

**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

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ МІЖВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ВИДАВНИЧО-ПОЛІГРАФІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ І МЕТОДИ ЇЇ РОЗРАХУНКУ

*У статті запропоновано способи дослідження та контролю стану ізоляції статорних обмоток електричних машин поліграфічних комплексів. Розроблено математичну модель оцінки надійності міжвиткової ізоляції і методи її розрахунку, що дає можливість визначити залежність вірогідності безвідмовної роботи ізоляції обмотки від часу при заданих умовах експлуатації. Проведено аналіз дії комутаційних перенапруг по секціях і витках обмотки внаслідок змішування дротів при всипанні їх в паз.*

**Ключові слова:** надійність, міжвиткова ізоляція, обмотка, електрична машина, вірогідність, розподіл напруг, інтервал часу.

**Вступ.** На сьогодні друкарське обладнання потребує підвищення техніко-економічних характеристик і показників друкарських машин, а саме: коефіцієнта корисної дії, продуктивності і надійності при значному зниженню маси машин. Слід звернути увагу на основні тенденції сучасного друкарства: підвищення швидкохідності і потужності машин, автоматизацію, механізацію технологічних процесів, введення в дію автоматизованих ліній. Однак, потрібно мати на увазі, що збільшення потужності, швидкохідності і продуктивності машин, з одного боку поліпшує її техніко-економічні показники, з іншого боку – підвищує динамічні навантаження в деталях і складальних одиницях, що вимагає застосування сучасних механізмів, деталей, які виготовляються з високою точністю [1, 3].

Раціонально спроектована і правильно виготовлена машина повинна бути міцною, довговічною, дешевою, економічною в роботі і безпечною в експлуатації.

Для привода друкарських машин та комплексів в основному застосовуються трифазні асинхронні двигуни, їх перевага в порівнянні з двигунами інших типів: простота конструкції, невелика ціна, більш висока експлуатаційна надійність. Надійність роботи електродвигуна в великій мірі характеризує надійність роботи привода поліграфічних комплексів. Як систему надійності можна

розглядати обмотку електродвигуна, в цьому випадку її елементами будуть пазова ізоляція, міжвиткова ізоляція, ізоляція виводних дротів. В той же час система ізоляції конкретної електричної машини може бути описана показниками надійності [2, 4, 6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теорія надійності вивчає загальні закономірності, які слід враховувати при проектуванні, виготовленні, експлуатації технічних об'єктів для забезпечення максимальної ефективності їх використання. Надійність є комплексною властивістю, яка залежно від призначення об'єкта і умов експлуатації може включати безвідмовність, довговічність, працездатність і т.д.

Всі властивості кожного виробу з точки зору його надійності характеризуються показниками надійності – кількісними характеристиками одного або декількох властивостей, що складають надійність об'єкта. До електроізоляційних матеріалів в відповідності з цим визначенням не може бути застосовано поняття «надійність». Окремо взятий електроізоляційний матеріал не є виробом так, як повинен бути застосований в конкретному виробі. В той же час система ізоляції електричної машини може бути описана показниками надійності, бо можна встановити режими і умови її використання. Деякі дослідники вважають, що використання таких понять як без-

відмовність, довговічність по відношенню до системи ізоляції не тільки можливі, але і необхідні. Вони пояснюють це тим, що для більшості електричних машин саме показниками системи ізоляції визначається безвідмовність.

**Постановка завдання дослідження.** Для побудови математичної моделі надійності міжвиткової ізоляції раціонально використувати методику теорії вірогідності і математичної статистики. По-перше, слід із всіх станів, в яких може знаходитися система, виділити стан, що відрізняється з точки зору надійності. По-друге, необхідно встановити функціональний зв'язок між елементами системи з точки зору надійності і врахувати характер впливу системи надійності окремих елементів, а також спосіб утворення системи із елементів. Крім того, можна прийняти припущення, що елементи відмовляють незалежно один від одного. Системи такого типу називаються послідовними.

Також слід встановити параметр досліджуваного елемента, який визначає його надійність. Так, як відмова обмотки визначається виникненням міжвиткового замикання, то таким параметром є пробивна напруга міжвиткової ізоляції. Відмова виникає в тому випадку, коли напруга прикладена до сусідніх витків, перевищує пробивну напругу міжвиткової ізоляції. Прикладена напруга і пробивна напруга міжвиткової ізоляції є випадковими величинами. Вірогідність того, що міжвиткова ізоляція не проб'ється, буде дорівнювати вірогідності того, що пробивна напруга міжвиткової ізоляції перевищує прикладену до неї напругу.

