

В. М. Манько, к.т.н, доцент,

e-mail mankovm@ukr.net

В. М. Зотов, аспірант

e-mail zotov_vetal@ukr.net

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ІЗОЛЯЦІЇ СТАТОРНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОЛІГРАФІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті запропоновано способи дослідження та контролю стану ізоляції статорних обмоток електричних машин поліграфічних комплексів. Побудована фізична модель ізоляції дає можливість визначати внутрішні напруження, незалежно від фізико-механічних характеристик просочувального матеріалу. Охарактеризовано основні процеси, що визначають кінетику старіння і пошкодження ізоляції.

Ключові слова: міжвиткова ізоляція, емалева плівка, полімер, адгезія, пробивна напруга, внутрішні напруження

Вступ. Приблизно 70 % виробленої електроенергії перетворюється в механічну за допомогою електродвигунів. Найбільше застосування знаходять асинхронні електродвигуни, встановлена потужність яких становить близько 200 млн. кВт. Тому навіть незначне підвищення енергетичних показників асинхронних двигунів якоюсь мірою допоможе вирішенню проблеми не тільки зниження споживання електроенергії, але й енергозбереження та екології. Промисловість, сільське господарство, транспорт і побут забезпечуються електродвигунами загального призначення в повному обсязі.

Для приводу поліграфічних машин та комплексів в основному застосовуються електродвигуни серії 4А та 4АМ. За останні роки розроблено і прийнято більш високі вимоги до якості й надійності електричних машин. Передбачається, що ці вимоги будуть виконані з застосуванням більш ефективних матеріалів. Важлива роль у підвищенні надійності відводиться електроізоляційним матеріалам і конструкціям електричної ізоляції. Система ізоляції електричної машини або серії машин може бути описана показниками надійності так, що, розглядаючи систему ізоляції електричної машини, можна встановити режим і умови її використання [1, 3]. Дослідженню підлягають електричні машини з обмотками з емальованого дроту, просоченими компаундами або лаками.

Фізико-механічні параметри просочувальних матеріалів суттєво впливають на працездатність міжвиткової ізоляції електродви-

гунів. Для більшості електричних машин показники системи ізоляції визначають їх безвідмовність. Тому вивчення і дослідження фізико-механічних властивостей полімерної міжвиткової ізоляції і виникнення дефектів у ній мають велике значення в забезпеченні надійності електричних машин поліграфічних комплексів [2, 4, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математична теорія надійності і сучасні методи планування та обробки результатів експерименту ще не достатньо добре відомі дослідникам і споживачам електроізоляційних матеріалів. Основним недоліком підходу до дослідження властивостей матеріалів є те, що основна увага приділяється їх електроізоляційним характеристикам. Не враховувався комплекс фізико-механічних характеристик, з допомогою яких можна вивчати і прогнозувати поведінку матеріалів у конструкціях електричних машин. До цього часу не розроблені методи розрахунку довговічності й надійності ізоляції, які б базувалися на знанні фізики процесів її пошкодження, відсутній математичний апарат отримання числових значень. Не вивчені процеси розтріскування і відмови ізоляції в процесі теплового старіння.

Постановка завдання дослідження. Основною причиною пошкодження міжвиткової ізоляції електричних машин є внутрішні напруження. Під їх дією у міжвитковій ізоляції утворюються різні дефекти, які й зменшують пробивну напругу в процесі експлуатації. Після просочування зі збільшенням товщини шару полімеру на дроті внутрішні напружен-

ня в емалевій плівці збільшуються. В цьому випадку слід очікувати зменшення терміну служби ізоляції, і зменшення буде тим більшим, чим товща і жорсткіша емалева плівка. На основі цих припущень необхідно побудувати фізичну модель ізоляції статорних обмоток електричних машин та провести розрахунок внутрішніх напружень.

Метою роботи є побудова і дослідження фізичної моделі ізоляції статорних обмоток електричних машин поліграфічних комплексів із визначенням їх внутрішніх напружень.

Виклад основного матеріалу дослідження. При побудові фізичної моделі ізоляції обмотки приймаються лише основні параметри обмотки та її компоненти.

