

**В. М. Манько**, к.т.н., доцент,

**В. М. Зотов**, аспірант

Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна  
[zotov\\_vetal@ukr.net](mailto:zotov_vetal@ukr.net), [mankovm@ukr.net](mailto:mankovm@ukr.net)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЬ ІЗОЛЯЦІЇ СТАТОРНИХ ОБМОТОК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПОЛІГРАФІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

*У статті запропоновано способи підвищення надійності роботи електричних машин поліграфічних комплексів за рахунок контролю опору ізоляції їх статорних обмоток. Розроблено математичну модель визначення опору ізоляції обмоток без проведення вимірювання, що значно скорочує терміни проведення регламентних робіт електрообладнання. Проведено аналіз зміни опору ізоляції при різних режимах роботи електроприводу.*

**Ключові слова:** надійність, електродвигун, ізоляція обмотки, електропривод, міжвиткові замикання, температура обмотки.

**Вступ.** Для приводу поліграфічних машин та комплексів широко використовують асинхронні короткозамкнуті електродвигуни серій 4А, 4АМ. Найбільш характерними режимами роботи електродвигунів є подовжений ( $S_1$ ), короткочасний ( $S_2$ ) і повторно-короткочасний ( $S_3$ ). Аналіз використання електродвигунів показує, що близько 50 % їх завантажені наполовину, з номінальним навантаженням працюють близько 10 %, а з перевантаженням – 8 % [1, 4].

Короткочасний режим роботи і низька завантаженість електродвигунів негативно впливають на ізоляцію обмоток. Вона пошкоджується, зволожується, знижується її опір, зношуються підшипникові вузли, підгорають контакти в клемній коробці [1, 4].

Численні дослідження показують, що обмотка статора є однією з найслабших складових електричного двигуна, її надійність в основному визначається надійністю ізоляції. На частку ізоляції припадає 80 % відмов електрообладнання. Основною характеристикою ізоляції електротехнічних виробів є їх електрична міцність, яка залежно від умов експлуатації і виду виробу визначається механічною міцністю [4–6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При визначенні показників надійності електродвигунів необхідно знати закони розподілу їх термінів служби. З цією метою опрацьовані дані щодо терміну служби електродвигунів більш як на 15 поліграфічних підприємствах Черкаської області.

В результаті обробки дослідних даних встановлено, що розподіл вірогідності часу безвідмовної роботи електродвигунів серій

4А, 4АМ відповідає теоретичним розподіленням Вейбулла [4–6].

Дослідження причин відмов електродвигунів показує, що розподіл пошкоджень по окремих частинах асинхронних електродвигунів змінюється залежно від умов експлуатації, але найбільше відмов пов'язано з виходом із ладу обмоток статора (60 %) і підшипникових вузлів (13 %). Основною причиною відмов у період напрацювання є виткове замикання: міжвиткове замикання – 90 %; пошкодження міжфазної ізоляції – 5 %; пошкодження пазової ізоляції – 5 % [7].

Пристрої захисту електродвигунів не забезпечують відключення їх від мережі при виникненні міжвиткових замикань під час їх утворення. Електродвигуни з таким дефектом відключаються внаслідок підвищення температури обмоток або при переході міжвиткового замикання в міжфазне і замикання на корпус, що призводить до значних пошкоджень електричної машини.

Теплове старіння ізоляції є одним із основних факторів, що зменшує термін служби обмотки. Чим більший ресурс машини, тим більшу роль у процесі старіння і зносу ізоляції відіграють теплові дії. З точки зору нагріву ізоляції велике значення мають величина і час проходження струмів, які перевищують номінальні значення. Перегрів обмоток виникає при заклинюванні робочого механізму, перевантаженні, роботі в однофазному режимі, зниженій напрузі, погіршеному охолодженні, високій частоті включення та затяжному пуску.

**Постановка задачі дослідження.** Теорія надійності вивчає загальні закономірності,

які слід враховувати при проектуванні, виготовленні та експлуатації електротехнічних об'єктів для максимальної ефективності їх використання. Методи математичної статистики і теорії вірогідності дозволяють оцінити показники надійності, виходячи з результатів випробувань об'єкта або спостережень за ним. На основі цього слід провести дослідження зміни опору ізоляції статорних обмоток електричних машин поліграфічних комплексів залежно від режимів роботи електроприводу.

