

**В. М. Манько**, к.т.н., доцент,

e-mail: [mankovm@ukr.net](mailto:mankovm@ukr.net)

**В. М. Зотов**, аспірант

e-mail: [zotov\\_vetal@ukr.net](mailto:zotov_vetal@ukr.net)

Черкаський державний технологічний університет  
6-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТІВ ВСИПНОЇ ОБМОТКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОЛІГРАФІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

*У статті запропоновано способи підвищення надійності роботи електричних машин поліграфічних комплексів за рахунок контролю процесів розтріскування міжжиткової ізоляції. Розроблена математична модель розтріскування міжжиткової ізоляції дозволяє оцінити вплив на розтріскування фізико-механічних параметрів просочувальних матеріалів та конструктивних факторів: діаметра емальованого дроту, коефіцієнта заповнення паза, кількості дротів в обмотці.*

**Ключові слова:** міжжиткова ізоляція, вірогідність, надійність, розтріскування ізоляції, обмотка, розподіл.

**Вступ.** Сьогодні у вітчизняній поліграфічній промисловості спостерігається процес технічного переоснащення підприємств. Це зумовлено багатьма факторами: передусім, бурхливим прогресом техніки та технології, істотно підвищеними вимогами до якості друкарської продукції, а також збільшення обсягів випуску друкованої реклами і пакувальних засобів, появою значної кількості невеликих підприємств – як спеціалізованих на певні види продукції, так і універсальних. Тільки сучасні техніка та технологія у поєднанні з новими методами управління виробництвом дають змогу підприємствам витримати конкуренцію і досягнути успіху на ринку поліграфічних послуг [1, 3].

Одним із шляхів збільшення та оновлення поліграфічної бази діючого парку поліграфічного обладнання в експлуатації є підвищення надійності його роботи. Цим завданням відповідає правильно організоване технічне обслуговування і ремонт поліграфічного обладнання. На багатьох підприємствах створені добре організовані ремонтні цехи, де проводяться поточні й капітальні ремонти механічної та електричної частин друкарських машин [1, 3].

Найбільш широке застосування для приводу поліграфічних машин та комплексів отримали асинхронні двигуни – прості в експлуатації, мають нескладну конструкцію і високий ККД. Численні дослідження показують,

що 70 % електричних машин поліграфічних комплексів виходять з ладу через дефекти всипної обмотки статора. Внутрішні напруження є однією з основних причин пошкодження міжжиткової ізоляції статорних обмоток [2, 4, 6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За останні роки розроблені і прийняті більш високі вимоги до якості й надійності електричних машин.

Важлива роль у вирішенні задач підвищення надійності відводиться електроізоляційним матеріалам і конструкціям електричної ізоляції. Але не повною мірою досліджені та вивчені процеси утворення тріщин і відмов ізоляції в процесі теплового старіння, не представлені фізико-хімічні взаємодії просочувальних матеріалів у конструкції з емаллю дроту. В результаті взаємодії електрична міцність міжжиткової ізоляції може підвищуватись або знижуватись. Математична теорія надійності і сучасні методи планування і обробки результатів експерименту ще недостатньо добре відомі дослідникам. Питання математичного моделювання і прогнозування надійності ізоляції відносяться до найменш вивчених.

**Постановка завдання дослідження.** Розподіл внутрішніх напружень у міжжитковій ізоляції має складний характер і може залежати від випадкового положення дротів у пазу, коефіцієнта заповнення паза і ряду ін-

ших факторів. Тому, при дослідженні та аналізі процесів розтріскування міжвиткової ізоляції обмотки електричних машин до уваги будуть братись лише основні параметри обмотки та її компонентів. На основі цього необхідно дослідити вірогідності розтріскування просочувального компаунда залежно від геометричного параметра дроту і коефіцієнта заповнення паза, а також діаметра дроту і кількості витків в катушці.

