

А.Г. ГУРИН, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПІ", Харків
С.Ю. АНТОНЕЦЬ, інженер, ЗАТ "Завод Південкабель", Харків
О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук., доц., НТУ "ХПІ", Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ДИСПЕРСІЮ ПРОБИВНОЇ НАПРУГИ ЕМАЛЬДРОТУ З ПОДВІЙНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ НА ОСНОВІ ПОЛІІМІДНИХ СПІВПОЛІМЕРІВ

The analysis of monitoring data of sigma breakdown voltages in the enameled wire with double isolation on a basis of polyamide copolymers is resulted.

Выполнен анализ результатов контроля дисперсии напряжения пробоя эмалипровода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров.

Виконано аналіз результатів контролю дисперсії напруги пробою емальпроводу з подвійною ізоляцією на основі поліімідних сополімерів.

Постановка проблеми. Підвищення надійності електротехнічно обладнання, в тому числі і електричних машин і апаратів із всипною обмоткою, надійність яких визначається, в першу чергу, надійністю виткової ізоляції, вимагає забезпечення високої однорідності ізоляції емальдроту в процесі його виробництва. Впровадження на заводі "Південкабель" виробництва емальдроту з двошаровою ізоляцією на основі поліімідних співполімерів з температурним індексом 200 °С дозволило забезпечити найвищий сучасний рівень електричної і механічної міцності емальізоляції. В цих умовах дисперсія електричної і механічної міцності емальізоляції стає основним показником якості цієї продукції, її придатності до механізованої намотки, роботи в важких умовах експлуатації, стійкості до перевантажень.

Традиційні методи випробувань, за яких виміряне значення характеристики співставляють з нормативною межею, є недостатніми для забезпечення підвищення конкурентоспроможності продукції. Тому вкрай необхідним є розроблення таких критеріїв однорідності емальізоляції і системи їх контролю, які дозволили б забезпечити неухильне зростання однорідності емальдроту, який відповідає всім нормативним вимогам.

Аналіз літератури. Експериментальне дослідження впливу параметрів мідного провідника на статистичні характеристики напруги

пробою U ізоляції емальдроту ПЕЕІДХ в діапазоні номінальних діаметрів від 0,10 мм до 0,63 мм [1-3] свідчить, що в умовах налагодженого технологічного процесу, який забезпечує відповідність емальдроту всім технічним нормативам значення напруги пробою U для котушок емальдроту впродовж неперервного технологічного циклу характеризуються суттєвим розсіянням. Близько 5% котушок мали значення $\inf(U) < U_{\min}$, де U_{\min} – прийнята технологічна границя. Основними чинниками впливу на величину напруги пробою емальізоляції є: дисперсія діаметра dp мідного провідника (від’ємна кореляція: $\text{Kor}[\sigma[dp], M[U]] = -0,762$; відносне видовження δ при розриві (позитивна кореляція: $\text{Kor}[M[\delta], M[U]] = 0,806$).

Сучасну статистичну шкалу рівня однорідності для різних виробників масової продукції пропонує так звана концепція "Six Sigma Methodology" ("6 σ "), в якій критерієм досягнутого рівня якості продукції є її однорідність. В концепції "6 σ " використовують класичний математичний апарат оцінювання середньоквадратичного відхилення σ параметра, що контролюється [4], яке є квадратним коренем із дисперсії цього параметра.

Ціль роботи. Експериментальне дослідження впродовж неперервного технологічного циклу дисперсії $(\sigma[U])^2$ напруги пробою ізоляції емальдроту ПЕЕІДХ з номінальним діаметром 0,63 мм (найбільш масова продукція) і впливу на $(\sigma[U])^2$ параметрів мідного провідника і їх дисперсій.

