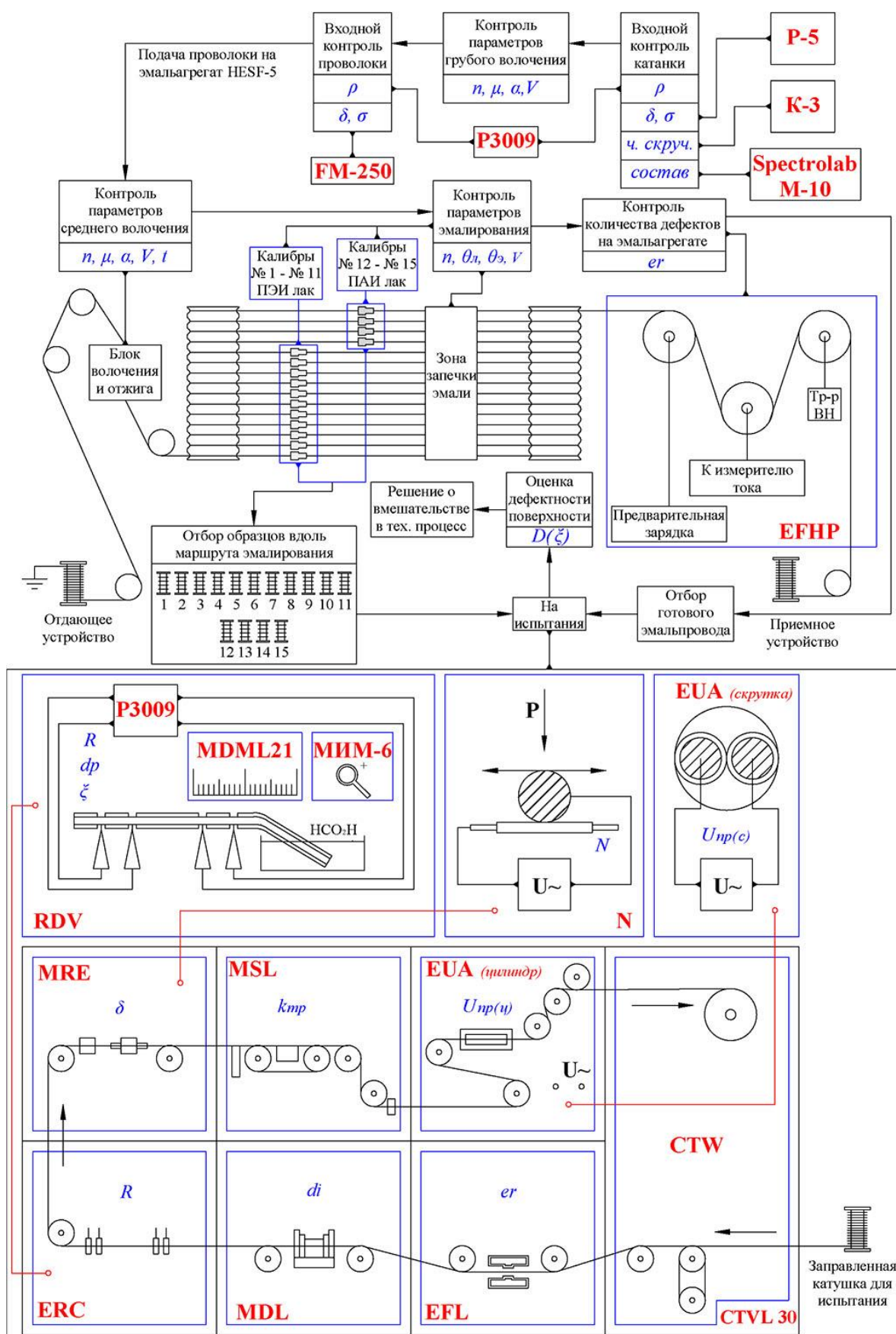


Рисунок 10 - Схема комплекса аппаратуры для організації контролю технологічного процесу виготовлення емальованого проводу ПЭЭИДХ2-200-МЭК із застосуванням розробленого методу оцінювання дефектності поверхні проволочки



## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішене науково-практичне завдання розробки перспективного методу оцінки дефектності поверхні емальованої проволочки, що зумовлює кількість точкових пошкоджень в ізоляції проволочки на одиничній довжині за неруйнівних випробувань високою напругою на прохід.

**1.** Проведено аналіз сучасних методів випробувань емальованих провідів, який обґрунтував доцільність оцінки впливу дефектності поверхні мідної проволочки на електромеханічні параметри. Виконане мікроскопічне дослідження розмірів дефектів поверхні мідної проволочки на металографічному мікроскопі МИМ-6, яке дозволило вибрати у якості моделі нерівності напівциліндричну випуклість радіусом  $(5\pm 2)$  мкм, що розташована паралельно до осі проволочки.