Метою роботи є побудова математичної моделі оцінки надійності міжвиткової ізоляції електричних машин видавничо-поліграфічних комплексів з розробкою методики її розрахунку.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Ідея побудови математичної моделі надійності міжвиткової ізоляції обмотки асинхронного двигуна показана на рис. 1. На цьому рисунку  $g(U)$  – щільність вірогідності розподілу прикладання напруг,  $f(U_{np})$  – щільність вірогідності розподілу пробивних напруг. В початковому стані (крива I) вірогідність того, що прикладена напруга перевищує пробивну дорівнює нулю, тоді вірогідність безвідмовної роботи системи ізоляції дорівнює одиниці. В процесі старіння під впливом зовнішніх фак-

торів проходить пошкодження ізоляційних проміжків і розподіл пробивних напруг змінюється (крива II). Спочатку визначимо вірогідність безвідмовної роботи  $P_e$  окремого елемента. На основі припущення, що надійність системи дорівнює надійності її найслабшого кола, визначимо вірогідність безвідмовної роботи системи, яка складається із  $n$  елементів. Будемо вважати, що пробивна напруга міжвиткової ізоляції  $U_{np}$  є щільністю вірогідності  $f(U_e)$  і відповідно безперервною функцією розподілу  $F(U_e)$ .

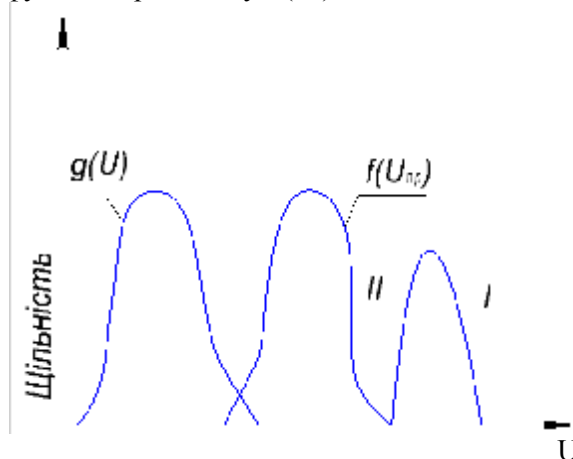


Рис. 1. Модель для визначення надійності міжвиткової ізоляції обмоток

Також можна представити, що прикладена напруга  $U$  визначена, безпосередньо, через щільність вірогідності  $g(U)$  і функції розподілу  $G(U)$ . Тоді, вірогідність безвідмовної роботи обмотки можна записати так:

$$P_{об.} = \int_0^{\infty} g(U) [1 - F(U_e)]^n dU_e, \quad (1)$$

де  $g(U)$  – щільність розподілу вірогідностей прикладеної напруги;

$F(U_e)$  – функція розподілу вірогідностей виткової пробивної напруги;

$n$  – число елементів обмотки.

Вираз (1) являє собою математичну модель надійності міжвиткової ізоляції обмотки, яка складається із  $n$  пар дротів.

Щоб цією моделлю можна було користуватися, необхідно знати розподіл пробивних і прикладених напруг.

Крім того, щоб можна було визначити вірогідність безвідмовної роботи в різні періоди часу, слід встановити залежність розподілу вірогідності пробивних напруг міжвиткової ізоляції від часу експлуатації в заданих умовах.

В результаті численних експериментів вираз для щільності розподілу вірогідностей комутаційних перенапруг в обмотках асинхронних електродвигунів має вигляд [7]

$$g(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} l^{-\frac{(k-1)^2}{0,08}} + \frac{0,35}{1+(k-3)^2}, \quad (2)$$

де  $k$  – кратність комутаційних перенапруг.

Напруга між сусідніми витками залежить від розподілу комутаційних перенапруг по секціях і витках обмотки. Для комутаційних перенапруг, що мають імпульсний характер, цей розподіл залежить від багатьох факторів. Це було доведено експериментально на електродвигунах типу 4AM100L4Y3 і 4AM112M4Y3.

Отримані залежності показали, що при імпульсних напругах, комутаційні перенапруги практично рівномірно розподілені по секціях обмотки.