Одержані результати. Виконано вимірювання діаметру провідника dp і діаметру емальдроту di , напруги пробою U , механічної міцності емалі при терті N , відносного видовження δ дроту при розриві для 60 котушок емальдроту ПЕЕІДХ з номінальним діаметром 0,63 мм, виготовлених впродовж одного технологічного циклу. На рис. 1 наведені результати у вигляді відносного відхилення діаметру провідника dp і діаметру емальдроту di від відповідного середнього значення за період спостережень:

$$\delta dp_i = - (dp_{cp} - dp_i) / dp_{cp}, \quad i \in /0; 59/, \quad \delta di_i = - (di_{cp} - di_i) / di_{cp}, \quad i \in /0; 59/, \quad (1)$$

Якщо перші 25 котушок є відображенням стабільного технологічного процесу, то на рис. 1а є два періоди порушення стабільності через подачу на емальювання проволочки суттєво меншого діаметру, – приблизно на (0,7-0,8) %. Таких котушок 10 %, хоча за нормального розподілу діаметрів проволочки їх мало би бути не більше 0,13 %. З рис.1б видно, що використання проволочки суттєво меншого діаметру при незмінних параметрах маршруту емальювання, зумовлює збільшення діаметру емальдроту на (0,3-0,5) %. Відповідно діаметра-

льна товщина емалі t , як різниця діаметру емальдроту d_i і діаметру провідника d_p , за подачі на емальовання проволочки діаметру, меншого за середній на (0,7-0,8) %, збільшується на (9-10) %, причому між діаметром проволочки d_p і діаметральною товщиною емалі t від'ємна кореляція практично 100 % (рис.1,в).

Таким чином, однією з технологічних причин розсіяння пробивної напруги емальдроту є нестабільність діаметру проволочки, а відповідним кількісним критерієм може бути обрано дисперсію діаметральної товщини емаль ізоляції: $(\sigma[U])^2 = f((\sigma[t])^2)$. Для визначення цієї функції обрано емпіричну залежність середньої пробивної напруги емальдроту ПЕЕІДХ від середньої діаметральної товщини емаль ізоляції, яка запропонована в [5] і підтверджена цими даними (рис. 2):

$$U = 3096 \exp(0,014 t), \quad (2)$$

де U в В, t в мкм.

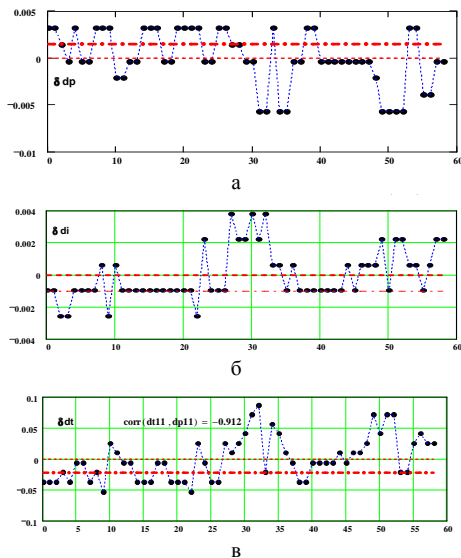


Рис. 1. Результати вимірювання діаметру провідника d_p і діаметру по емалі d_i для 60 котушок емальдроту ПЕЕІДХ з номінальним діаметром 0,63 мм, виготовлених впродовж одного технологічного циклу, у вигляді відносного відхилення діаметру провідника δd_p (а), діаметру емальдроту δd_i (б) від відповідного середнього значення за період спостережень і відносного відхилення діаметральної товщини емалі δt (в).

Формула (2) стосується середніх значень пробивної напруги ема-

льдроту ПЕЕІДХ і діаметральної товщини емальізоляції. Оскільки кореляції між окремими значеннями цих величин немає, слід припустити, що на дисперсію U впливають крім дисперсії t і інші фактори. За попередніми даними [3] другим важливим фактором впливу на дисперсію U є дисперсія пластичності міді провідника. Цю властивість контролюють вимірюванням відносного видовження при розриві δ готового емальдроту. Результати таких випробувань для даних котушок зображені на рис. 2 у вигляді відносного відхилення δ від відповідного середнього значення за період спостережень. Безрозмірна характеристика розсіяння пластичності – коефіцієнт варіації відносного видовження при розриві $V[\delta]$ – відношення середньоквадратичного розсіяння до математичного сподівання: $V[\delta] = \sigma[\delta] / M[\delta]$.

