

**А.Г. ГУРИН**, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХП»;  
**Л.А. ЩЕБЕНЮК**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХП»;  
**О.В. ГОЛИК**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХП»;  
**С.Ю. АНТОНЕЦЬ**, технолог, ЗАТ «Завод Південкабель», Харків

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЛАСТИЧНОСТІ МІДНОГО ПРОВІДНИКА НА НАПРУГУ ПРОБОЮ ІЗОЛЯЦІЇ ЕМАЛЬПРОВОДУ

Виконано аналіз результатів контролю відносного видовження при розриві та пробивної напруги емаль дроту з подвійною ізоляцією на основі подвійних сополімерів.

**Ключові слова:** відносне видовження при розриві, пробивна напруга, емаль дрiт, подвійна ізоляція.

**Вступ.** Емальдрiт з подвійною ізоляцією на основі поліімідних співполімерів є найбільш сучасним інноваційним продуктом вітчизняного виробництва емальдроту. Забезпечення електричної міцності емальдроту вимагає мінімізації розсіяння значень пробивної напруги  $U_{пр}$  (далі для компактності  $U$ ). Для виробника особливо актуальним є дослідження змінення розсіяння значень  $U$  впродовж неперервного технологічного циклу, який на сучасних швидкісних емальагрегатах включає виготовлення багатьох десятків котушок емальдроту.

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** Випробування на визначення напруги пробою (breakdown voltage) емальдроту з подвійною ізоляцією на основі поліамідних співполімерів в європейській лабораторії [1] свідчить про те, що однією з основних причин нестабільності  $U$  є стан мідного провідника перед емальюванням. Експериментальне дослідження впродовж неперервного технологічного циклу впливу параметрів мідного провідника на статистичні характеристики напруги пробою ізоляції дроту ПЭЭИДХ з двохшаровою ізоляцією на основі поліімідних співполімерів в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до 0,63 мм засвідчило [2], що пластичність міді є важливою складовою забезпечення стабільності технологічного процесу емальювання і що пластичність провідника суттєво впливає на величину і стабільність напруги пробою емаль ізоляції.

В [2], на базі математичного апарату інтервальних статистичних моделей (ICM) [3] розроблено статистичний апарат для автоматичного контролю максимальної ймовірності ( $P_{max}$ ) того, що кількість бездефектних контрольних довжин (100 м) на котушці емальдроту вище

© А.Г. Гурин, Л.А.Щебенюк, О.В.Голик, С.Ю.Антонец, 2013

за визначену технологічну нормативну межу, перевірено можливість його застосування в умовах виробництва.

**Ціль досліджень, постановка проблеми.** 1) Дослідження впливу пластичності мідного провідника на напругу пробою ізоляції дроту ПЭЭИДХ для найбільш поширеного номінального діаметру 0.63 мм. 2) Перевірка можливості застосування статистичного апарату ICM для автоматичного контролю максимальної ймовірності ( $P_{max}$ ) виходу параметрів напруги пробою  $U$  і відносного видовження при розриві  $\delta$  за допустимі нормативні границі.

**Матеріали досліджень.** Визначено напругу пробою  $U$  і відносне видовження при розриві  $\delta$  для 60 котушок дроту ПЭЭИДХ з номінальним діаметром 0.63 мм, виготовлених впродовж неперервного технологічного циклу.

Кореляційні зв'язки напруги пробою  $U$  і відносного видовження при розриві  $\delta$  характеризує таблиця.

Таблиця - Коефіцієнти кореляції  $Kor[X, Y]$  між характеристиками напруги пробою  $U$  і відносного видовження при розриві  $\delta$  для емальдроту діаметром 0.63 мм.