**2.** Виконано експериментальні дослідження формування електрофізичних параметрів ізоляції емальованого проволочки в процесі проходження калібрів маршруту. Розроблена електрофізична модель ізоляції у процесі емальювання у вигляді послідовності електричних схем заміщення емальізоляції на всіх етапах технологічного процесу. Це дало змогу зменшити похибку при визначенні кількості точкових пошкоджень в ізоляції на одиничній довжині проволочки за рахунок забезпечення часу попередньої зарядки.

**3.** Встановлено два етапи технологічного процесу емальювання, на яких формування електрофізичних параметрів ізоляції принципово різне. Це дало змогу використовувати товщину висушеної емалі в якості кількісної характеристики розміру критичного дефекту поверхні провідника, що зумовлює кількість точкових пошкоджень в ізоляції на одиничній довжині проволочки за неруйнівних випробувань на прохід.

**4.** Розроблено метод оцінки розміру  $\xi$  типового дефекту поверхні емальованого провідника, який є показником дефектності мідної проволочки для використання в технологічному контролі емалі ізоляції. Проведено апробацію розробленого методу технологічного контролю емальпроволочки на реальному виробництві, що зумовлює кількість точкових пошкоджень в ізоляції на одиничній довжині проволочки за неруйнівних випробувань на прохід. Розроблено комплекс апаратури, що включає у себе, як сертифіковані прилади та устаткування, так і запатентований пристрій для очищення емальованого проволочки від ізоляції з подальшим вимірюванням електричного опору проволочки та оцінюванням дефектності її поверхні.

**5.** Запропоновано запатентований метод видалення емальізоляції, що знижує похибку при оцінці опору провідника до декількох десятків часток відсотка. Результати дисертаційної роботи впроваджені у промислове виробництво емальованих провідів ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ» та у навчальний процес кафедри електроізоляційної і кабельної техніки НТУ «ХП».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Антонець С.Ю. Статистичне дослідження впливу параметрів провідника на напругу пробую ізоляції емальпроводу / Л.А. Щепенюк, С.Ю. Антонець // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків НТУ «ХПІ», 2010. – № 1. – С. 158-163.

*Здобувачем виконано аналіз результатів контролю параметрів мідного провідника на напругу пробую емальованого проводу.*

2. Антонець С.Ю. Математическая модель для расчета наведенных напряжений на экранах кабелей / Т.Ю. Антонец, С.Ю. Антонец, В.М. Золотарев, А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків НТУ «ХПІ», 2010. – № 18. – С. 3-8.

*Здобувачем розроблена математична модель для визначення наведених напруг на екранах однофазних силових кабелів з урахуванням моделі розсіяння.*

3. Антонець С.Ю. Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емаль проводів / Л.А. Щепенюк, С.Ю. Антонець, О.В. Голик // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 23.– С. 166-169.

*Здобувачем виконано аналіз результатів контролю дисперсії напруги пробую емальованого проводу.*

4. Антонець С.Ю. Дослідження факторів впливу на дисперсію пробивної напруги емальдроту з подвійною ізоляцією на основі поліамідних співполімерів / А.Г. Гурин, С.Ю. Антонець, О.В. Голик // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 28.– С. 86- 90.

*Здобувачем виконано аналіз результатів контролю дисперсії напруги пробую емальованого проводу.*

5. Антонець С.Ю. Экспериментальное исследование электрической прочности провода ПЭЭИДХ – 0,63 / А.Г. Гурин, С.Ю. Антонець // Електротехніка і електромеханіка. – Харків НТУ «ХПІ», 2013. – № 4. – С. 44-46.

*Здобувачем виконано аналіз результатів контролю напруги пробую емальованого проводу.*

6. Антонець С.Ю. Дослідження впливу пластичності мідного провідника на напругу пробую ізоляції емаль проводу / А.Г. Гурин, Л.А. Щепенюк, О.В. Голик, С.Ю. Антонець // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 17.– С. 51-57.

*Здобувачем виконано аналіз результатів контролю відносного видовження при розриві та пробивної напруги емальованого проводу.*

7. Антонець С.Ю. Исследование влияния дефектов поверхности медной проволоки на контролируруемую дефектность изоляции эмальпровода / Л.А. Щепенюк, С.Ю. Антонець // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – № 59.– С. 188-193.