**Мета роботи** – дослідити та провести аналіз процесів розтріскування міжвиткової ізоляції всипних обмоток електричних машин поліграфічних комплексів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Вірогідність розтріскування міжвиткової ізоляції обмотки являє собою вірогідність одночасної реалізації двох незалежних дій, вона повинна визначатися за правилом перемноження вірогідностей.

Визначимо вірогідність розтріскування ізоляційного проміжку двох дротів  $n_e$  (рис. 1). Будемо вважати, що міцність складу ізоляції характеризується вірогідністю  $g(\sigma)$  і відповідною безперервною функцією розподілу  $G(\sigma)$ . Тоді вірогідність того, що міцність матеріалу в проміжку дорівнює або менша деякого значення  $\sigma$ , дорівнює

$$G(\sigma) = \int_{-\infty}^{\sigma} g(\sigma) d(\sigma). \quad (1)$$

Значення нижньої границі інтегрування  $-\infty$  введено умовно для того, щоб отримати безперервний розподіл міцності. Внутрішні напруження визначені вірогідностями  $f(\sigma)$  і функцією розподілу  $F(\sigma)$ . В цьому випадку вірогідність того, що внутрішні напруження в проміжку одного елемента знаходяться між значеннями  $\sigma$  і  $\sigma + \Delta\sigma$ , дорівнює  $f(\sigma)\Delta\sigma$ .

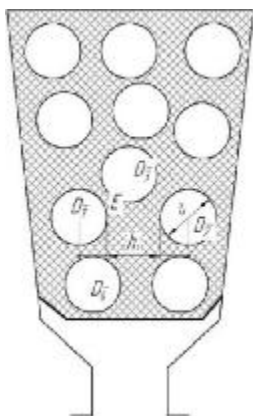


Рис. 1. Паз статорної обмотки електродвигуна

Для даного значення  $\sigma$  вірогідність розтріскування проміжку дорівнює вірогідності того, що значення внутрішнього напруження знаходиться між  $\sigma$  і  $\sigma + \Delta\sigma$ , помножений на вірогідність того, що міцність дорівнює або менша  $\sigma$ . При усіх значеннях  $\sigma$  вірогідність розтріскування ізоляційного проміжку дорівнює

$$n_e = \int_0^{\infty} f(\sigma) G(\sigma) d\sigma. \quad (2)$$

Вірогідність невиникнення тріщин в елементі дорівнює  $1 - n_e$ ; вірогідність того, що в жодному з елементів не виникне тріщина, дорівнює  $(1 - n_e)^N$ , де  $N$  – кількість елементів у системі, дорівнює  $N \approx 2.7 \omega V Z_n$ , [7, 8], де  $\omega$  – кількість витків у катушці (секції) в пазі (для одношарової обмотки  $V = 1$ , для двошарової  $V = 2$ ).

Тоді для всієї обмотки вірогідність виникнення тріщин може бути визначена за формулою

$$P_e = 1 - (1 - n_e)^N. \quad (3)$$

Із формул (2) і (3) випливає, що для розрахунку вірогідності розтріскування міжвиткової ізоляції необхідно знати розподіл внутрішніх напружень  $f(\sigma)$  і міцності просочувального матеріалу  $g(\sigma)$ . Відстань між ізолюваними дротами в пазу електродвигуна із всипною обмоткою розподілена за законом показника. Щільність вірогідності випадкового значення товщини ізоляційного проміжку між дротами може бути записана у вигляді

$$f(h) = \frac{1}{h_{cp} - 2h_e} \times \left[ -\frac{h}{h_{cp} - 2h_e} \right] \quad (4)$$

при  $2h_e < h \leq \infty$ ,

де  $h_{cp}$  – середня товщина ізоляційного проміжку між дротами;  $h_e$  – товщина емальованої ізоляції дроту.

