

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

ПРИНЦИПИ ПРОГНОЗУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ОПОРУ СИСТЕМ ІЗОЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН ТА КОМПЛЕКСІВ

У статті запропоновано математичну модель визначення параметрів розподілу пробивної напруги та імовірності безвідмовної роботи системи ізоляції електричних машин поліграфічних комплексів. Проведено аналіз зміни опору ізоляції залежно від умов навколишнього середовища та навантаження електропривода поліграфічних машин.

Ключові слова: надійність, електродвигун, ізоляція, електропривід, пробивна напруга, полімерні матеріали.

Вступ. Однією з основних задач при вивченні надійності систем електричної ізоляції і при розробці методів прогнозування надійності є створення математичних моделей, адекватних імовірним процесам функціонування досліджуваної системи ізоляції.

Математична модель надійності – це математичний вираз, який пов'язує значення фізичних параметрів системи діючих навантажень та імовірність безвідмовної роботи системи. Відомо, що математична модель відображає тільки ступінь нашого пізнання діючого механізму функціонування системи, тому математична модель є лише деяким наближенням до досліджуваного процесу. Процес розробки математичної моделі полягає не тільки в теоретичній розробці будь-якої гіпотези про реальну поведінку об'єкта, а й у постійній перевірці відповідності прийнятої гіпотези і наявності статистичних даних, отриманих в результаті проведення дослідів [1, 3, 4].

Систему ізоляції з точки зору надійності необхідно представити як систему, що складається із послідовно з'єднаних елементів. Як елемент можна розглядати визначену довжину міжвиткової ізоляції, елементарну площину корпусної ізоляції та ін. Такий елемент в початковому стані буде мати деяке розподілення ймовірностей пробивної напруги, що залежить від застосованих матеріалів, техно-

логії [5, 6]. В процесі експлуатації системи ізоляції під дією зовнішніх факторів і навантаження розподілення ймовірностей пробивної напруги елемента буде змінюватись. Прикладена до системи ізоляції напруга також має деяке розподілення ймовірностей, практично вона не буде змінюватись при експлуатації системи ізоляції [2, 7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки ряд дослідників, що займалися математичним моделюванням надійності систем ізоляції електричних машин, застосовуючи принцип «чорного ящика», вирішили такі задачі:

1. Порівняння матеріалів, що застосовуються в системі ізоляції. Системи ізоляції, виготовлені з різних матеріалів, мають різну ймовірність безвідмовної роботи, тому можуть порівнюватися з допомогою кількісної характеристики;

2. Можна також порівнювати і технологічні процеси виготовлення систем ізоляції, тому що при різній технології створюється і різна дефектність елементарних ділянок;

3. На основі аналітичної залежності ймовірності безвідмовної роботи системи ізоляції від часу можна розробити методи прискорених випробувань;

4. При відомому розподіленні прикладених напруг можна оцінити кількісну придат-

ність системи ізоляції для використання в кожному конкретному електрообладнанні.

Крім зазначених переваг моделей, побудованих на принципі «чорного ящика», вони мають і деякі недоліки. Одним із недоліків є те, що параметром, який визначає надійність системи ізоляції, вибрано пробивну напругу, яка є деякою інтегральною характеристикою матеріалу. Визначення розподілення пробивної напруги з необхідною точністю є досить складною і трудомісткою задачею, яка пов'язана з використанням великої кількості зразків. Оскільки відсутні методи обліку, експеримент з визначення розподілу пробивної напруги слід проводити на діючих зразках, а це незручно [5, 6, 7].

Постановка завдання дослідження: встановити залежність параметрів розподілу пробивної напруги від часу дії експлуатаційних факторів. Ця залежність може бути записана у вигляді полінома. Знаючи цю формулу, можна визначити параметри розподілу пробивної напруги в будь-який момент часу, а це означає, що за допомогою математичної моделі можна розрахувати і ймовірність безвідмовної роботи системи ізоляції в той же момент часу. Цей шлях може бути застосований для тих систем ізоляції, які дозволяють накопичити достатній експериментальний матеріал.