Характеристика $X$	Характеристика $Y$		
	Коефіцієнти кореляції $Kor[X, Y]$		
$U$ - напруга пробою, В	$U_{min}$ , В мінімальна напруга пробою, (для п'яти поточних котушок)	Максимальна ймовірність того, що $U_{min} < 4500$ В, $P_{max}(U)$	
Відносне видовження при розриві $\delta$ , %	- 0,154	$Kor[U_{min}, P_{max}(U)] = 0,451$	
Мінімальне відносне видовження при розриві $\delta_{min}$ , % (для 5 поточних котушок)	$Kor[\delta_{min}, P_{max}(\delta)] = 0,947$	0,947	
			0,780
Максимальна ймовірність того, що $\delta_{min} < 26$ %, $P_{max}(\delta)$			

Ці дані свідчать, що в умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним нормативам, безпосередня кореляція значень  $U$  і  $\delta$  відсутня:  $Kor[\delta, U] = -0,154$ . Одночасно спостерігається майже стопроцентна кореляція між

мінімальною напругою пробою для п'яти поточних котушок  $U_{\min}$  і мінімальним відносним видовженням при розриві  $\delta_{\min}$  для тих самих п'яти поточних котушок:  $\text{Kor}[\delta_{\min}, U_{\min}] = 0,947$ .

Одержані результати свідчать про те, що в умовах налагодженого технологічного процесу, одним з чинників впливу на величину мінімальної напруги пробою є пластичність мідного провідника і подальше дослідження цього впливу є важливим для забезпечення стабільності технологічного процесу емальювання і напруги пробою емальізоляції.

Оскільки в умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним нормативам, безпосереднє визначення кількості дефектних об'єктів неможливе, нами використано метод інтервальних статистичних моделей (ИСМ), який в кабельній техніці пройшов успішну апробацію саме у виробництві емальдроту. Цей метод дозволяє оцінити ймовірність виходу параметра за нормативну границю у вигляді контрольні карти максимальної ймовірності  $P_{\max}$ .

Контроль виготовлення емальпроводів здійснюють за допомогою вимірювань цілого ряду параметрів, серед яких є такі, що обмежені зверху (не більше  $\alpha_{\max}$ ), і такі, що обмежені знизу (не менше  $\alpha_{\min}$ ), в даному разі нами використано алгоритм розрахунку максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну межу:  $P_{\max}\{Y < \alpha_{\min}\}$ , придатний для конкретних методик вимірювань параметрів, а саме: пробивної напруги ізоляції емальпроводу  $U$ , визначеної для всіх котушок, мінімальної пробивної напруги  $U_{\min}$ , визначеної для п'яти поточних котушок, і обмеженої знизу (не менше  $\alpha_{\min}$ ):  $U_{\min} > 4500$  В, максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну межу, позначеної  $P_{\max}(U)$  (рис.1); відносного видовження при розриві  $\delta$ , для всіх котушок, мінімального видовження при розриві  $\delta_{\min}$ , визначеного для 5 поточних котушок, і обмеженого знизу (не менше  $\alpha_{\min}$ ):  $\delta_{\min} > 26$  %, максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну межу, позначеної  $P_{\max}(\delta)$  (рис.2).

Контроль виготовлення емальпроводів здійснюється за допомогою вимірювань цілого ряду параметрів. Їх кількість сягає десяти. Тому важливим є об'єднання інформації щодо стабільності технологічного процесу за різними параметрами. Така процедура відсутня і відповідні рішення в практиці приймають інтуїтивно.

Щодо об'єднання інформації про стабільність технологічного процесу, визначену за різними параметрами, то застосування для оцінки ймовірності виходу, наприклад, двох параметрів за нормативну межу, застосування класичної процедури помноження ймовірностей подій, що

перетинаються, в даному разі є неприпустимим: ні за технічним смислом контролю, оскільки, чим більше параметрів контролюють, тим за цією процедурою є менш надійною продукція; ні за виконанням вимоги незалежності параметрів, оскільки дані таблиці 1 свідчать про те, що пробивна напруга ізоляції емальдроту  $U$  і відносне видовження при розриві  $\delta$  не є незалежними параметрами.