**Метою** роботи є визначення та контроль опору ізоляції статорних обмоток електричних машин при різних режимах роботи електроприводу поліграфічних комплексів.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

#### 1. Пуск електродвигуна

Нагрів короткозамкнутого електродвигуна при пуску залежить від значення пускового струму і часу розгону, що визначається із рівняння руху електроприводу [4]:

$$t_p = \int_0^{w_k} \frac{j dw}{M_{\text{об}} - M_c}, \quad (1)$$

де  $j$  – зведений момент інерції електроприводу;

$w_k$  – кінцева швидкість електродвигуна;

$M_{\text{об}}$  – момент електродвигуна;

$M_c$  – момент опору робочої машини.

Підвищення температури в кінці розгону

$$Q_K = 0,81 \cdot K_i^2 \cdot t_p \cdot \frac{\rho}{v \cdot c_M} \cdot i_s^2, \quad (2)$$

де  $v = 8,93$  – питома вага міді, г/см<sup>3</sup>;

$c_M = 393$  – питома теплоємність міді, Вт·с/С·кг;

$\rho = 0,0172$  – питомий опір міді, Ом·мм/м;

$K_i = 6-7$  кратність пускового струму.

Після підстановки числових значень отримаємо:

$$Q_K = (3,6-7)t_p. \quad (3)$$

Швидкість зростання температури

$$V_K = \frac{Q_K}{t_p} = (3,6-7)^\circ \text{C}. \quad (4)$$

Тому при пуску на номінальній напрузі обмотка електродвигуна через 10-15 с нагрівається до допустимого значення. При подальшому проходженні пускового струму може бути перегрів і обгорання ізоляції.

При пуску на зниженій напрузі

$$Q_K = V_K \cdot U_1^2 \cdot t_p, \quad (5)$$

де  $U_1 = \frac{U}{U_H}$ ,  $U_1$  – діюча напруга,  $U_H$  – номінальна напруга на затискачах електродвигуна.

Допустимий час пуску електроприводу можна визначити за формулою

$$t_p = \frac{Q_K}{V_K}. \quad (6)$$

Із технічних характеристик електродвигунів серії 4АМ  $V_K = 6-10\% \text{ }^\circ\text{C/с}$ .

Значення допустимого збільшення температури електродвигуна над температурою зовнішнього середовища становить +40°C залежно від класу нагрівостійкості ізоляції [4].

#### 2. Заклинювання робочого органу поліграфічної машини

При заклинюванні робочого органу по обмотках електродвигуна проходять пускові струми, які перевищують у 6-7 разів номінальні значення. Через кілька секунд температура обмотки досягає небезпечного для ізоляції значення, виникають процеси теплового старіння електроізоляційних матеріалів, а саме:

1) виділення низькомолекулярних летких речовин;

2) окиснення, що викликає появу крихкості матеріалу;

3) розвиток процесу полімеризації молекул, що призводить до зниження еластичності та хрупкості матеріалу і пошкодження його під дією механічних зусиль;

4) гідролітична деструкція за рахунок взаємодії залишкової вологи з електроізоляційними матеріалами під дією тепла;

5) хімічний розпад компонентів з утворенням хімічно активних речовин.

Виходячи з цього, електродвигун потрібно негайно відключити від мережі.

#### 3. Перевантаження електроприводу

Такий режим характерний збільшенням змінних витрат і різким підвищенням температури обмотки. Величина встановленого значення перевищення температури обмотки залежить від величини перевантаження. Допустимий час перевантаження визначають за формулою

$$\frac{t_{II}}{T} = \ln \frac{K_{II}^2 + 2K_{II}}{K_{II}^2 + 2K_{II} - 0,1}, \quad (7)$$

де  $T$  – стала часу нагріву електродвигуна, с;

$K_{II} = \frac{P_{II}}{P_H}$ ,  $P_H$  – номінальна потужність

електродвигуна, кВт;

$P_I$  – навантаження електродвигуна, кВт.

З точки зору впливу перевантаження на ізоляцію їх поділяють на невеликі (до 50 %) і великі (більше 50 %).

Невеликі перевантаження проявляються поступово, а при більших ізоляція швидко пошкоджується під дією високої температури. Таким чином, кожному значенню перевантаження відповідає час, протягом якого воно безпечно для ізоляції.