Мета роботи: побудувати математичну модель визначення параметрів розподілу пробивної напруги та ймовірності безвідмовної роботи системи ізоляції залежно від навантаження та умов навколишнього середовища електродвигунів поліграфічних комплексів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Позначимо через $U(t)$ пробивну напругу в момент часу t . Зміна $U(t)$ в часі обумовлюється як зовнішнім фактором, так і фізичними процесами, що проходять у самій системі ізоляції. Також реалізація $U(t)$ залежить від початкового стану системи ізоляції, наприклад від технології виготовлення.

Введемо припущення, що залежність пробивної напруги від часу лінійна, тоді:

$$U(t) = \alpha t + \beta. \quad (1)$$

Для кожного елемента зміна $U(t)$ має не випадковий характер. Випадковість у зміні $U(t)$ полягає в тому, що коефіцієнт α в рівнянні (1) є випадковою величиною, що визнача-

ється початковим станом елемента, а це означає, що α є швидкістю зміни $U(t)$:

$$\alpha = \frac{dU(t)}{dt} = \varphi(t). \quad (2)$$

Швидкість зміни параметра можна представити у вигляді

$$\varphi(t) = V(t)\rho(t), \quad (3)$$

де $V(t)$ – функція зміни часу;

$\rho(t)$ – випадковий процес.

Середнє значення процесу $\rho(t)$ є величиною постійною і дорівнює 1, $M\{\rho(t)\} = 1$.

При цьому математичне очікування швидкості $\varphi(t)$ задається рівнянням

$$M\{\varphi(t)\} = V(t). \quad (4)$$

Знос, що накопичується до моменту часу t , може бути записаний у вигляді $U(0) - U(t)$, де $U(0)$ – пробивна напруга в початковий момент часу. Він дорівнює інтегралу від швидкості зносу і може бути записаний у вигляді

$$U(0) - U(t) = \int_0^t \varphi(x) dx. \quad (5)$$

Математичне очікування зносу є інтегралом від математичного очікування швидкості зносу:

$$M\{U(0) - U(t)\} = \int_0^t M\{\varphi(x)\} dx = \int_0^t V(x) dx. \quad (6)$$

Якщо в $V(t)$ ввести постійні a і b , то $V(t) = \frac{a}{b+t}$, а математичне очікування зносу буде визначено рівністю

$$M\{U(0) - U(t)\} = a[\ln(b+t) - \ln b]. \quad (7)$$

Як видно із рівняння (7), знос в середньому зростає як логарифм часу, таке значення спостерігається і для систем ізоляції.

При врахуванні припущень, що середня швидкість зносу постійна, початкова якість елементів однакова, в цьому випадку можна показати, що час безвідмовної роботи буде мати гамма-розподіл

$$\varphi(\tau) = \frac{1}{\Gamma(r)} \lambda^r \tau^{r-1} e^{-\lambda\tau}, \quad (8)$$

де r і λ – постійні параметри;

$\Gamma(\tau)$ – гамма-функція, визначається за формулою

$$\Gamma(r) = \int_0^\infty x^{r-1} e^{-x} dx. \quad (9)$$

Якщо поетапне накопичення пошкоджень не є прямою причиною відмови, а приводить лише до збільшення її ймовірності, то час безвідмовної роботи розподілу за законом Вейбулла

$$\varphi(\tau) = e^{-\tau\gamma/\beta} \frac{\gamma}{\beta} \tau^{\gamma-1}, \quad (10)$$

де β і γ – постійні параметри.

Постійні параметри у формулах (8) і (10) визначаються в результаті експерименту.

Зміна опору ізоляції електричної машини в процесі роботи електроприводу проходить за експоненціальним законом:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R_{\text{уст.}}}{T_c} - \frac{R}{T_c}, \quad (11)$$

де $R_{\text{уст.}}$ – опір ізоляції асинхронного електродвигуна при повністю висушеній обмотці, МОм;

T_c – постійна часу зміни опору в процесі роботи електродвигуна під навантаженням, год.

Постійна часу T_c залежить від коефіцієнта завантаження електродвигуна, вологості і температури повітря. На рис. 1 при проведенні залежності T_c від вологості W при різних навантаженнях привода (для кривих групи I струм $I = 0,8I_H$; II струм $I = I_H$; III струм $I = 1,5I_H$) і температури повітря (для верхніх кривих в групах I, II, III $\theta = 0^\circ\text{C}$, середніх – 20°C і нижніх – 35°C) для асинхронних електродвигунів серій 4A(a) і 4AM(б).