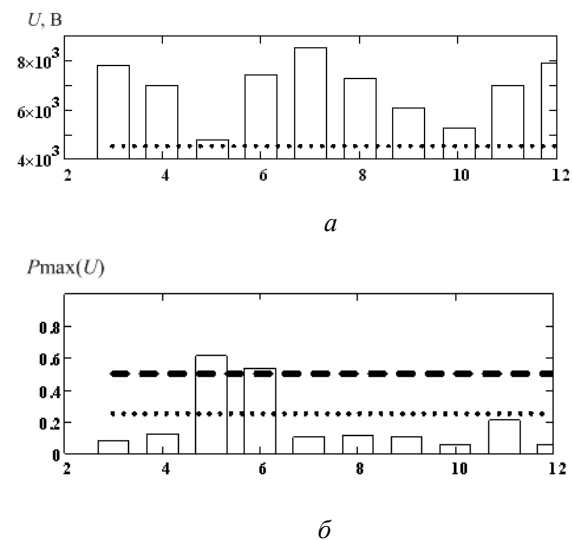


Рис.1 – Результати контролю пробивної напруги ізоляції емальпроводу  $U$ :  $a$  - мінімальна пробивна напруга  $U_{\min}$ , визначена для п'яти поточних котушок і обмежена знизу:  $U_{\min} > 4500$  В (пунктир);  $б$  - контрольна карта максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну границю  $P_{\max}(U)$ : рівень  $P_{\max}(U) = 0,25$  (пунктир) – це границя статистично підконтрольного рівня стабільності технологічного процесу; рівень  $P_{\max}(U) = 0,5$  (штрихова лінія) – це границя достатньої чутливості карти до зростання нестабільності технологічного процесу, перетин якої означає необхідність виявлення причини нестабільності

За високої кореляція між мінімальними значеннями  $U$  і  $\delta$ , якщо значення  $P_{\max}(U)$  і  $P_{\max}(\delta)$  відрізняються суттєво, то з технічних міркувань рішення слід приймати за більшою максимальною ймовірністю виходу параметра за нормативну границю

$$P_{\max}(U, \delta) = \sup \{ P_{\max}(U), P_{\max}(\delta) \}. \quad (1)$$

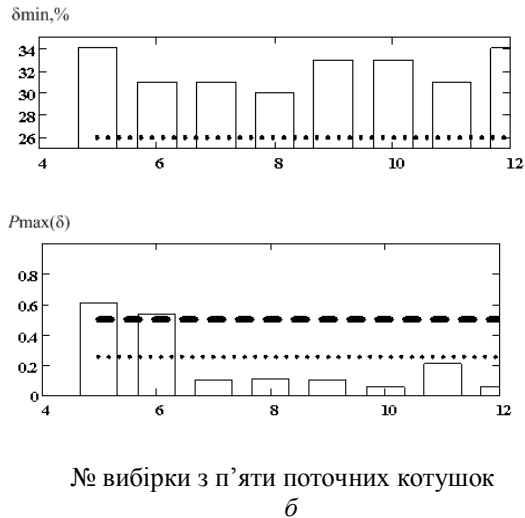


Рис.2 – Результати контролю відносного видовження при розриві  $\delta$ : *a* – мінімальне значення  $\delta_{min}$ , визначене для п'яти поточних котушок і обмежене знизу:  $\delta_{min} > 26\%$  (пунктир); *б* - контрольна карта максимальної ймовірності виходу параметра за нормативну границю  $P_{max}(\delta)$

На рис.3 наведена оцінка  $P_{max}(U, \delta)$  за (1), яка адекватно описує стабільність технологічного процесу для котушок емальдроту від №30 до №60 (№№ вибірок 7 – 12). Для перших двох вибірок (№№ вибірок 6 -7) значення  $P_{max}(U)$  і  $P_{max}(\delta)$  відрізняються мало. В такий період технологічного контролю перевагу слід віддати значенню  $P_{max}$ , яке є більш чутливим до зменшення стабільності технологічного процесу.

Взагалі  $P_{max}$  - функція двох змінних [4]

$$P_{max} = M_{max}^2 / (M_{max}^2 + \alpha^2), \quad (2)$$

де  $M_{max}$  - верхнє середнє параметра, який контролюють, в даному разі найбільше відхилення контрольного параметру від середнього значення в поточній вибірці;  $\alpha$  - гранично допустиме відхилення контрольного параметру від середнього значення в поточній вибірці.