Переходячи до відношення  $h/d$  і виражаючи  $h$  через коефіцієнт заповнення паза  $K$  дротом, вираз (4) можна привести до вигляду:

$$f\left(\frac{h}{d}\right) = \frac{1}{\lambda \left( \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}K}} - 1 \right)} \times \left[ \frac{\frac{h}{d} - (\lambda - 1)}{\lambda \left( \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}K}} - 1 \right)} \right] \quad (5)$$

при  $\frac{2h_e}{d} < \frac{h}{d} < \infty$ ,

де  $K = \frac{\omega \pi D^2}{S}$ ;  $\lambda = \frac{D}{d}$  – геометричний параметр дроту, що дорівнює відношенню діаметра дроту по емалевій ізоляції  $D$  до діаметра дроту  $d$ ;  $S$  – поперечний переріз паза без ура-

хування площі клину, пазової ізоляції міжкотушкової прокладки (рис. 1).

Перетворюючи відношення  $\frac{h}{d}$  в приведену величину внутрішніх напружень  $\sigma_M$ , на основі виразів (4) і (5) отримаємо розподіл приведеної величини внутрішніх напружень у вигляді

$$f(\sigma_M) = \frac{1}{2a\lambda\sqrt{\sigma_M-b}\left(\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\times K}}-1\right)} \times \left[ -\frac{a(c-\lambda)-\sqrt{\sigma_M-b}}{a\lambda\left(\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\times K}}-1\right)} \right], \quad (6)$$

де  $a, b, c$  – постійні коефіцієнти.

Спрощуючи вираз (6) введенням конструктивного параметра  $\theta = a\lambda\left(\sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}\times K}}-1\right)$ , отримуємо вираз

$$f(\sigma_M) = \frac{1}{2\theta\sqrt{\sigma_M-b}} \times \left[ -\frac{a(c-\lambda)-\sqrt{\sigma_M-b}}{\theta} \right] \quad (7)$$

при  $\sigma_M^0 \leq \sigma_M < \sigma_M^m$ ,

де  $\sigma_M^0$  – найменше значення приведених внутрішніх напружень;

$\sigma_M^m$  – найбільше значення приведених внутрішніх напружень.

Приведені внутрішні напруження досягають найбільшого значення  $\sigma_M^m$  при дотику дрітів по емалевій ізоляції. Аналіз виразу (7) показує, що зі зростанням геометричного параметра  $\lambda$  найбільше значення  $\sigma_M^m$  зменшується. При цьому значенні вірогідності випадкової величини  $\sigma_M$  в точці  $\sigma_M^m$  не змінюються, а в області точки  $\sigma_M^0$  спостерігається деяке збільшення за рахунок зростання кількості ізоляційних проміжків у співвідношенні  $\frac{h}{d} > 1,5 + 2$ .

При збільшенні коефіцієнта заповнення паза дротом зростає частота дотику дрітів і відповідно вірогідність  $f(\sigma_M^m)$ . При переході від випадкової приведеної величини внутрішніх напружень  $\sigma_M$  до діючої  $\sigma$  відповідно до виразу (7) розподіл випадкової діючої величини  $\sigma$  набуває вигляду

$$f(\sigma_M) = \frac{1}{2M\theta\sqrt{\frac{\sigma}{M}-b}} \times \left[ -\frac{a(c-\lambda)-\sqrt{\frac{\sigma}{M}-b}}{\theta} \right]. \quad (8)$$

При цьому характер розподілу при заданих значеннях  $\lambda$  і  $K$  зберігається, а його розташування по осі  $\sigma$  визначається  $M$ . Зі зрос-

танням  $M$  розподіл зміщується в область більш високих значень внутрішніх напружень. Вираз (8) може бути представлений у вигляді чотирипараметричного розподілу:

$$f(\sigma) = \frac{\beta}{\alpha} (\sigma - \gamma)^{\beta-1} \times \left[ -\left( \xi - \frac{(\sigma - \gamma)^\beta}{\alpha} \right) \right] \quad (9)$$

при  $\gamma < \sigma \leq \gamma + (\alpha\xi)^{\frac{1}{\beta}}$ ,

де  $(\alpha\xi)^{\frac{1}{\beta}}$  – параметр мірила;

$\beta = \frac{1}{2}$  – параметр форми;

$\gamma = Mb$  – параметр положення;

$\xi = \frac{a(c-\lambda)}{\theta}$  – параметр границі.