Внесок розсіяння товщини емалі в розсіяння пробивної напруги U може бути проаналізований за допомогою дисперсійного аналізу залежності $U = f(t)$ (2):

$$M[\ln U] = \ln 3096 + 0,014 M[2\Delta e \cdot 10^3], \quad (3)$$

де $\Delta e \cdot 10^3$ – радіальна товщина емаль ізоляції у мкм;

$$D[\ln U] = 0,014^2 D[2\Delta e \cdot 10^3], \quad (4)$$

$$\sigma[\ln U] = 0,014 \sigma[2\Delta e \cdot 10^3]. \quad (5)$$

(5) дає змогу оцінити вплив розсіяння товщини емалі в розсіяння пробивної напруги U . Видно, що саме похідна функції $U = f(t)$ у лінеаризованих координатах є критерієм впливу. Відповідні експериментальні оцінки правої частини (5) $0,014 \cdot 2 \cdot \sigma^* [t] \cdot 10^3$ наведено в таблиці. Там же наведено експериментально визначені значення середньоквадратичного відхилення логарифмів пробивної напруги $\sigma^* [\ln U]$ і розраховані за принципом суперпозиції двох впливів, товщини і відносного видовження при розриві.

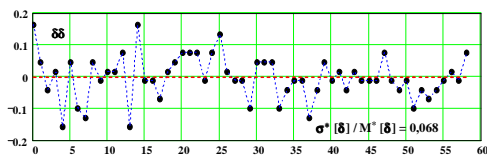


Рис. 2. Результати вимірювання відносного видовження при розриві δ готового емальдроту.

Результати таких випробувань для даних котушок зображені на рисунку у вигляді відносного відхилення $\delta\delta$ від відповідного середнього значення за період спостережень. Наведено експериментально визначений коефіцієнт варіації відносного видовження при розриві $V^* [\delta]$ – як відношення середньоквадратичного розсіяння до математичного сподівання.

Таблиця – Фактори впливу на розсіяння пробивної напруги U

№№ ко-тушо к	Експериментально визначені значення середньоквадратичного відхилення логарифмів значень пробивної напруги $\sigma^* [\ln U]$, де U у В	Експериментально визначені значення середньоквадратичного відхилення діаметральної товщини емаль ізоляції $\sigma^* [t]$, мм	Розраховані за принципом суперпозиції двох впливів товщини і відносного видовження при розриві, значення середньоквадратичного відхилення логарифмів пробивної напруги $\sigma[\ln U] 0,0142 \sigma^* [t] \cdot 10^3 + V^* [\delta] (6)$
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	$1,828 \cdot 10^{-3}$	0,12

Дані таблиці свідчать про те, що саме суперпозиція двох названих факторів впливу зумовлює розсіяння пробивної напруги емальізоляції в умовах нормального процесу емалювання (такого, який забезпечує відповідність продукції нормативним технічним вимогам). Запропонована модель (6) є напівемпіричною, оскільки її параметр і обидві змінні визначені експериментально, але смисл цих величин і сама побудова моделі мають однозначний математичний і фізичний смисл.

Висновки. За умови нормативного процесу емалювання розсіяння пробивної напруги емальізоляції зумовлене впливом двох незалежних факторів: 1. розсіянням товщини емалі через нестабільність діаметру проволок; 2. дефектами поверхні міді, розмір яких пов'язаний з пластичністю міді. Внесок 1 в розсіяння U пр може бути проаналізований за допомогою (2). Внесок 2 відображає розсіяння відносного видовження при розриві, наприклад у вигляді експериментально визначеного коефіцієнту варіації.

Список літератури: 1. *Антонець Ю.А.* Контроль технологического процесса изготовления эмальпровода / *Ю.А. Антонец, Л.А. Щербенюк, О.В. Голик* // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – Вип. 42.– С. 43-46. 2. *Гурин А.Г., Голик О.В.* Спосіб визначення дефектності двошарової ізоляції емальдроту. Деклараційний патент на корисну модель. G01N 27/00. 3. *Л.А. Щербенюк, С.Ю. Антонець* Статистичне дослідження впливу параметрів провідника на напругу пробую ізоляції емальпровода // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – Вип. 42.– С. 43-46. 4. *Dave Harrold.* Designing for Six Sigma Capability. – Control Engineering, 1999, January. – P. 62-70.

*Надійшла до редколегії 28.02.2012
Рецензент д.т.н., проф. Гурин А.Г.*