При з'єднанні обмотки в зірку і обриві фази С напруга на фазах А і В під час пуску буде

$$U_{AO} = U_{BO} = \frac{U_{AB}}{2}. \quad (8)$$

Пусковий струм фази А в однофазному режимі

$$I_{1\phi} = \frac{U_{AB}}{Z_A + Z_B} = \frac{U_{AB}}{2Z_A}. \quad (9)$$

При пуску в трифазному режимі

$$I_{3\phi} = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}Z_A}. \quad (10)$$

При обриві фази під час роботи номінальною потужністю струм навантаження визначають за формулою

$$I_{1\phi} = \frac{P}{2U_{AO} \cdot \cos\varphi_1 \cdot \eta_1}, \quad (11)$$

а при роботі в трифазному режимі

$$I_{3\phi} = \frac{P}{3U_A \cdot \cos\varphi_3 \cdot \eta_3}, \quad (12)$$

де  $U_A$  – фазна напруга мережі, В;

$U_{AO}$  – напруга фази А в однофазному режимі, В;

$\cos\varphi_1$ ,  $\cos\varphi_3$  – коефіцієнт потужності відповідно при однофазному і трифазному режимах.

Із вищесказаного буде  $I_{1\phi} = 2I_{3\phi}$ . Якщо встановити, що  $I_{3\phi} = K_3 \cdot I_H$ , де  $I_H$  – коефіцієнт завантаження і номінальний струм електродвигуна, то  $I_{1\phi} = 2K_3 \cdot I_H$ .

Таким чином, небезпека однофазного режиму в процесі роботи електроприводу залежить від завантаження електродвигуна. При навантаженні  $0,5P_H$  пошкодження фази при з'єднанні обмоток двигуна в зірку не створює небезпечного для ізоляції обмотки підвищен-

ня струму. В той же час струм в одній із фазних обмоток дорівнює пусковому струму при роботі в трифазному режимі.

При пошкодженні фази в працюючому електродвигуні, обмотки якого з'єднані трикутником, фазний струм зростає в 2 рази, а лінійний – в 1,73 разу.

Таким чином, однофазні режими роботи створюють велику небезпеку для ізоляції обмоток.

4. Вплив зволоження ізоляції на надійність обмоток електродвигунів

У більшості випадків зволоження обмоток статора відбувається не тому, що електродвигун неправильно вибраний по виконанню захисту від навколишнього середовища або заливається в процесі ефекту «дихання». При зміні навантаження електроприводу змінюється його температура, що впливає на переміщення повітря із корпусу всередину електродвигуна. Під час «видиху» разом з повітрям видаляється частина вологи та забруднення, обумовлені старінням ізоляції обмотки. При зупинці електродвигуна його температура знижується, а повітря поступає всередину.

Концентрація вологи в електродвигуні практично дорівнює вологості навколишнього середовища. При цьому змінюються електричні властивості ізоляції: знижується об'ємний і поверхневий опір, зростають кут діелектричних витрат та діелектрична проникливість.

Під дією підвищеної вологості і електричної напруги на поверхні ізоляції утворюються струмопровідні канали. Між ділянками ізоляції, що знаходяться під різними електричними потенціалами, утворюється тонка струмопровідна плівка, по якій проходить порівняно невеликий струм, що її нагріває. Під дією струму плівка в окремих місцях висихає і на цих ділянках струм не проходить, а утворюється електрична дуга, яка обвуглює ізоляцію. В процесі експлуатації обвуглені ділянки з'єднуються між собою і утворюють струмопровідні канали, які можуть призвести до короткого замикання. Залежність опору ізоляції електричних машин від вологи і температури навколишнього середовища, яка отримана в результаті досліджень, у кліматичній камері по матриці планування експериментів є такою:

а) для електродвигунів серії 4А має вигляд:

$$\begin{aligned}
 R = & 316,759 + 0,02684t - 1,4530 - \\
 & - 4,0869W + 0,00054t^2 - 0,00276tQ - \\
 & - 0,000432tW - 0,00121Q^2 + \\
 & + 0,021QW + 0,03156W^2
 \end{aligned} \quad (13)$$

б) для електродвигунів серії 4AM

$$\begin{aligned}
 R = & 326,812 + 0,048t - 3,96Q - \\
 & - 6,088W + 0,125764t^2 - \\
 & - 0,000348tQ - 0,00476tW + \\
 & + 0,087Q^2 + 0,03248QW + 0,02638W^2
 \end{aligned} \quad (14)$$

де  $W$  – відносна вологість повітря, %;

$t$  – час знаходження електродвигуна в середовищі з заданими параметрами мікроклімату, год;

$Q$  – температура навколишнього середовища, °C;

$R$  – опір ізоляції обмоток, МОм.