Вірогідності випадкової величини міцності  $\sigma_F$  задаємо у вигляді

$$g(\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_d} \times \left[ -\frac{(\sigma - \sigma_F)^2}{2\sigma_d^2} \right]$$

при  $-\infty < \sigma < \infty$ .

Відповідно функція розподілу випадкової величини  $\sigma_F$  має вигляд

$$G(\sigma) = \int_{-\infty}^{\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_d} \times \left[ -\frac{(\sigma - \sigma_F)^2}{2\sigma_d^2} \right] d\sigma$$

при  $-\infty < \sigma < \infty$ .

Для  $Z_F = \frac{\sigma_F - \overline{\sigma_F}}{\sigma_d}$  – нормально розподіленої випадкової величини маємо:

$$\Phi(Z_F) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_F} \left[ -\frac{Z_F^2}{2} \right] dZ$$

Виразивши функції  $f(\sigma)$  і  $G(\sigma)$  через відповідні параметри розподілу, вираз (3) для вірогідностей розтріскування просочувального матеріалу в обмотці можна записати:

$$P_o = 1 - \left\{ 1 - \int_{\gamma}^{\gamma + (\alpha\xi)^{\frac{1}{\beta}}} \frac{\beta}{\alpha} (\sigma - \gamma)^{\beta-1} \times \left[ -\left( \xi - \frac{(\sigma - \gamma)^\beta}{\alpha} \right) \right] \times \int_{-\infty}^{Z_F} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \left[ -\frac{Z_F^2}{2} \right] dZ d\sigma \right\}^N \quad (10)$$

Вираз (10) представляє математичну модель розтріскування просочувального матеріалу в обмотці електродвигуна. За розробленою моделлю може бути розрахована вірогідність розтріскування для будь-якої температури та будь-якого моменту теплового старіння. Для цього потрібно знати зміну фізико-механічних параметрів залежно від температури і часу старіння.

Найбільш значним результатом дослідження моделі є той факт, що вірогідність розтріскування просочувального матеріалу суттєво залежить від геометричного параметра дроту (рис. 2).

Інтервали зміни параметрів моделі вибираються, виходячи з реальних їх значень в існуючих електродвигунах серій 4А та 4АМ. В розрахунках коефіцієнт заповнення паза  $K$  змінюється в межах 0,6–0,8, геометричний параметр дроту  $\lambda$  – в межах 1–1,4, міцність матеріалу  $\sigma_B$  – в межах 50–70 МПа, коефіцієнт зміни міцності  $\sigma$  – в межах 20–50 %, узагальнений фізичний показник матеріалу  $M$  – в межах 10–20 МПа.

Зі зменшенням параметра  $\lambda$  при постійних інших параметрах вірогідність розтріскування компаунда збільшується. При цьому швидкість зміни вірогідності розтріскування збільшується зі зменшенням параметра  $\lambda$ .

В основному це пов'язано із збільшенням швидкості нарощування напружень при малих відношеннях  $h$ .

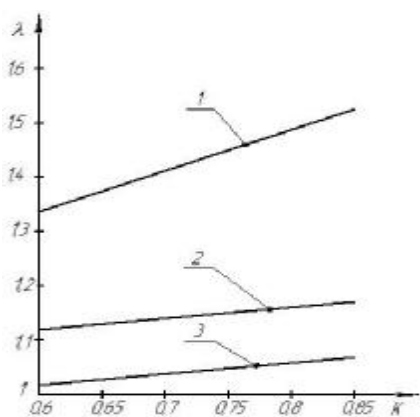


Рис. 2. Вірогідність розтріскування компаунда КП-101 залежно від геометричного параметра дроту і коефіцієнта заповнення паза:

$$1 - n_e = 10^{-6}; 2 - n_e = 10^{-5}; 3 - n_e = 10^{-4}$$

Слід відзначити, що геометричний параметр дроту значно зростає зі зменшенням діаметра провідника, а найбільш різке зростання  $\lambda$  відбувається при діаметрах провідника, менших 400 мкм. Це обумовлено тим, що емалева обмотка дроту визначає нижню границю  $\frac{h}{a}$ .