Також експериментально було встановлено, що перенапруги практично рівномірно розподіляються і по витках секції.

В асинхронних двигунах з напівзакритими пазами і всипною обмоткою внаслідок змішування дротів при всипанні їх в паз, виникає вірогідність того, що поряд в пазу будуть знаходитись дроти зі значною різницею номерів. Це приведе до збільшення напруги між окремими парами сусідніх дротів і тому повинно враховуватись в математичній моделі міжвиткової ізоляції.

Експериментальна перевірка розташування дротів всипної обмотки в напівзакритих пазах, отримана на електродвигунах різних типорозмірів показала, що вірогідність розподілу дротів в пазу може бути визначена за формулою [7]

$$P(l_i) = \frac{\ln \frac{S}{\omega_i}}{0,98S - 1,6}, \quad (3)$$

де  $\omega_i$  – різниця порядкових номерів дротів;

$S$  – кількість дротів в секції.

Застосовуючи формули (2) і (3), можна визначити щільність розподілу вірогідностей прикладених напруг між витками обмотки.

Пробивну напругу міжвиткової ізоляції найправильніше визначати на намотаному і просочувальному статорі електродвигуна. Для

цього лобові частини обмотки з однієї сторони пакету статора повинні бути розрізані і кінці рядом розташованих дротів розведені. Вірогідність пробивної напруги міжвиткової ізоляції розподілена за законом розподілу Вейбула. З використанням цього закону функція і щільність розподілу вірогідностей виткової пробивної напруги записуються у такому вигляді:

$$F(U_B) = 1 - l^{\frac{U_B}{U_0}}; \quad (4)$$

$$f(U_B) = -\frac{\alpha}{U_0} \cdot U_B^{\alpha-1} \cdot l^{-\frac{U_B}{U_0}}; \quad (5)$$

де  $\alpha$ ,  $U_0$  – параметри розподілу.

Для проведення розрахунку надійності міжвиткової ізоляції обмотки слід знати закон розподілу вірогідностей пробивних напруг в заданий період часу.

Якщо прийняти припущення, що закон розподілу вірогідностей пробивних напруг в процесі експлуатації не змінюється, а його параметри змінюються, то необхідно визначити функції:

$$U_0 = f(t) \text{ і } \alpha = \varphi(t)$$

при заданих умовах експлуатації. Ці функції наближено можуть бути визначені шляхом проведення багатофакторного експерименту. Досліджувався вплив таких експлуатаційних факторів:

1. Температура обмотки електродвигуна  $x_1$ ;
2. Частота пусків  $x_2$ ;
3. Рівень вібрації  $x_3$ ;
4. Час роботи електродвигуна  $x_4$ .

Зазначені фактори відповідали таким рівням:

1. Температура – 120 і 150<sup>0</sup>С;
2. Частота пусків – 2 і 120 на 1 год.;
3. Рівень вібрації – 10 м/с<sup>2</sup>;
4. Час роботи електродвигуна – 500 і 2000 год.

Для проведення досліду було залучено декілька однотипних електродвигунів, після закінчення досліду пробивали близько 50 пар сусідніх витків. Дослідження проводились в електроремонтному цеху Черкаського політехнічного технікуму.

В результаті статистично запланованого експерименту були отримані рівняння для параметрів розподілу  $U_0$  і  $\alpha$ .

$$\lg U_0 = 4,71 - 2,23x_1 - 0,491x_2 - 1,336x_4 - 0,06x_1 \cdot x_2 + 0,09x_1 \cdot x_4; \quad (6)$$

$$\alpha = 5,53 - 2,159x_1 - 0,259x_2 - 1,041x_4 + 0,097x_1 \cdot x_2 + 0,092x_1 \cdot x_4; \quad (7)$$

У формулах (6) і (7) змінні  $x_1-x_4$  виражені в відносних одиницях:

$$x_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (8)$$

де  $x_{0i}$  – нульовий рівень змінної;

$\Delta x_i$  – інтервал обрахувань.

Використовуючи цю математичну модель, проведемо розрахунки.

Мета розрахунку – визначити залежність вірогідності безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції обмотки від часу  $\tau$  при заданих умовах експлуатації.