В кліматичній камері змінюємо відносну вологість від 70 до 100 % і температуру від 0 до 50°C і стежимо за зміною опору ізоляції обмоток електродвигуна в часі при збереженні відомих параметрів мікроклімату навколишнього середовища.

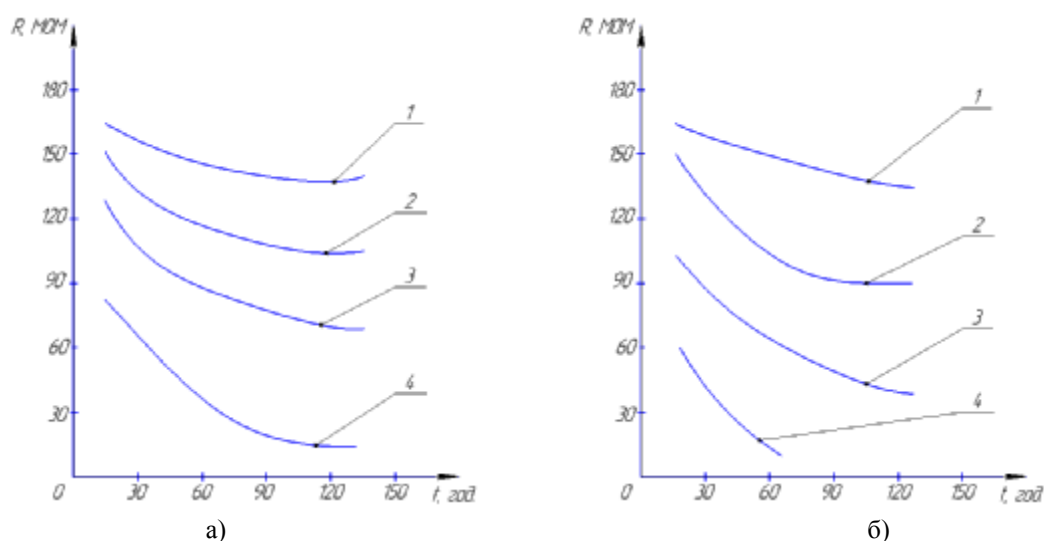


Рис. 1. Залежність опору ізоляції обмоток електродвигунів серії 4A(a) і 4AM(б) при температурі 30°C і різній вологості навколишнього середовища:

1 –  $W = 70\%$ ; 2 –  $W = 80\%$ ; 3 –  $W = 90\%$ ; 4 –  $W = 95\%$

Керуючись отриманими залежностями (рис.1), можна розрахувати зміну опору ізоляції електродвигунів при непрацюючому електроприводі і відомих параметрах мікроклімату навколишнього середовища. А це дає можливість не проводити вимірювання опору ізоляції, що економить час проведення регламентних робіт.

Опір ізоляції обмоток у часі під дією вологи змінюється за експоненціальним законом:

$$R = R_H^{-t/T_y}, \quad (15)$$

де  $R_H$  – початкове значення опору ізоляції, МОм;

$T_y$  – стала часу зміни опору при зволоженні, год.

Стала часу  $T_y$  залежить від температури і вологості повітря, а також виконання електродвигуна за ізоляцією і ступенем захищеності.

Згідно з експлуатаційними нормами електрообладнання ізоляція електродвигунів, що не працювали протягом 24 діб, підлягає сушінню.

А при роботі електроприводу під навантаженням струм сушить ізоляцію і її опір зростає (рис. 2). Зі збільшенням струму навантаження тривалість сушіння зменшується, а швидкість відновлення опору ізоляції зростає.