Прийнято такі припущення:

- пазові частини обмотки можуть бути представлені лінійно;
- в армованій системі циліндричних мідних стержнів простір між ними повністю заповнено полімерним матеріалом (рис. 1);
- стержні розташовані так, що їх осі паралельні і розглядаються як абсолютно жорсткі тіла, так, як модуль пружності металів значно більший за модуль пружності відомих просочувальних матеріалів і емалевих плівок.

Враховуючи, що фізико-механічні параметри просочувальних матеріалів і емалевих плівок порівняно з міддю відносно близькі і суттєво відрізняються від параметрів металевих стержнів, міжвиткову ізоляцію в цій моделі можна розглядати як однорідне середовище.

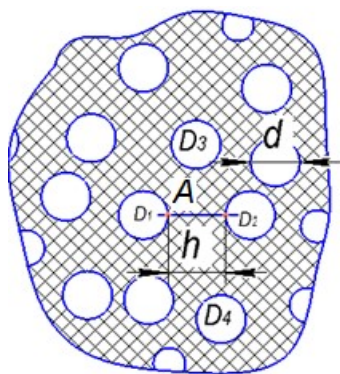


Рис. 1. Поперечний переріз пазової частини статорних обмоток

Крім того, вважається, що охолодження або нагрівання обмотки відбувається в установлених тепловому режимі з дуже малим переходом температури по довжині обмотки.

На рис. 1 зображено спрощену схему поперечного перерізу пазової частини статорних обмоток. Дроти діаметром d розділені ізоляційним проміжком, який складається з двох шарів емалі і шару просочувального матеріалу. Товщина ізоляційного проміжку між двома сусідніми дротами умовно характеризується відстанню між поверхнями дротів – величиною h . Розглянемо довільно вибрані два сусідні дроти D_1 і D_2 . Разом із дротами D_3 і D_4 вони утворюють відповідну комірку. Напружений стан полімеру всередині комірки обумовлено взаємним впливом чотирьох дротів D_1, D_2, D_3 і D_4 . Вплив інших дротів не беремо до уваги, тому що напруження в полімері різко зменшується при віддаленні від поверхні дроту. Приймається той факт, що для полімерів існує температура T_c , при якій напруження в полімері наближається до нуля. Зі зниженням температури від T_c до $T_{розр.}$ напруження зростають пропорційно різниці температур $\Delta T = T_c - T_{розр.}$

Напружений стан полімеру в такій системі характеризується напруженнями всебічного розтягу в центральних областях комірок, а також радіальними напруженнями стиску σ_r , тангенціальними σ_θ і осьовими σ_z напруженнями розтягу в усіх точках на поверхні розділу дріт-полімер. Напруження досягають максимальних значень у проміжку між двома сусідніми дротами на лінії, що з'єднує їх центри, в точці A (рис. 1). При малих віддальх між дротами, коли h менше $0,1d$, радіальна складова напружень може змінювати свій знак на протилежний. При дотику дротів між собою полімерне середовище по всьому об'єму буде характеризуватись загальним розтягом.

Складові напружень σ_r , σ_θ і σ_z в точці A перетину поверхонь дротів можуть бути визначені відповідно до виразів

$$(\sigma_r) = 2G_0\Delta\alpha \cdot \Delta T \left\{ \frac{B_0\pi}{2\sqrt{3}\cdot\rho^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \times [2p^{(6n+4)}(z) - p^{(6n+5)}(z) + p_1^{(6n-4)}(z)] - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{6n}}{(6n+1)} p^{(6n)}(z) \right\};$$

$$\begin{aligned}
 (\sigma_\theta) = 2G_0\Delta\alpha \cdot \Delta T & \left\{ \frac{B_0\pi}{2\sqrt{3}\cdot\rho^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \times [2p^{(6n+4)}(z) + p^{(6n+5)}(z) - p_1^{(6n+4)}(z)] + \right. \\
 & \left. \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{6n}}{(6n+1)} p^{(6n)}(z) \right\}; \\
 (\sigma_z) = 2G_0\Delta\alpha \cdot \Delta T & \left\{ (1+\nu_0) - \nu_0 \left[\frac{B_0\pi}{\sqrt{3}\cdot\rho^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \cdot p^{(6n+4)}(z) \right] \right\},
 \end{aligned} \quad (1)$$

де ν_0 – коефіцієнт Пуассона;

G_0 – модуль зсуву, пов'язаний з модулем пружності E і коефіцієнтом Пуассона ν_0 відношенням

$$G_0 = \frac{E}{2(1+\nu_0)}$$

n – порядковий номер члена рядів;

ρ – відстань між центрами дротів.