*Здобувачем виконано аналіз результатів контролю процесу виготовлення емальованого проводу за високих швидкостей роботи сучасного обладнання, на якому передбачено комп'ютерний моніторинг кількості ушкоджень ізоляційного шару емалі.*

8. Антонець С.Ю. Измерение уровня частичных разрядов новых типов силовых кабелей / В.М. Золотарёв, С.Ю. Антонец, В.В. Золотарёв, С.В. Бузько,

А.А. Науменко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 21.– С. 36-42.

*Здобувачем наведені результати досліджень щодо розробки вимірювань рівня часткових розрядів силових каблів з ізоляцією із сшитого поліетилену з використанням моделі розсіяння.*

**9.** Антонец С.Ю. К расчету электрического поля в изоляции эмальпровода с изоляцией на основе полиимидных сополимеров / С.Ю. Антонец, Л.А. Щебенюк // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 24.– С. 3-10.

*Здобувачем виконано моделювання електричного поля в емальізоляції, оцінено розмір області концентрації напруги навколо дефекту поверхні провідника.*

**10.** Антонец С.Ю. Композиционные материалы на основе поливинилхлорида. Влияние состава на комплекс свойств изоляции кабельной продукции / В.Л. Чулеев, В.М. Золотарев, В.А. Пахаренко, Е.В. Чулеева, С.Ю. Антонец // Хімічна промисловість України. – Київ: союз хіміків України, 2014. – № 3 (122). – С. 48-53.

*Здобувачем представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень з використанням моделі розсіяння щодо розробки широкої номенклатури композиційних матеріалів на основі полівінілхлориду для ізоляції кабельної продукції.*

**11.** Antonec Stanislav. Zkoumání vlivu typické povrchové vady měděného drátu, za vzniku polyesterové izolační vlastnosti v procesu smaltování // Modern Science – Moderní věda. – Praha. – České Republika, Nemoros. – 2014. – № 4. – С. 177-183.

*Здобувачем виконано експериментальне дослідження формування характеристик поліефірмідної ізоляції впродовж неперервного технологічного циклу виготовлення емальованого проводу.*

**12.** Пат. 94324 Україна, МПК В08В 1/00, С23D 17/00, С08G 73/10, С08G 73/12. Спосіб видалення поліімідної емальізоляції з проводів малих діаметрів / Гурин А.Г., Голик О.В., Щебенюк Л.А., Антонец С.Ю.; заявник та патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» - № у 2014 05492 заявл. 22.05.14; опубл. 10.11.14, Бюл. № 21.

**13.** Пат. 94444 Україна, МПК С23G 3/00. Пристрій для очищення та вимірювання опору емальованого дроту / Антонец С.Ю., Золотарьов В.М., Гурин А.Г., Голик О.В.; заявник та патентовласник ПАТ «ЗАВОД «ПІВДЕНКАБЕЛЬ» - № у 2014 06428 заявл. 10.06.14; опубл. 10.11.14, Бюл. № 21.

**14.** Антонец С.Ю. Определение наведенных напряжений в кабельных линиях 6...330 кВ из трех однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / В.М. Золотарев, С.Ю. Антонец, Т.Ю. Антонец, А.А. Науменко // Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», Ч.IV, (Харків, 12–14 травня 2010 р.) – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – С. 82.

*Здобувачем розроблена методика аналітичного визначення напруг на мідних екранах кабельних ліній з потужних одножильних кабелів на напругу 6...330 кВ з використанням моделі розсіяння.*

**15.** Антоненць С.Ю. Контроль однорідності ізоляції методами інтервальної статистики / О.В. Голик, Н.В. Артюх, С.Ю. Антоненць // Тези доповідей ХХ міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», Ч. II, (Харків, 15–17 травня 2012 р.) – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 207.

*Здобувачем виконано аналіз контролю однорідності ізоляції на основі поліімідних співполімерів емальованого проводу методами інтервальної статистики. Наведено приклади побудови контрольної карти виходу параметру, що контролюється, за допустиму границю.*

**16.** Антоненць С.Ю. Методи визначення залежності напруги пробою від товщини ізоляції емальдроту на основі поліамідних співполімерів / О.В. Голик, С.Ю. Антоненць, О.І. Сироватська // Тези доповідей ХХІ міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», Ч.ІІ, (Харків, 29–31 травня 2013 р.) – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – С. 188.

*Здобувачем виконано аналіз результатів контролю дисперсії напруги пробою емальованого проводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів.*

**17.** Антоненць С.Ю. Расчет электрического поля в изоляции эмальпровода / С.Ю. Антоненць, Л.А. Щебенюк // Тези доповідей ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», Ч.ІІ, (Харків, 15–17 жовтня 2014 р.) – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – С. 196.

*Здобувачем виконано моделювання електричного поля в емальізоляції. Оцінено вплив розмірів неоднорідностей на напруженість електричного поля в емальізоляції.*

## АНОТАЦІЇ

**Антоненць С.Ю. Метод і пристрій технологічного контролю електромеханічних параметрів емальованого проводу в процесі виробництва.** На правах рукопису.