Зміна опору в процесі роботи електроприводу також здійснюється за експоненціальним законом:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R_{уст.}}{T_c} - \frac{R}{T_c}, \quad (16)$$

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

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

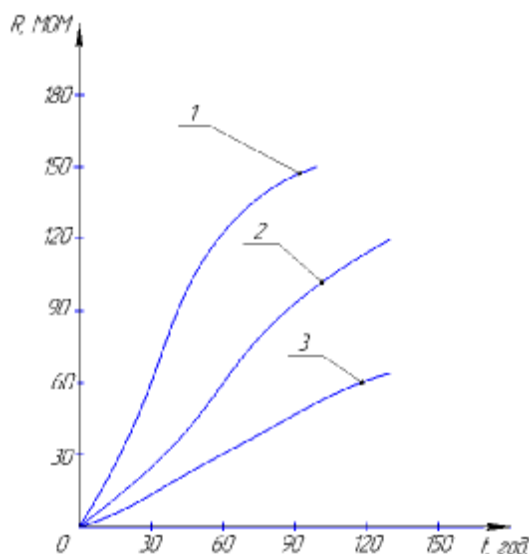


Рис. 2. Залежність опору ізоляції обмоток асинхронного електродвигуна серії 4АМ при  $W = 80 \%$ ,  $Q = 20^\circ\text{C}$  і при різних струмах навантаження: 1 –  $1,5 I_H$ ; 2 –  $I_H$ ; 3 –  $0,7 I_H$

Стала часу  $T_c$  залежить від коефіцієнта завантаження електродвигуна, вологості і температури навколишнього середовища.

Таким чином, ізоляція цих електродвигунів зволожується повільно через їх більш високу герметичність, але й сушиться в процесі роботи приводу під навантаженням також повільно. При однаковій тривалості роботи електроприводу на добу це якоюсь мірою

порівнює терміни зменшення опору ізоляції електродвигунів різних серій до допустимої нижньої границі.

На рис. 3 зображені криві зміни опору для електродвигуна 4АМ при працюючому й непрацюючому електроприводі, отримані за допомогою фізичної (крива 1) і математичної (крива 2) моделей.

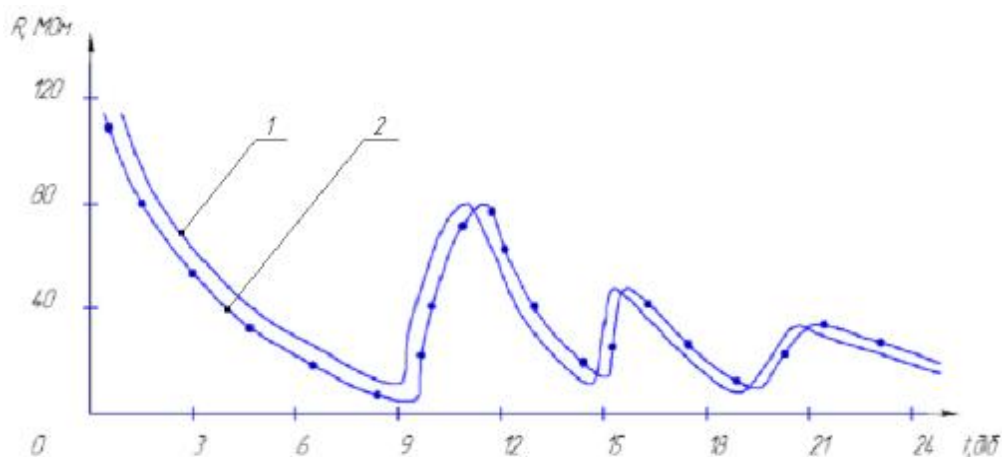


Рис. 3. Криві зміни опору ізоляції електродвигуна серії 4АМ, отримані за допомогою фізичної (крива 1) і математичної (крива 2) моделей

Дослідження проводилось з урахуванням того, що привід працював 6 годин на добу. Максимальна похибка відтворення процесів на математичній моделі становить 8%. Задаючи в математичній моделі різне навантаження електроприводу і тривалість його роботи на добу, отримуємо час, за який опір ізоляції зменшиться до 0,5 МОм, до значення, при якому необхідне сушіння ізоляції обмоток

електричних машин. Якщо навантаження, тривалість роботи на добу і параметри навколишнього середовища відрізняються від нормативних, то терміни сушіння ізоляції електродвигунів приводу поліграфічних машин та комплексів визначають шляхом інтерполяції, похибка при цьому становить 10-12%. А це є цілком придатним для планування часу періо-

дичності сушіння обмоток електродвигунів у промислових умовах.