Значення коефіцієнтів A і B , а також значень функцій $p(z)$ і $p_1(z)$ визначені як похідні залежно від ρ .

Беручи до уваги, що

$$\rho = \frac{h}{d+1}$$

і вводячи позначення

$$A_\phi = \frac{B_0\pi}{2\sqrt{3}};$$

$$B_\phi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \times [2p^{(6n+4)}(z) - p^{(6n+5)}(z) + p_1^{(6n+4)}(z)] - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{6n}}{(6n+1)} p^{(6n)}(z);$$

$$C_\phi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_{6n+4}}{(6n+5)} \times [2p^{(6n+4)}(z) + p^{(6n+5)}(z) - p_1^{(6n+4)}(z)] + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_{6n}}{(6n+1)} p^{(6n)}(z);$$

$$D_\phi = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4A_{6n+4}}{(6n+5)} p^{(6n+4)}(z);$$

вираз (1) можна представити у вигляді

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma_r}{M} &= \frac{A_\phi}{\left(1 + \frac{h}{d}\right)^2} + C_\phi; \\
 \frac{\sigma_\theta}{M} &= \frac{A_\phi}{\left(1 + \frac{h}{d}\right)^2} + B_\phi; \\
 \frac{\sigma_z}{M} &= 1 - \nu_0 \left[\frac{2A_\phi}{1 + \frac{h}{d}} - D_\phi \right],
 \end{aligned} \quad (2)$$

де $M = 2G_0\Delta\alpha \cdot \Delta T$ – узагальнений фізичний показник просочувального матеріалу.

Ліві частини виразу (2) приведені до вигляду приведених внутрішніх напружень. Такий вигляд виразів дає можливість оцінити вплив параметрів h і d двох дротів на внутрішні напруження, незалежно від фізико-механічних характеристик просочувального

матеріалу. Результати розрахунків коефіцієнтів A_ϕ , B_ϕ , C_ϕ , D_ϕ для точки A зображено на рис. 2.

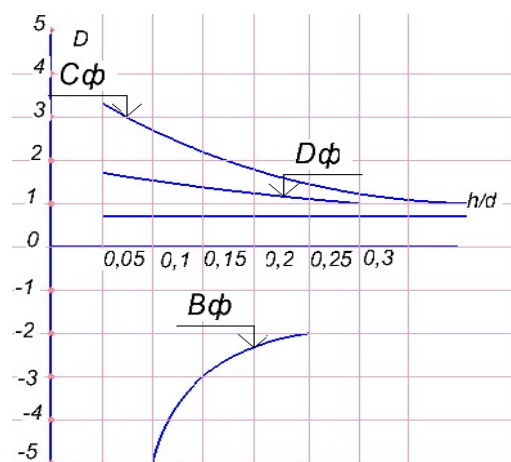


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів A_ϕ , B_ϕ , C_ϕ і D_ϕ від відносної товщини ізоляційного проміжку h/d

Розрахунок приведених внутрішніх напружень залежно від відношення h/d показує, що тангенціальні напруження σ_θ розтягу в

точці А за абсолютним значенням є найбільшими (рис. 3).

