

Л.А. ЩЕБЕНЮК, канд.техн.наук., проф., НТУ «ХПІ»  
С.Ю. АНТОНЕЦЬ, ЗАТ «Завод Південкабель»

### СТАТИСТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОВІДНИКА НА НАПРУГУ ПРОБОЮ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬПРОВОДУ

Выполнен анализ результатов контроля параметров медного проводника на напряжение пробоя эмальпровода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров.

The analysis of datas of monitoring of the technological standard parameters of in enameled wire insulated articles.

**Постановка проблеми.** Впровадження нових електротехнічних матеріалів є одним з найефективніших методів підвищення надійності електротехнічного обладнання, втім числі і електричних машин, надійність яких визначається, в першу чергу, надійністю виткової ізоляції. Саме для підвищення надійності цієї ізоляції на заводі "Південкабель" впроваджено виробництво емальдроту з двошаровою ізоляцією на основі поліімідних співполімерів з температурним індексом 200 °С. В процесі впровадження нової продукції виникла необхідність вдосконалення системи контролю її якості з врахуванням як особливостей технологічного процесу так і специфіки властивостей двошарової поліімідної ізоляції. Експериментальне визначення пробивної напруги є одним з традиційних методів випробувань емальдроту, при яких значення параметру, що визначається, співставляють з встановленою нормативною межею (найменше з п'яти значень для даної котушки не менше заданого мінімального:  $\inf(U_{np}) \geq U_{min}$ ). Випробування для визначення  $U_{np}$  є руйнівними, а отже вибірковими, їх результати не дають інформації про статистичну достовірність виконання вказаної нерівності. Для забезпечення сучасних вимог до електричної міцності емальдроту високої нагрівостійкості, до яких відноситься, в першу чергу, емальдрот з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів, необхідне дослідження статистичних характеристик розсіяння значень  $U_{np}$  (далі  $U$ ) впродовж неперервного технологічного циклу, який на сучасних швидкісних емальагрегатах включає виготовлення багатьох десятків котушок.

**Аналіз літератури.** Сучасну статистичну шкалу рівня однорідності для різних виробників масової продукції пропонує так звана концепція "Шість сігм" ("6σ") [1,2], в якій критерієм досягнутого рівня якості продукції є її однорідність. В концепції "6σ" використовують класичний математичний апарат оцінювання середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  параметра, що контролюється і нормальний розподіл цього параметра[3].

Випробування на визначення напруги пробою (breakdown voltage) емальдроту з подвійною ізоляцією на основі поліамідних співполімерів в європейській лабораторії [4] свідчить про те, що однією з основних причин нестабільності  $U$  є стан мідного провідника перед емальюванням. Зокрема овальність провідника та дефекти його поверхні. В [5,6] показано експериментально, що впродовж неперервного технологічного циклу середньоквадратичне відхилення  $\sigma[U]$  може змінюватися в рази, зумовлюючи вихід за допустиму межу за відомим правилом «трьох сігм».

**Ціль роботи.** Експериментальне дослідження впродовж неперервного технологічного циклу впливу параметрів мідного провідника на статистичні характеристики напруги пробою ізоляції емальдроту ПЭЭИДХ в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до 0,63 мм.

**Одержані результати.** Вплив мідного провідника на  $U$  ілюструє рис.1. Значення напруги пробою  $U$  для котушок емальдроту впродовж неперервного технологічного циклу характеризуються суттєвим розсіянням. У відносних одиницях це ілюструє рисунок 2, для якого вибраний технологічний цикл, що в ньому близько 5% котушок мали значення  $\inf(U) < U_{min}$ , де  $U_{min}$  - прийнята технологічна границя. Дані рис.1 свідчать про те, що в той час як діаметральна товщина емалі  $t$  має очевидний періодичний характер, на напругу пробою суттєво впливають інші фактори.