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

1) час служби асинхронних двигунів приводу друкарських машин та комплексів, що працюють у динамічних режимах, на 25 % нижчий, ніж в електродвигунів, що працюють у подовженому режимі з постійним навантаженням, і при цьому вирішальне значення в надійності роботи електродвигунів приводу має контроль опору міжвиткової ізоляції статорних обмоток;

2) терміни сушіння ізоляції статорних обмоток електродвигунів приводу поліграфічних машин та комплексів залежать від умов навколишнього середовища та часу роботи електроприводу і, якщо електропривід не працював протягом 24 діб, то ізоляція електродвигунів підлягає сушінню;

3) розроблена математична модель, яка дозволяє визначати опір ізоляції електричних машин без вимірювання, що скорочує час проведення регламентних робіт електрообладнання на 20 %.

#### Список літератури

1. Друкарське устаткування: підруч. / 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. Ванеев Б. Н. Надежность асинхронных электродвигателей / Б. Н. Ванеев. – 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.
6. Корчемный Н. А. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве / Н. А. Корчемный, В. П. Машевский. – К.: Урожай, 1988. – 176 с.
7. 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.
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 / Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. – Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
10. Томашивський В. М. Моделювання систем / В. М. Томашивський. – К.: Видавнича група BHV, 2005. – 352 с.

#### References

1. Chelman, 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. Main provisions. [Effective as of 01.01.1999]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 98 p. [in Ukrainian].
4. Vaneyev, B. N. (1983) Reliability of induction motors. Kiev: Tehnika, 142 p. [in Russian].
5. Gorbunov, A. P., Gol'dberg, O. D., Irtyshskij, Je. B. (1984). Complex approach to assessing the reliability of electrical machines. *Elektrichestvo*, (5), p. 52 [in Russian].
6. Korchemnyj, N. A., Mashevskij, V. P. (1988) Improving the reliability of electric equipment in agriculture. Kiev: Urozhaj, 176 p. [in Russian].
7. Petrov, T. A. (1983) Justification of the periodicity of maintenance and repair of electric motors with regard to their operational reliability: author's abstract of Ph.D. diss. Chelyabinsk, 24 p. [in Russian].
8. Man'ko, V. M. (2001) Universal stand for diagnosing and testing of electrical machines. *Avtozhlyahovyk Ukrayiny*, (2). Kyiv. pp. 48–53 [in Ukrainian].
9. Kostynyuk, L. D., Moroz, V. I., Paranchuk, Ja. S. (2004). Modeling of electric drives. L'viv: Nats. un-t «L'viv'ska politehnika», 404 p. [in Ukrainian].
10. Tomashyvs'kyu, V.M. (2005) Simulation of systems. Kyiv: Vydavnycha grupa BHV, 352 p. [in Ukrainian].

**V. M. Manko**, *Ph.D., associate professor,*  
**V. M. Zotov**, *postgraduate student*  
Cherkasy State Technological University  
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine  
[zotov\\_vetal@ukr.net](mailto:zotov_vetal@ukr.net), [mankovm@ukr.net](mailto:mankovm@ukr.net)

## RESEARCH AND CONTROL OF THE INSULATION OF STATOR WINDING OF ELECTRICAL MACHINES OF PRINTING COMPLEXES

*For the drive of printing machines and complexes asynchronous short-circuited electric motors of 4A, 4AM series are widely used. The short-term operating mode and low load of electric motors negatively influence the insulation of windings. It is damaged, humidified, decreases its resistance, bearing knots wear out, contacts in a terminal box burn slightly.*

*Numerous researches show that the winding of the stator is one of the weakest components of an electric motor. The purpose of this work is to determine the reliability of electrical machines at various operating modes of electric drive. The time of the service of asynchronous engines of the drive of printing machines and complexes working in the prolonged mode with constant loading is established. The most frequent refusals in these cases are round and interturn short circuits of the stator of windings in front parts of electrical machine.*

*Therefore the control of resistance of the insulation of electric motors of the drive of printing machines has crucial importance for their reliability.*

**Keywords:** *reliability, electric motor, winding insulation, electric drive, interturn circuit, winding temperature.*

*Стаття надійшла до редакції 27.11.2015.*

*Рецензенти: Г. В. Канашиевич, д.т.н., професор,  
С. В. Поздєєв, д.т.н., професор*