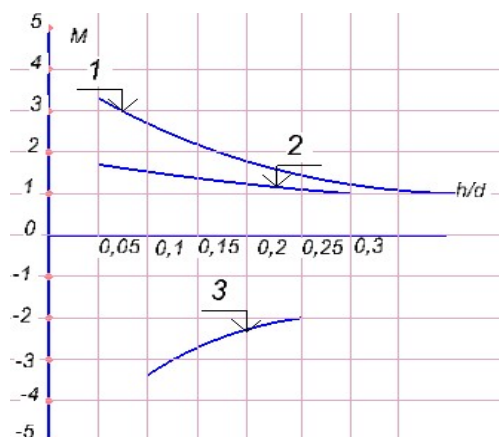


Рис. 3. Графіки залежності приведених значень внутрішніх напружень від відносної товщини ізоляційного проміжку h/d : 1 – тангенціальні напруження; 2 – осьові; 3 – радіальні

За допомогою формули Лагранжа отриману залежність приведених тангенціальних напружень від відношення h/d можна представити у вигляді

$$\frac{\sigma_{\theta}}{M} = \sigma_M = 13,20 \left(\frac{b}{d} \right)^2 - 13,54 \frac{h}{d} + 4,19. (3)$$

Після просочування обмотки зі зростанням товщини полімерної плівки на дроті, особливо при повному заповненні міжвиткового простору, внутрішні напруження збільшуються. В цьому випадку можна очікувати зниження терміну служби ізоляції, причому зниження буде тим більшим, чим товща та жорсткіша плівка. Найбільш напружені ділянки полімеру знаходяться в точках перетину лінії, що з'єднує центри сусідніх стержнів з поверхнею контакту полімер-стержень.

Напруження збільшується зі зменшенням віддалі між стержнями. Це пояснюється тим, що процес пошкодження міжвиткової ізоляції залежить від таких обмоткових параметрів, як коефіцієнт заповнення паза, діаметр дроту і товщина емалі. Основними процесами, які визначають кінетику старіння, є ті, що відбуваються не в об'ємі полімеру, а на границі фаз дріт-емаль. В цьому випадку найбільш важливою і визначальною характеристикою є адгезія.

При пошкодженні під полімерну плівку швидко проникає повітря і пари води, а це призводить до інтенсивності процесу старіння ізоляції. Без сумніву, втрата плівкової емалі є

одним із факторів, що прискорює процес пошкодження ізоляції обмотки. Але він не може бути єдиною причиною пробою низьковольтної міжвиткової ізоляції, тому що для цього необхідна наявність у ній дефектів. Порушення механічної цілісності ізоляції створює додаткові процеси, які погіршують її експлуатаційні характеристики, що призводить до пробою. В деяких випадках після просочування обмоток на поверхні полімеру виникає щільний окисний шар, який перешкоджає дифузії кисню і уповільнює швидкість старіння ізоляції, служить захисною оболонкою. Якщо після досягнення визначеної товщини або після періоду старіння цей шар розтріскується, в ізоляцію полегшується проникнення агресивного середовища і кисню, в результаті чого швидкість старіння збільшується. Після утворення тріщин всередину обмотки потрапляє волога, яка може суттєво знизити пробивну напругу ізоляції. Чим нижче значення адгезійної міцності на межі плівок ізоляції дроту і просочувального матеріалу, тим вищий термін служби ізоляції. В електричних машинах, які піддаються значним механічним навантаженням, низький рівень адгезійної міцності просочувального матеріалу до емальованого дроту може спричинити втрату цементації витків і відповідно зміну конструктивної форми обмотки.

Деякі просочувальні матеріали знижують термін служби ізоляції при порівняно низьких температурах, але підвищують його при більш високих температурах. Така поведінка систем може бути пов'язана з впливом дифузійних процесів, а також зі зміною фізичного стану матеріалів при високій випробувальній температурі. Це має бути враховано при виборі випробувальних напруг. У деяких наукових працях відображено, що перевищення випробувальної температури над робочою більш ніж 20°C може призвести до зміни механізму старіння.

При перегріві плівка емалі переходить в високоеластичний стан, що полегшує її продавлювання на дротах, які дотикаються і перекрещуються.

В процесі просочування і сушіння обмотки емаль дроту по всій поверхні контактує з просочувальним матеріалом, який знаходиться в рідкому стані при підвищеній температурі. Внаслідок взаємодії розчинників і реакційноздатних компонентів просочувальних матеріалів може відбуватися пом'якшення

і набування емалі, створювання в ній дефектів, які призводять до послаблення ізоляції.