Відповідно до математичної моделі діаметр провідника і кількість витків у котушці роблять протилежний вплив на вірогідність розтріскування ізоляції. Вона знижується зі

зменшенням діаметра провідника і зростає зі збільшенням кількості витків  $W$ , тому що зростає кількість елементів  $N$  (рис. 3).

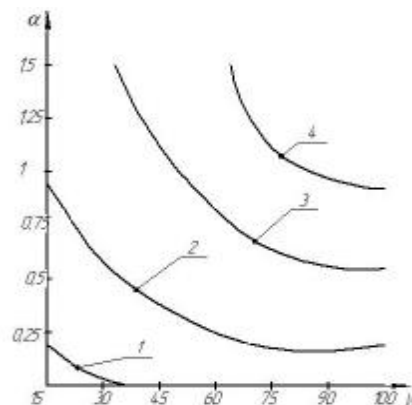


Рис. 3. Вірогідність розтріскування компаунда КП-101 залежно від діаметра дроту і кількості витків у котушці:

$$1 - n_e = 10^{-4}; 2 - n_e = 10^{-3}; 3 - n_e = 10^{-2}; 4 - n_e = 10^{-1}$$

Математична модель розтріскування міжвиткової ізоляції дозволяє оцінити вплив на розтріскування фізико-механічних параметрів просочувальних матеріалів і конструктивних факторів: діаметра емальованого дроту, коефіцієнта заповнення паза, кількості дротів в обмотці. Розроблена математична модель відображає початкову стадію пошкодження міжвиткової ізоляції – розтріскування просочувального матеріалу в обмотці електродвигуна. За цією моделлю може бути розрахована вірогідність розтріскування для будь-якої температури і для будь-якого моменту теплового старіння. Для цього потрібно знати зміну фізико-механічних параметрів залежно від температури і часу старіння.

**Висновки.** На основі отриманих результатів дослідження встановлено, що:

1) вірогідність розтріскування полімерної ізоляції зменшується більш ніж у п'ять разів при збільшенні геометричного параметра дроту з 1 до 1,4;

2) при діаметрах емальованого дроту, менших 0,4 мм, вірогідність розтріскування полімерного середовища різко зменшується внаслідок значного збільшення геометричного параметра дроту;

3) коефіцієнт заповнення паза емальованим дротом на вірогідність полімерного середовища практично не впливає.

## Список літератури

1. Друкарське устаткування : підручник / Я. І. Чехман, В. Т. Сенкус, В. П. Дідич, В. О. Босак. – Львів : УАД, 2005. – 468 с.
2. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. – [Чинний від 01-01-1996]. – К. : Держспоживстандарт України, 1994. – 96 с.
3. ДСТУ 3433-96 Моделі відмов. Основні положення. – [Чинний від 01-01-1999]. – К. : Держспоживстандарт України, 1997. – 98 с.
4. Ванев Б. Н. Надежность асинхронных электродвигателей / Б. Н. Ванев. – К. : Техника, 1983. – 142 с.
5. Горбунов А. П. Комплексный подход к оценке надежности электрических машин / А. П. Горбунов, О. Д. Гольдберг, Э. Б. Иртышский – Электричество. – 1984. – № 5. – С. 52–54.
6. Корчемный Н. А. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве / Н. А. Корчемный, В. П. Машевский. – К. : Урожай, 1988. – 176 с.
7. Надежность изоляции электрических машин / А. И. Галushko, И. С. Максимова, Р. Г. Оснач, П. М. Хазановский. – М. : Энергия, 1979. – 176 с.
8. Петров Т. А. Обоснование периодичности технического обслуживания и ремонта электродвигателей с учетом их эксплуатационной надежности : автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Челябинск, 1983. – 24 с.
9. Манько В. М. Універсальний стенд діагностування та випробування електричних машин / В. М. Манько // Автошляховик України (Київ). – 2001. – Вип. 2. – С. 48–53.
10. Костинюк Л. Д. Моделювання електроприводів / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук – Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.