Вихідні дані для розрахунку:

- 1) марка просочувального матеріалу;
- 2) кількість ефективних дротів в секції  $S$ ;
- 3) марка і діаметр обмоткового дроту;
- 4) кількість послідовно з'єднаних секцій  $q$ ;
- 5) кількість пазів статора  $z$ ;
- 6) кількість сторін секцій в пазу  $c$ ;
- 7) частота пусків електродвигуна на 1 год.  $\psi$ ;
- 8) установлена температура обмотки при експлуатації  $T$ ;

9) режим роботи електродвигуна, ступінь зволоженості, температура навколишнього середовища при зволоженні;

10) емпіричні залежності

$\lg U_0 = f(\tau), \alpha = \varphi(\tau)$  при заданих умовах експлуатації.

$$Q_{\Delta ti} = \frac{1}{0,98-1,6} \sum_{\omega=1}^{S-1} \lg \frac{S}{\omega} \cdot \left[ \int_1^{10} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot l^{-\frac{(k-1)^2}{0,08}} + \frac{0,35}{1+(k-3)^2} \right] \cdot \left[ 1 - e^{\frac{n}{0,9Sq} \left( \frac{k\omega U_{\phi m}}{0,9Sq} \right)^{\alpha i}} \right] dk; \quad (12)$$

де  $k$  – кратність комутаційних перенапруг;

$U_{\phi m}$  – амплітуда фазної напруги.

5. Визначається вірогідність безвідмовної роботи для кожного інтервалу часу  $\Delta \tau_i$ , але з урахуванням кількості включень електродвигуна за час  $\Delta \tau$ ,

$$V_i = f_{\Delta \tau i} \quad (13)$$

$$P_{\Delta \tau i v i} = (1 - Q_{\Delta \tau i})^{V_i}. \quad (14)$$

6. Визначається вірогідність безвідмовної роботи в функції часу.

Для цього послідовно перемножуємо:  $P_{\Delta \tau i v i}$ .

Вірогідність безвідмовної роботи пазової, міжфазної і міжсекційної ізоляції  $P_{II}(\tau)$ ,  $P_M(\tau)$ ,  $P_C(\tau)$  обмотки визначається, як всієї обмотки за формулою:

$$P_{\text{ам}}(\tau) = P_e(\tau) \cdot P_{II}(\tau) \cdot P_M(\tau) \cdot P_C(\tau). \quad (15)$$

Розрахунок надійності проводиться в такій послідовності:

1. Визначається кількість ефективних дротів в обмотці електродвигуна.

$$N = S \cdot c \cdot z, \quad (9)$$

де для одношарової  $c=1$ , для двошарової  $c=2$ .

2. Визначається кількість елементів моделі  $n$ :

$$n = 2, 7N. \quad (10)$$

Формула (10) отримана при розрахунку середнього числа дротів з якими дотикається кожний дріт в пазу.

3. Загальний час  $\tau$ , за який слід визначити вірогідність безвідмовної роботи  $P(\tau)$ , розбивається на ряд інтервалів  $\Delta \tau$  таким чином, щоб значення статистик пробивної напруги міжвиткової ізоляції  $\lg U_0$  і  $\alpha$  в кожному інтервалі часу могли б бути прийняті постійними.

4. Визначається вірогідність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції послідовно для кожного інтервалу часу при одному включенні електродвигуна.

Після відповідних перетворень формул (2); (3); (4) формула (1) набуде вигляду:

$$P_{\Delta \tau i} = 1 - Q_{\Delta \tau i}, \quad (11)$$

де  $Q_{\Delta \tau i}$  – вірогідність відмови.

Відмова ізоляції обмоток проходить в результаті виникнення короткого замикання виткового, корпусного або міжфазного.

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

1. Розроблена математична модель дає можливість визначити залежність вірогідності безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції обмотки від часу, що скорочує час проведення регламентних робіт електричних машин поліграфічних комплексів на 25%.

2. Вірогідність безвідмовної роботи пазової, міжфазної і міжсекційної ізоляції обмотки досить близька до одиниці і практично не впливає на значення вірогідності безвідмовної роботи всієї обмотки.

3. Більшість електричних машин поліграфічних комплексів визначаються безвідмовністю показниками системи ізоляції тому, контроль, прогнозування і визначення опору ізоляції обмоток, має вирішальне значення.