Вплив розчинника посилюється при підвищенні температури і залежить від механічних напружень у плівці емалі, що викликані розтягом при намотуванні, а також у місцях згину дрітків.

Висновки. На основі отриманих результатів дослідження встановлено, що:

1. Процес пошкодження ізоляції значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів і їх адгезії один до одного, а також від геометричних параметрів ізоляції.

2. Вплив коефіцієнта міцності просочувального матеріалу при розтягу найбільшою мірою проявляється при значеннях міцності 60-80 МПа.

3. У процесі теплового старіння в перші 1000 год вірогідність розтріскування жорстких компаундів змінюється на два-три порядки, а при подальшому старінні до 10000 год. вона знижується у зв'язку зі зменшенням коефіцієнта міцності внаслідок термостабілізації структури полімеру.

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. Галущко, 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. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Т. А. Петров. – Челябинск, 1983. – 24 с.
9. Манько В. М. Універсальний стенд діагностування та випробування електричних машин / В. М. Манько // Автошляховик України. – Вип. 2. – Київ, 2001. – 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.
11. Томашівський В. М. Моделювання систем / В. М. Томашівський. – К.: Видав. група BHV, 2005. – 352 с.

References

1. Chehman, Ya. 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) Reliability of engineering. The terms and definitions. [Effective as of 01.01.1996]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 96 p. [in Ukrainian].
3. DSTU 3433-96 (1997) Models of failures. Fundamentals [Effective as of 01.01.1999]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 98 p. [in Ukrainian].
4. Vaneyev, B. N. (1983) The reliability of induction motors. Kiev: 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*, (5), pp. 52–54 [in Russian].
6. Korchemnyj, N. A. and Mashevskij, V. P. (1988) The increase of electrical equipment reliability in agriculture. Kiev: Urozhaj, 176 p. [in Russian].
7. Galushko, A. I., Maksimova, I. S., Osnach, R. G. and Khazanovsky, P. M. (1979) The reliability of electrical machines isolation. Moscow: Energiya, 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 for PhD in Engineering. Chelyabinsk, 24 p. [in Russian].
9. Man'ko, V. M. (2001) Universal stand for diagnosing and testing of electrical machines.

- Avtoshljahovyk Ukrainy*, (2), Kyiv, pp. 48–53 [in Ukrainian].
10. Kostynjuk, L. D., Moroz, V. I. and Paranchuk, Ya. S. (2004) Modeling of electric drives. L'viv: Nats. un-t «L'vivs'ka politehnika», 404 p. [in Ukrainian].
11. Tomashyvs'kyj, V. M. (2005) Systems simulation. Kyiv: Vydav. grupa BHV, 352 p. [in Ukrainian].

V. M. Manko, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: mankovm@ukr.net

V. M. Zotov, *postgraduate student*
e-mail: zotov_vetal@ukr.net

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

CONSTRUCTION AND STUDY OF PHYSICAL MODEL OF STATOR WINDING INSULATION IN ELECTRICAL MACHINES OF PRINTING COMPLEXES

Approximately 70 percent of generated electricity is transformed into mechanical one with the help of electric motors. Therefore, even a slight improvement of energy performance of induction motors in some measure helps to solve the problems not only of reduction of energy consumption but also of energy conservation and environment safety.

The aim of the work consists in the construction and study of physical model of stator winding insulation with the determination of internal stresses in electric machines. When constructing a physical model of winding insulation only its main parameters and features should be taken. Constructed physical model allows to determine internal stress between two adjacent wires on the line connecting their centers. Voltage increases with decreasing of distance between the rods. This is because the process of winding insulation damage depends on such parameters as the factor of groove filling, wire diameter and enamel thickness. When being damaged the air and water vapor quickly penetrate under a polymer film, and this leads to the intensity of the process of insulation aging. The loss of film enamel adhesion to the wire is one of the factors that accelerates the process of winding insulation damage. Violation of mechanical integrity of the insulation creates additional processes that impair its performance, leading to breach. The influence of the strength ratio of impregnating material under a tension to the greatest extent manifests itself in the values of strength of 60-80 MPa.

Keywords: inter-turn insulation, enamel film, polymer, adhesion, breakdown voltage, internal voltage.

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