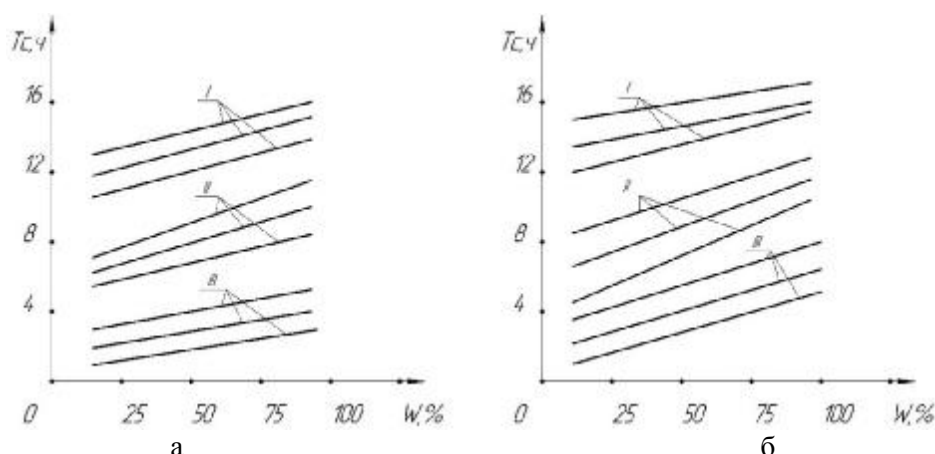


Рис. 1. Залежність постійного часу зміни опору ізоляції електродвигунів серій 4A(a), 4AM(б).
I-I = 0,8I_H; II-I = I_H; III-I = 1,5I_H

На поліграфічних виробництвах дуже різні завантаження електродвигунів, час їх роботи, температура і вологість навколишнього середовища. Щоб обґрунтувати періодичність і час сушіння ізоляції, необхідно вивчити вплив цих факторів при різних їх значеннях на зміну опору. Провести вимірювання опору ізоляції на діючому електрообладнанні недоцільно через велику тривалість дослідів і значних затрат праці.

Тому побудуємо математичну модель зміни опору ізоляції асинхронного електродвигуна серії 4AM.

$$\begin{bmatrix} U_{s\alpha} \\ U_{r\alpha} \\ U_{r\beta} \\ U_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s\alpha} + \frac{d}{dt} L_{s\alpha} & \frac{d}{dt} M \\ \frac{d}{dt} M & r_{r\alpha} + \frac{d}{dt} L_{r\alpha} \\ -M\omega_r & -L_{r\alpha}\omega_r \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_{r\beta} + \frac{d}{dt} L_{r\beta} \\ \frac{d}{dt} M \\ \frac{d}{dt} M & r_{r\beta} + \frac{d}{dt} L_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

рівняння електромагнітного моменту:

$$M_{\text{ел}} = M(i_{s\beta}i_{r\alpha} - i_{s\alpha}i_{r\beta}), \quad (13)$$

Для цього поєднаємо вирази (10) і (11) з математичними виразами, що описують електро-ромеханічні процеси в електроприводі поліграфічних машин та комплексів. Електричні машини всіх основних типів приводяться до узагальненої електричної машини (рис. 2). Тут $\omega_{s\alpha}$, $\omega_{s\beta}$ – кількість витків обмотки статора по осях α і β ; $\omega_{r\alpha}$, $\omega_{r\beta}$ – кількість витків обмотки ротора по осях α і β ; $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$, $U_{r\alpha}$, $U_{r\beta}$ – відповідно напруга по осях α і β на статорі і на роторі; ω_r – кутова швидкість ротора.

Для узагальненої електричної машини справедливі рівняння напруги:

рівняння руху:

$$\int \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_c = M_{\text{ел}} \quad (14)$$

В цих рівняннях $U_{s\alpha}$, $U_{s\beta}$, $U_{r\alpha}$, $U_{r\beta}$, $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ – відповідно напруга і струм в обмотках статора і ротора по осях α і β ; $r_{s\alpha}$, $r_{s\beta}$, $r_{r\alpha}$, $r_{r\beta}$ – активний опір обмоток статора і ротора; M – взаємна індуктивність; $L_{s\alpha}$, $L_{s\beta}$, $L_{r\alpha}$, $L_{r\beta}$ – індуктивність обмоток статора і ротора по осях α і β .