## Список літератури

## References

1. Чехман Я. І., Сенкус В. Т., Дідич В. П., Босак В. О. Друкарське устаткування: підручник. Львів: УАД, 2005. 468 с.
2. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 01-01-1996]. Київ: Держспоживстандарт України, 1994. 96 с.
3. ДСТУ 3433-96. Моделі відмов. Основні положення. [Чинний від 01-01-1996]. Київ: Держспоживстандарт України, 1997. 98 с.
4. Ванеев Б. Н. Надійність асинхронних електродвигунів. Київ: Техніка, 1983. 142 с.
5. Горбунов А. П., Гольдберг О. Д., Иртышский Э. Б. Комплексный подход к оценке надежности электрических машин. *Электричество*. 1984. № 5. С. 52–54.
6. Корчемный Н. А., Машевский В. П. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве. Киев: Урожай, 1988. 176 с.
7. Галушко А. И., Максимова И. С., Оsnach Р. Г., Хозановский П. М. Надежность изоляции электрических машин. Москва: Энергия, 1979. 176 с.
8. Петров Т. А. Обоснование периодичности технического обслуживания и ремонт электродвигателей с учетом их эксплуатационной надежности: автореф. дис. ... к.т.н. Челябинск, 1983. 24 с.
9. Манько В. М. Універсальний стенд діагностування та випробування електричних машин. *Автошляховик України*. Вип. 2. Київ, 2001. С. 48–53.
10. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2004. 404 с.
11. Томашівський В. М. Моделювання систем. Київ: Видав. група BHV, 2005. 352 с.
12. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. Москва: Высшая школа, 2001. 327 с.
13. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем. Киев: Высшая школа, 1987. 63 с.
1. Chehman, Ja. I., Senkus', V. T., Dydych, V. P., Bosak V. O. (2005) Printing equipment. L'viv: UAD, 468 p. [in Ukrainian].
2. DSTU 2860-94. (1994) Reliability engineering. Terms and definitions. [Effective as of 01.01.1996]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 96 p. [in Ukrainian].
3. DSTU 3433-96. (1997) Models of failures. The main 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., Irtyshskij, E. B. (1984) Integrated approach to assessing the reliability of electrical machines. *Elektrichestvo*, No. 5, pp. 52–54 [in Russian].
6. Korchemnyj, N. A., Mashevskij, V. P. (1988) The increase of electric equipment reliability in agriculture. Kiev: Urozhaj, 176 p. [in Russian].
7. Galushko, A. I., Maksimova, I. S., Osnach, R. G., Hazanovskij, P. M. (1979) The reliability of electric machines insulation. 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: thesis fir Ph.D. in Engineering. Chelyabinsk, 24 p. [in Russian].
9. Man'ko, V. M. (2001) Universal stand for diagnosing and testing of electric machines. *Avtoshlyahovyk Ukrayiny*, (2). Kyiv, pp. 48–53 [in Ukrainian].
10. Kostynjuk, L. D., Moroz, V. I., Paranchuk, Ja. S. (2004) Modeling of electric drives. L'viv: Nats. un-t «L'vivs'ka politehnika», 404 p. [in Ukrainian].
11. Tomashivs'kyu, V. M. (2005) Systems simulation. Kyiv: Vydav. hrupa BHV, 352 p. [in Ukrainian].
12. Kopylov, I. P. (2001) Mathematic modeling of electric mashines. Moscow: Vysshaja shkola, 327 p. [in Russian].
13. Ivahnenko, A. G. (1987) Modeling of complex systems. Kiev: Vysshaja shkola, 63 p. [in Russian].

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

**MATHEMATICAL MODEL FOR EVALUATING THE RELIABILITY  
OF INTERTURN INSULATION OF ELECTRICAL MACHINES  
OF PUBLISHING AND PRINTING COMPLEXES  
AND METHODS FOR ITS CALCULATION**

*The article suggests ways to study and control the state of stator winding insulation of electrical machines of printing complexes. A mathematical model for evaluating the reliability of interturn insulation and methods of its calculation is developed, which makes it possible to determine the dependence of the probability of failure-free operation of winding insulation on time for given conditions. The analysis of the action of commutation overvoltage in sections and coils of windings due to mixing of wires at their pouring in a groove.*

**Keywords:** *reliability, interturn insulation, winding, electrical machine, probability, distribution of stresses, time interval.*

*Рецензенти: Осипенко В. І., д.т.н., професор,  
Поздєєв С. В., д.т.н., професор*