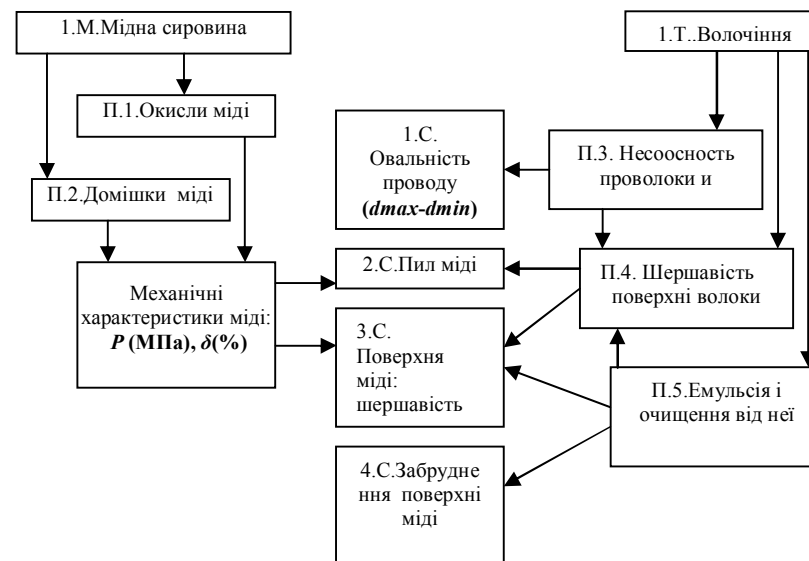


Рис. 1- Фактори впливу мідного провідника на  $U$  емальдроту

Експериментальні дослідження електричної міцності двошарової поліімідної ізоляції емальдроту в діапазоні номінальних діаметрів від 0.1 мм до 0.63 мм свідчать, що середня напруга пробою емальізоляції  $U$  характеризується суттєвою кореляцією з відносним видовженням дроту при розриві  $\square$ . Це ілюструє рисунок 3,

Для діаметрів у нижній частині дослідженого діапазону значне зменшення пластичності (на 40 % і більше) завжди супроводжувалось суттєвим зменшенням товщини ізоляції (більш ніж 13 %) і помітною дестабілізацією процесу емальювання (див. табл.1).

Аналіз кореляційних зв'язків напруги пробою емальізоляції  $U$ , відносного видовження дроту при розриві  $\square$  і діаметральної товщини ізоляції  $t$  характеризує таблиця 2. Ці дані свідчать, що **в умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним нормативам**, основними чинниками впливу на величину напруги пробою емальізоляції є:

- відносьне видовження при розриві  $\square$  (позитивна кореляція:  $Kor[M[\delta],M[U]]= 0,806$ ;
- середньоквадратичне відхилення діаметра мідного провідника  $dp$  (від'ємна кореляція:  $Kor[\sigma[dp],M[U]] = - 0,762$ .

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

Висновки цього аналізу наступні: за умови відповідності всіх характеристик дроту технічним вимогам, на механічну міцність емалі  $N$  (мінімальну і середню) найбільший.

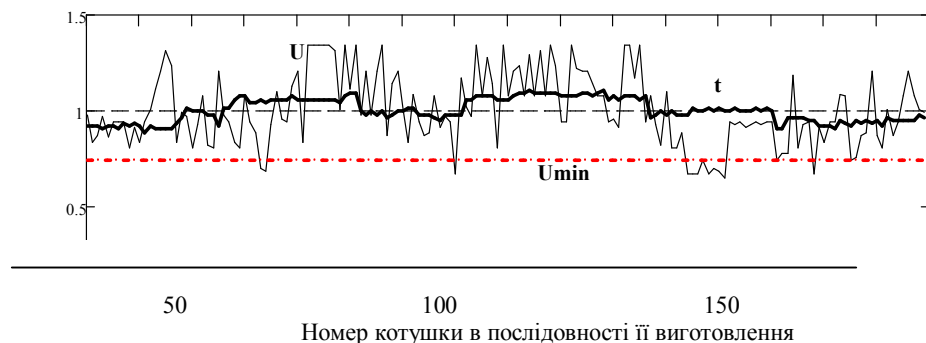


Рис. 2 – Результати вимірювання напруги пробою  $U$  і діаметральної товщини ізоляції  $t$  для емальдроту діаметром 0,560 мм