В електричних машинах момент опору M_c є зазвичай постійним, в електромеханічних системах – змінюється в часі. Системи рівнянь електричних машин відрізняються від систем рівнянь інших електротехнічних пристроїв наявністю рівняння електромагнітного моменту $M_{ел}$.

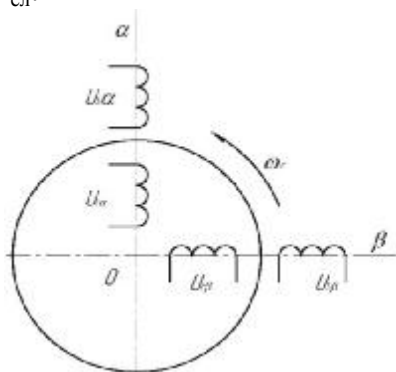


Рис. 2. Просторова модель узагальненої електричної машини

Отже, при поєднанні виразів (10), (11), (12) отримуємо систему рівнянь у диференціальній формі:

$$\begin{aligned}
 PS &= \frac{1}{T_{ел}} M_c - \frac{1}{T_{ел}} M_2; \\
 M_2 &= \frac{60}{2\pi n_1} \cdot \frac{1}{1-S} P_2; \\
 P_2 &= P_{ем} - P_{M2} - P_{Mx} - P_d; \\
 P_{M2} &= SP_{ем}; \\
 P_{M1} &= \frac{R_1}{R_2} P_{M2}; \\
 PM &= 2M_K \omega_1 S - S_K \omega_1 M; \\
 P_{ем} &= M \frac{2\pi n_1}{60}; \quad T_e = \varphi(I, W, Q); \\
 \frac{dR}{dt} &= \frac{R_{уст}}{T_c} - \frac{R}{T_c} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{R}{T_y}; \\
 T_{ем} &= \omega_1 j_{пр}; \quad R_1 = \left(1 + \frac{x_1}{x_0}\right) r_1; \\
 R_2 &= \left(1 + \frac{x_1}{x_0}\right)^2 r_2; \quad I_1 = \varphi(P_{M1}),
 \end{aligned} \quad (15)$$

де M_c – момент опору, Нм; P_2 – потужність, Вт; M_2 – момент опору, Нм, на валу електродвигуна; $P_{ем}$ – електромагнітна потужність,

Вт; M – момент електродвигуна, Нм; S – магнітне ковзання електродвигуна; I_1 – сила струму електродвигуна, А; P_{Mx} і P_d – механічні і додаткові втрати в електродвигуні, Вт; P_{M1} і P_{M2} – втрати в міді статора і ротора, Вт; ω_1 – кутова швидкість обертання поля, рад/с; n_1 – синхронна частота обертання двигуна, хв^{-1} ; $j_{пр}$ – приведений до валу двигуна момент інерції привода, $\text{Н}^{\text{м}}/\text{с}^2$; M_K – критичний момент двигуна, Нм; r_1 і r_2 – активний опір обмотки ротора і приведений опір обмотки статора, Ом; x_1 і x_0 – індуктивні опори розсіювання статора і взаємодукції, Ом.

Розв'язок цієї системи рівнянь при заданих значеннях навантаження, часу роботи електроприводу на добу, параметрах мікроклімату дозволяє встановити характер зміни опору ізоляції двигуна даного виконання.

Імовірність пробивної напруги міжвиткової ізоляції розподілена за законом розподілення мінімальної кількості із більшої кількості незалежних випадкових величин розподілення Вейбулла. Для проведення розрахунку надійності міжвиткової ізоляції обмоток потрібно знати закон розподілення ймовірностей пробивних напруг у будь-який момент часу. Якщо прийняти припущення, що цей закон в процесі експлуатації не змінюється, а змінюються його параметри, то необхідно визначити функції $U_0 = f(t)$ при заданих умовах експлуатації. Наближено їх можна визначити шляхом проведення багатофакторного експерименту. Для цього досліджують вплив температури обмоток електродвигуна, частоти пусків, рівень вібрації, кількість годин роботи на добу. При побудові моделі надійності системи ізоляції бажано враховувати фізичні властивості полімерних матеріалів. Полімерні матеріали в конструкції піддаються статичним і динамічним механічним навантаженням.