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, 2015 р.

Дисертаційна робота присвячена розробці нового, більш довершеного методу технологічного контролю параметрів поліімідної ізоляції емальованого проводу у процесі виробництва.

Запропоновано метод оцінки показника дефектності поверхні проволони за допомогою вимірювання товщини шару емалі за різкої зміни ходу залежності

розрахункової максимальної напруженості електричного поля від кількості калібрів, через які пройшла проволочка.

Розроблена модель критичного дефекту поверхні проволочки, що визначає динаміку змінення кількості дефектів емальованого проводу при випробуваннях високою напругою на прохід при проходженні вздовж всього маршруту емалювання.

За рахунок визначення часу релаксації міграційної поляризації та оптимізації попередньої поляризації ізоляції значно зменшилась похибка при визначенні кількості дефектів емальізоляції за неруйнівних випробувань високою напругою на прохід.

Серед розробленого комплексу апаратури представлено новий запатентований пристрій для очищення та вимірювання опору емальованого проводу та новий запатентований спосіб видалення поліімідної емальізоляції проводів малих діаметрів.

*Ключові слова:* система контролю, неруйнівний контроль, емальований провід, напруженість електричного поля, типовий дефект, час релаксації, міграційна поляризація.

**Антонец С.Ю. Метод и устройство технологического контроля электромеханических параметров эмалированного провода в процессе производства.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2015 г.

Диссертационная работа посвящена разработке нового, более совершенного метода оперативного контроля параметров полиимидной изоляции эмалированного провода в процессе производства.

Выполнено микроскопическое исследование размеров дефектов поверхности медной проволоки на металлографическом микроскопе МИМ-6.

Установлено два этапа технологического процесса эмалирования, на которых формирование электрофизических параметров изоляции провода принципиально разное. Это дало возможность использовать толщину высушенной эмали в качестве количественной характеристики размера критического дефекта поверхности проволоки, который обуславливает количество точечных повреждений в изоляции на единичной длине провода при неразрушающих испытаниях на проход.

Предложен метод оценки показателя дефектности поверхности проволоки при помощи измерения толщины слоя эмали при резком изменении хода зависимости расчетной максимальной напряженности электрического поля от количества калибров, через которые прошла проволочка.

Разработана модель критического дефекта поверхности проволоки, которая определяет динамику изменения количества дефектов эмалированного провода

при испытании высоким напряжением на проход при прохождении вдоль всего маршрута эмалирования.

За счет определения времени релаксации миграционной поляризации и оптимизации предварительной поляризации изоляции существенно уменьшилась погрешность при определении количества дефектов эмальизоляции при неразрушающих испытаниях высоким напряжением на проход.

Среди разработанного комплекса аппаратуры представлено новое запатентованное устройство для очищения и измерения сопротивления эмалированного провода и новый запатентованный способ удаления полиимидной эмальизоляции проводов малых диаметров.

*Ключевые слова:* система контроля, неразрушающий контроль, эмалированный провод, напряженность электрического поля, типичный дефект, время релаксации, миграционная поляризация.

**Antonets S.Y. Operational control method and device of electromechanically parameters of enameled wire in the manufacturing process.** Manuscript.

Dissertation for the degree of Ph. D. in Engineering Science, specialty 05.11.13 – equipments and methods to control and determine the composition of substances. – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2015.

The thesis is devoted to the developing of new, improved operational control method of polyimide insulation parameters of enameled wire in the manufacturing process.

It was proposed a method for estimating the defectiveness of the wire surface by measuring the thickness of the enamel layer at sharp change of the dependence of the calculated maximum electric-field strength on the number of dies, through which the wire was passed.

A model of the critical wire surface defect was worked out, that determines the dynamics of change in the number of defects of an enameled during high voltage test on a pass along the entire way of enameling.

By determining the relaxation time of the migration polarization and optimization preliminary polarization of the isolation, the error, in the determination of the number of defects of the enamel insulation during nondestructive high voltage tests on the pass, has significantly reduced.

The developed complex of equipment includes a new patented device for cleaning and measuring the resistance of enameled wire and a new patented method of removing the polyimide enamel insulation of wires with small diameters.

*Keywords:* monitoring system, nondestructive test, enameled wire, electric field intensity, typical defect, relaxation time, migration polarization.



Підписано до друку 3.04.15 р. Формат 60×84/16  
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman  
Друк офсетний. Ум. друк. Арк. 0,691. Обл. вид. арк. 0,938  
Тираж 100 прим. Замовлення № 13

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)  
М. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1  
Тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)