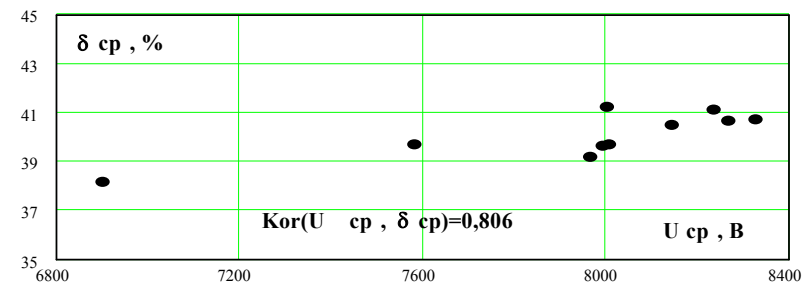


Рис. 3- Кореляція напруги пробою  $U$  і відносного видовження при розриві  $\delta$  для емальдроту діаметром 0,560 мм

Таблиця 1 - Товщини емальізоляції котушок із зменшеною пластичністю міді для діаметру 0,10 мм

№ котушки	Відносьне видовження при розриві $\delta$ , %	Діаметральна товщина ізоляції, $t$ , мкм	№№ котушок із зменшеною на $\approx 13$ % товщиною ізоляції, $t$ , мкм
Середнє для всіх	27,017	23,0	-
0	16 (- 40 %)	22	№№: 1 – 10: $t = 20$ мкм
79	16 (- 40 %)	21	№№: 80 – 90: $t = 20$ мкм
222	15 (- 44 %)	18	№№: 223 – 235: $t = 20$ мкм

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 і, як наслідок, збільшення середньоквадратичного відхилення механічної міцності емалі  $\sigma[Nm]$ ; чим більше відносьне видовження дроту при розриві  $\delta$ , тим вища механічна міцність, але одночасно більше її розсіяння.

Дослідження поверхні мідного провідника емальдроту свідчить про наявність нерівностей двох типів: повздовжніх бороздок (поперечний розмір від 10 мкм до 40 мкм) і мікрораковин. Кількість мікрораковин на одиницю поверхні провідника, їх розмір і глибина збільшуються із зменшенням пластичності міді. При цьому змінюється і форма мікрораковин.

Таблиця 2 - Коефіцієнти кореляції  $\text{Cor}[X, Y]$  між середніми  $M[X]$ ,  $M[Y]$  і середньоквадратичними  $\sigma[X]$ ,  $\sigma[Y]$  значеннями характеристик емальдроту діаметром 0,630 мм

Характеристика $X$		Характеристика $Y$	
		Коефіцієнти кореляції $\text{Cor}[X, Y]$	
		$M[U]$ , $U$ - напруга пробою, В	$\sigma[U]$ , $U$ - напруга пробою, В
Діаметр проволочки, $dp$ , мм	$M$ [ $dp$ ]	<b>-0,438</b>	<b>-0,533</b>
	$\sigma$ [ $dp$ ]	<b>-0,762</b>	<b>-0,423</b>
Діаметр ізолюваного проводу, $di$ , мм	$M$ [ $di$ ]	-0,128	-0,314
	$\sigma$ [ $di$ ]	-0,002	-0,114
Товщина ізоляції, мкм $t = (di - dp) \cdot 10^3$	$M$ [ $t$ ]	0,226	0,107
	$\sigma$ [ $t$ ]	-0,233	-0,211
Відносне видовження при розриві $\delta$ %	$M$ [ $\delta$ ]	<b>0,806</b>	<b>0,563</b>
	$\sigma$ [ $\delta$ ]	0,318	0,151

Поява мікрораковин на поверхні металу при волочінні є характерним явищем. Порівняння їх кількості, розмірів і форми для мідного, алюмінієвого і сталевго дроту свідчить про те, що саме пластичність металу є визначальним фактором утворення таких дефектів поверхні провідника.