## References

1. Chehman, Ja. I., Senkus', V. T., Didych, V. P. and Bosak, V. O. (2005) Printing equipment. L'viv: UAD, 468 p. [in Ukrainian].
2. DSTU 2860-94 (1994) Engineering reliability. Terms and definitions. [Effective as of 01.01.1996]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 96 p. [in Ukrainian].
3. DSTU 3433-96 (1997) Models of failures. Substantive provisions. [Effective as of 01.01.1999]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 98 p. [in Ukrainian].
4. Vaneev, B. N. (1983) The reliability of induction motors. Kyiv: Tehnika, 142 p. [in Russian].
5. Gorbunov, A. P., Gol'dberg, O. D. and Irtyshskij, E. B. (1984). An integrated approach to assessing the reliability of electrical machines. *Elektrichestvo*, No. 5, pp. 52–54 [in Russian].
6. Korchemnyj, N. A. and Mashevskij, V. P. (1988) The increase of reliability of electrical equipment in agriculture. Kiev: Urozhaj, 176 p. [in Russian].
7. Galushko, A. I., Maksimova, I. S., Osnach, R. G. and Hazanovskij, P. M. (1979) The reliability of insulation of electric machines. Moscow: Energija, 176 p. [in Russian].
8. Petrov, T. A. (1983). Justification of the frequency of maintenance and repair of electric motors with regard to their operational reliability: theses for Ph.D. in Engineering. Chelyabinsk, 24 p. [in Russian].
9. Man'ko, V. M. (2001). Universal stand for diagnosing and testing of electrical machines. *Avtoshlyahovyk Ukrayiny*, (2), Kyiv. pp.48–53 [in Ukrainian].
10. Kostynjuk, L. D., Moroz, V. I. and Paranchuk, Ja. S. (2004) Modeling of electric drives. L'viv: Nac. un-t «L'viv's'ka politehnika», 404 p. [in Ukrainian].

V. M. Manko, Ph.D., associate professor,  
e-mail: [mankovm@ukr.net](mailto:mankovm@ukr.net)

V. M. Zotov, postgraduate student  
e-mail: [zotov\\_vetal@ukr.net](mailto:zotov_vetal@ukr.net)

Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

## THE STUDY AND ANALYSIS OF PROCESSES OF WINDING DEFECTS PRECIPITATION IN ELECTRIC MACHINES OF PRINTING COMPLEXES

*In recent years, higher demands for quality and reliability of electrical machines are developed and approved.*

*An important role in solving the increase in reliability is given to insulation materials. Nevertheless, the processes of cracking and isolation failures during heat aging are to be fully researched, physical and chemical interactions of impregnating materials in the construction with wire enamel are not shown. As a result of interaction an electrical strength of interturn insulation may increase or decrease. Distribution of internal stresses in interturn isolation has a complex character and may depend on the random position of wires in a groove, the groove filling factor, etc. The aim of this work is to study the probability of cracking of wire penetrating parameter and the groove filling factor and also of wire diameter and number of turns in the coil.*

*Based on the results of the study it is found that the probability of cracking of polymer insulation is reduced more than 5 times with the increase of wire geometric parameters from 1 to 1.4, and the factor of groove filling by enameled wire has virtually no effect on the probability of cracking of polymer medium.*

*Mathematical model of interturn isolation cracking allows to evaluate the impact of cracking on physical and mechanical parameters of impregnating materials and structural factors, such as enameled wire diameter, groove filling factor, the number of wires in the coil.*

**Keywords:** *interturn insulation, probability, reliability, insulation cracks, winding, distribution.*