З урахуванням характеру деформації полімери можуть бути умовно розділені на три групи:

- 1) жорсткі полімери, що проявляють малі деформації і мають великий модуль пружності;
- 2) еластичні полімери, здатні до дуже великих зворотних деформацій;
- 3) полімери, що виявляють текучість при дії зовнішніх сил.

Руйнування полімерів являє собою процес, що розвивається в часі. Воно пов'язане з

розривом ланцюгових макромолекул по хімічних зв'язках. Механічні навантаження скорочують термін служби полімерних матеріалів. Тому розвантаження полімерів у конструкціях, раціональне конструювання систем електричної ізоляції мають велике значення в підвищенні якості ізоляції. Ця різниця в довговічності навантажених і ненавантажених полімерів повинна враховуватись і при розробці методів випробувань.

Досвід експлуатації показує, що робоздатність ізоляції у виробі значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів. Більше того, якщо електричні навантаження діють на електричну ізоляцію тільки в період роботи виробу, то механічні навантаження і, в першу чергу, внутрішні напруження діють на ізоляцію як у період роботи виробу, так і в період відключення від мережі. Вони виникають у полімерних матеріалах у процесі виготовлення виробу і діють у ньому протягом його існування, в тому числі під час транспортування, зберігання та монтажу.

Недооцінка важливості внутрішніх напружень і недостатнє урахування механічних навантажень на полімерні матеріали в конструкціях призводять до погіршення експлуатаційних властивостей ізоляції, зниження її надійності.

Для оцінювання деформаційних властивостей полімерних матеріалів необхідно знати рівноважний модуль пружності (модуль Юнга) і коефіцієнт поперечної деформації (коефіцієнт Пуассона).

Зносостійкі властивості оцінюються по короткочасній границі міцності і характеризуються температурно-часовою залежністю.

Висновки. На основі отриманих результатів дослідження встановлено, що:

1. Побудована математична модель дає можливість спрогнозувати та визначити параметри розподілу величин пробивної напруги залежно від зміни стану опору ізоляції електричних машин поліграфічних комплексів, що на 20 % зменшує терміни проведення сушіння ізоляції.

2. Встановлена залежність зміни стану опору ізоляції електричних машин від умов навколишнього середовища та навантаження привода поліграфічних машин: при збільшен-

ні вологості на 25 % стан ізоляції погіршується на 10 %.

3. Застосування цього методу при конструюванні та дослідженні систем електричної ізоляції дозволяє більш правильно вибрати електроізоляційні матеріали для використання в конкретних системах ізоляції різних типів виконання електродвигунів.

Список літератури

1. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення. – [Чинний від 01-01-1996]. – К. : Держспоживстандарт України, 1994. – 96 с.
2. ДСТУ 3433-96 Моделі відмов. Основні положення. – [Чинний від 01-01-1999]. – К. : Держспоживстандарт України, 1997. – 98 с.
3. Ванев Б. Н. Надежность асинхронных электродвигателей. – К. : Техника, 1983. – 142 с.
4. 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.
5. Петров Т. А. Обоснование периодичности технического обслуживания и ремонта электродвигателей с учетом их эксплуатационной надежности : автореф. дис. к.т.н. / Т. А. Петров. – Челябинск, 1983. – 24 с.
6. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2001. – 327 с.
7. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем / А. Г. Ивахненко. – К. : Высшая школа, 1987. – 63 с.
8. Манько В. М. Універсальний стенд діагностування та випробування електричних машин / В. М. Манько // Автошляховик України. – Вип. 2. – Київ, 2001. – С. 48–53.
9. Костинюк Л. Д. Моделювання електроприводів / Л. Д. Костинюк, В. І. Мороз, Я. С. Паранчук. – Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
10. Томашівський В. М. Моделювання систем / В. М. Томашівський. – К. : Видав. група ВНУ, 2005. – 352 с.
11. Корчемный Н. А. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве

- / Н. А. Корчемный, В. П. Машевский. – К. : Урожай, 1988. – 176 с.
12. Друкарське устаткування : підручник / Я. І. Чехман, В. Т. Сенкус, В. П. Дідич, В. О. Босак. – Львів : УАД, 2005. – 468 с.