Якщо гранично допустиме відхилення  $\alpha$  параметру від середнього значення є сталою величиною, то характеристикою чутливості функції до зменшення стабільності технологічного процесу є її похідна по  $M_{max}$ :

$$dP_{max} / dM_{max} = 2M_{max} \cdot \alpha^2 / (M_{max}^2 + \alpha^2)^2, \quad (3)$$

де  $M_{max}$  - найбільше відхилення контрольного параметру від середнього значення в поточній вибірці;  $\alpha$  - найменше відхилення контрольного

параметру від гранично допустимого мінімального значення за контрольний технологічний цикл.

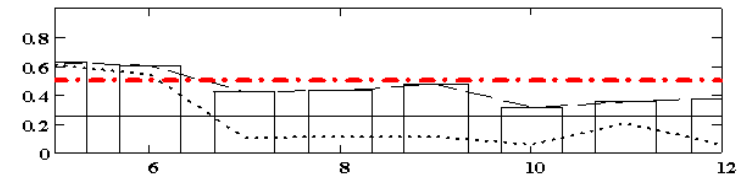


Рис.3 – Результати контролю стабільності технологічного процесу виготовлення емальдроту за допомогою вимірювання двох параметрів:  $U_{min}$ , ( $U_{min} > 4500$  В) і  $\delta_{min}$ , ( $\delta_{min} > 26\%$ )

На рис.3 наведені графіки залежностей похідної за (3) від відношення  $M_{max} / \alpha$ , для двох параметрів емальдроту, - напруги пробою емаль ізоляції і відносного видовження при розриві:  $dP_{max}(U) / dM_{max}(U) = f(M_{max}(U) / \alpha U)$  і  $dP_{max}(\delta) / dM_{max}(\delta) = f(M_{max}(\delta) / \alpha \delta)$ .

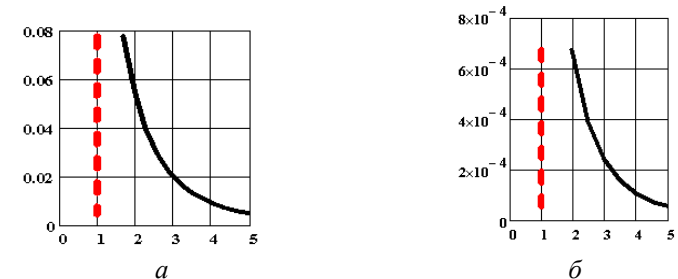


Рис. 4 – Залежності  $dP_{max}$  по  $dM_{max}$  за (3) від відношення  $M_{max} / \alpha$  для двох параметрів емаль дроту: *a* - напруги пробою емаль ізоляції і *б* - відносного видовження при розриві .

Співставлення похідних на рис.4 свідчить про те, що більш чутливим до зменшення стабільності технологічного процесу є параметр  $\delta$ , отже (1) є застосовним до всіх одержаних результатів, що ілюструє рис.3.

Цей рисунок ілюструє закономірність, за якою при наближенні до граничної різниці ( $M_{max} / \alpha = 1$ ) похідна збільшується, відповідні графіки є свідченням адекватності прийнятого алгоритму розрахунку  $P_{max}$ . Але значення похідних і кінетика їх зростання при наближенні до  $M_{max} / \alpha = 1$  свідчать в даному разі на користь застосування (1).

**Результати досліджень.** 1. В умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним

нормативам, важливим чинником впливу на величину мінімальної напруги пробною емальзізоляції є пластичність мідного провідника.

2. Перевірена можливість застосування контрольної карти максимальної ймовірності виходу двох параметрів за відповідні нормативні границі, яка фіксує більше значення з двох визначених.