Ці дефекти утворюються за рахунок деформацій зсуву у поверхневому шарі металу, який є найбільш нагартованим, а отже найменш пластичним. Результати контрольного випробування на відносне видовження дроту при розриві лише частково відображають зростання твердості металу на поверхні дроту. Саме тому зв'язок напруги пробою емальзіоляції  $U$  з відносним видовженням дроту при розриві  $\delta$  наведений на рисунку 2, опосередковано свідчить про значний вплив пластичності металу на напругу пробою.

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

У двошаровій ізоляції емальдроту, яка складається з шарів з різними діелектричними властивостями, окрім типових видів поляризації при

випробуваннях постійною високою напругою на прохід, виникає міграційна поляризація, яка супроводжується накопиченням об'ємних зарядів в ізоляції, що суттєво впливає на розподіл електричного поля в ізоляції. Розподіл поля встановлюється відповідно діелектричних проникностей шарів ізоляції:  $\epsilon_1 E_1(0) = \epsilon_2 E_2(0)$ . З часом виникає накопичування зарядів на межі розділу шарів та встановлюється стаціонарний стан. Тривалість цих переходних процесів визначає час релаксації  $\tau$ . Для ізоляції емальдроту ПЭЭИДХ в діапазоні номінальних діаметрів від 0.10 мм до 0.63 мм, де питомі провідності шарів мають різні значення час релаксації досягає кількох секунд.

Тому, кількість слабких місць, які фіксуються при випробуваннях високою напругою на прохід (при швидкостях емальювання більше 100 м/хв.) відображає не тільки наявність механічних неоднорідностей в ізоляції, але й прямо пов'язана з електричними властивостями двошарової емальзіоляції. Відповідно, для компенсації струму поляризації необхідне застосування зарядного електрода достатньої довжини [7]. Тому виокремлення впливу характеристик мідного провідника є специфічно актуальною задачею організації технологічного контролю саме цього виду кабельної продукції.

**Висновки.** 1. Показано, що пластичність міді є важливою складовою забезпечення стабільності технологічного процесу емальювання і що її пластичність суттєво впливає на величину і стабільність напруги пробою дроту ( $\text{Cor}(U, \delta) = -0,734$  на рис.2 для 30 котушок по 2000 м проводу в кожній).

2. Результати і технологічні параметри традиційних неруйнівних випробувань емальзіоляції високою напругою на прохід для двошарової поліімідної ізоляції емальдроту ПЭЭИДХ прямо пов'язані з електричними властивостями цієї емаль ізоляції. Тому виокремлення впливу характеристик мідного провідника є специфічно актуальною задачею організації поточного технологічного контролю саме цього виду кабельної продукції.

**Список літератури:** 1. Harrold D. Designing for Six Sigma Capability / D.Harrold // Control Engineering/ - 1999. -P.62-70. 2. Адлер Ю.П., ШнепВ.Л. «Шесть сигм»: еще одна дорога, ведущая к храму. Методы менеджмента качества. Октябрь 2000.-С. 15 – 23. 3. Walton M. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming / M.Walton/ - NY 10016, Copyright 1986/ - P.262. 4. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. –classified - 2007. – p.18. 5. Гурин А.Г. Исследование электрической и механической прочности изоляции эмальпроводов / А.Г. Гурин, Ю.А. Антонец, Л.А. Шебенюк, О.В. Голик // Вісник НТУ «ХП». –2004. – № 7. – С.111– 115. 6. Антонец Ю.А. Контроль технологического процесса изготовления эмальпровода / Ю.А. Антонец, Л.А. Шебенюк, О.В. Голик // Вісник НТУ «ХП». - 2005. – Вип.42.– С. 43 – 46. 7. Гурин А.Г., Голик О.В. Спосіб визначення дефектності двошарової ізоляції емальдроту. Декларційний патент на корисну модель. G01N 27/00.

Надійшла до редколегії 03.09. 2010