References

1. DSTU 2860-94 (1994), Engineering reliability. The terms and definitions [Effective as of 01.01.1996]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 96 p. [in Ukrainian].
2. DSTU 3433-96 (1997), Models of failures. Substantive provisions [Effective as of 01.01.1999]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 98 p. [in Ukrainian].
3. Vaneev, B. N. (1983), The reliability of induction motors. Kiev: Tehnika, 142 p. [in Russian].
4. Gorbunov, A. P., Gol'dberg, O. D. and Irtyshskij, Je. B. (1984), An integrated approach to assessing the reliability of electrical machines. *Elektrichestvo*, (5), pp. 52–54 [in Russian].
5. Petrov, T. A. (1983), Justification of the frequency of maintenance and repair of electric motors with regard to their operational reliability: avtoref. dis. k.t.n. Cheljabinsk, 24 p. [in Russian].
6. Kopylov, I. P. (2001), Mathematic modeling of electric motors. Moscow: Vysshaja shkola, 327 p. [in Russian].
7. Ivahnenko, A. G. (1987), Modeling of complex systems. Kiev: Vysshaja shkola, 63 p. [in Russian].
8. Man'ko, V. M. (2001), Universal stand for diagnosing and testing of electric machines. *Avtoshlyahovyk Ukrayiny*, (2), Kyiv, pp. 48–53 [in Ukrainian].
9. Kostynyuk, L. D., Moroz, V. I. and Paranchuk, Ja. S. (2004), Modeling of electric drives. L'viv: Nats. un-t «L'vivs'ka politehnika», 404 p. [in Ukrainian].
10. Tomashyvs'kyi, V. M. (2005), Systems modeling. Kyiv: Vydav. grupa BHV, 352 p. [in Ukrainian].
11. Korchemnyy, N. A. and Mashevskyy, V. P. (1988), Improvement of electrical equipment reliability in agriculture. Kiev: Urozhaj, 176 p. [in Russian].
12. Chehman, Ja. I., Senkus', V. T., Didych, V. P. and Bosak, V. O. (2005), Printing equipment. L'viv, 468 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

PRINCIPLES OF FORECASTING AND MATHEMATICAL MODELING OF THE CHANGE OF RESISTANCE OF INSULATION SYSTEMS IN ELECTRIC MOTORS OF PRINTING MACHINES AND COMPLEXES

The creation of mathematical models adequate to the probable processes of functioning of the investigated insulation system is one of the main tasks when studying the reliability of electrical insulation systems and at developing the methods for predicting the reliability. Mathematical model reflects only the degree of our knowledge of the existing mechanism of system functioning, so it is only some approximation to the investigated process. The process of developing a mathematical model lies not only in theoretical development of any hypotheses about the actual behavior of the object, but in a constant verification of the conformity of adopted hypothesis and the availability of statistical data obtained by conducting experiments.

The paper proposes a mathematical model to determine the distribution of the breakdown voltage and the reliability function of the insulation system of electrical machines printing systems. Operating experience has shown that the insulation performance of the product largely depends on physical-mechanical properties of polymeric materials. Moreover, if electrical loads operate on electrical

insulation only within the period of performance of the product, mechanical loads and, firstly, internal voltage act on the insulation both in the period of operation and disconnecting from the network. They occur in polymeric materials during the process of product manufacturing and act in it throughout its existence, including the periods of transportation, storage and installation.

Underestimation of the importance of internal stresses and insufficient consideration of mechanical loads on polymer materials in constructions lead to deterioration of operational properties of the insulation, reducing its reliability. Wear resistant properties are measured by short-term tensile strength and are characterized by time-temperature dependence. Destruction of polymers is a process developing in time. It is associated with rupture of the chain of macromolecules by chemical bonds. Mechanical loads reduce the service life of polymeric materials, therefore, unloading of polymers in the structures, rational design of electrical insulation systems are of great importance in improving the quality of the insulation.

The analysis of changes in insulation resistance depending on the ambient conditions and the load of the drive of printing machines and complexes is made.

Keywords: *reliability, electric motor, insulation, electric drive, breakdown voltage, polymeric materials.*

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