**Список літератури:** 1. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – р.18. 2. *Щебенюк Л.А.* Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емаль провідів. / *Л.А. Щебенюк, С.Ю. Антонєць* // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 23. – С.166 – 169. 3. *Щебенюк Л.А.* Оптимальные параметры статистического контроля технологических процессов, основанного на применении интервальных статистических моделей / *Л.А. Щебенюк* // Вестник ХГПУ. – 2000. – Вып. 127 – С. 77–82. 4. *Щебенюк Л.А.* Контрольна карта – інструмент контролю якості кабельної продукції / *Л.А. Щебенюк* // Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / *В.П.Карпушенко, Л.А. Щебенюк, Ю.О. Антонєць, О.А. Науменко* – Х.: Регіон-інформ, 2000.– С. 235–269.

*Поступила в редколлегию 23. 02 .2013*

УДК 621.315.2

**Дослідження впливу пластичності мідного провідника на напругу пробною ізоляції емальпроводу / Гурін А.Г., Щебенюк Л.А., Голик О.В., Антонєць С.Ю.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність. – Харків: НТУ «ХПІ»,– 2013. – №.17 (990).– С.57-64. Бібліогр.: 4 назв. Іл.: 4. Табл.:1.

Выполнен анализ результатов контроля относительного удлинения при разрыве и напряжения пробоя эмальпровода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров.

**Ключевые слова:** относительное удлинение при разрыве, эмальпровод, пробивное напряжение, двойная изоляция.

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

**Keywords:** relative lengthening at a break, enameled wire, aggressive voltage, double isolation.

УДК 55.1+621.9.044.4

**А.Г. ГУРИН**, д-р.техн.наук, професор, зав. каф. ЕІКТ НТУ "ХПІ";  
**О.В. БОНДАРЕНКО**, ас. НТУ "ХПІ";  
**О.ШВИДКИЙ**, асп. НТУ "ХПІ"

## МЕТОД ОЦІНКИ МЕХАНІЧНОГО ЗНОШУВАННЯ ТА РЕСУРСУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ГЕОФІЗИЧНОГО ПЕРЕСУВНОГО ОБЛАДНАННЯ

Розглянуті причини зношування кабельних ліній геофізичного свердловинного обладнання та силових кабельних ліній поверхневих випромінювачів сейсмоакустичних імпульсів при сейсморозвідці і інтенсифікації видобутку нафти електрофізичними пристроями.

**Ключові слова:** кабельна лінія, механічна міцність, електричне геофізичне обладнання.

### 1. Актуальність задачі

При різноманітних геофізичних дослідженнях широко застосовуються навантажені кабелі. За допомогою цих кабелів здійснюється пересування в свердловині апаратури, подача електричного струму та передача інформації до поверхневої апаратури. Також такі кабелі використовуються для поверхневих кабельних ліній. Для нормального функціонування апаратури, що спускається до свердловини та працює на поверхні при розвідці корисних копалин, необхідні геофізичні кабелі з високою надійністю експлуатації, бо умови роботи таких кабелів є досить жорсткими, і, зазвичай, вони мають декілька шарів захисного дроту. Найбільш розповсюдженими дефектами кабельних ліній є: механічне зношення – зношення захисного шару кабелю внаслідок механічного тертя; пластичне зношення – деформація захисного шару кабелю внаслідок дії сил, що перевищують допустимі значення; корозія – фізико-хімічне зношення захисного; руйнування від перевищення допустимих осьових навантажень; руйнування від зовнішніх випадкових факторів, та інш. Найбільш шкідливими дефектами є механічне і пластичне зношення, та руйнування від зовнішніх випадкових факторів. Аналіз сучасної літератури виявив відсутність комплексного системного підходу до оцінки довговічності вказаних кабелів, а окремі автори звертаються лише до деяких одиничних аспектів міцності, зазвичай не враховуючи інтегральний вплив факторів руйнування. Тому на сьогоднішній день існує потреба в розробці комплексної методики багатофакторного оцінювання ресурсу вже існуючих геофізичних кабелів, а також розробити алгоритм розрахунку кабелів з властивостями та характеристиками, які б задовольняли жорстким умовам роботи.

© А.Г. Гурін, О.В.Бондаренко, О. Швидкий, 2013