

## ОЦІНКА ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АУДИТУ

У статті розглядаються методичні засади визначення залишкового ресурсу потужних електромеханічних систем при проведенні енергетичного аудиту. Оцінка залишкового ресурсу необхідна для обґрунтування заходів з підвищення енергоефективності електромеханічних систем методом розрахунку вартості життєвого циклу. У статті показано, що строк служби електромеханічної системи значною мірою визначається якістю ізоляції обмоток електродвигуна. Головним чинником, який впливає на термін служби ізоляції, є її робоча температура. Найчастіше застосовується розрахунок нагрівання за експонентою, тобто представлення моделі електродвигуна електромеханічної системи диференціальним рівнянням теплового стану. Найдоцільнішим є підхід, у якому розрахунок поточної температури ізоляції при проведенні комплексного енергоаудиту потужної електромеханічної системи здійснюється за фактичними втратами в електродвигуні з урахуванням режиму навантаження і додаткових втрат, зумовлених несиметрією та несинусоїдальністю напруги. Математичне моделювання та експериментальна перевірка підтвердила адекватність такого підходу до прогнозування залишкового ресурсу електромеханічних систем.

**Ключові слова:** енергетичний аудит, вартість життєвого циклу, електромеханічна система, залишковий ресурс.

**Вступ.** Електромеханічні системи (ЕМС), як правило, розраховані на термін служби 20 000 годин без капітального ремонту, за умови правильної їх експлуатації. Під правильною експлуатацією розуміється робота відповідно до номінальних параметрів, зазначених в паспорті устаткування. У реальному житті має місце значне відхилення режимів експлуатації від номінальних.

На даний час надійність електроприводів (ЕП) ЕМС у всіх областях промисловості дуже низька. Щорічно виходять з ладу і ремонтуються до 50% парку електричних машин. Переважна більшість їх після ремонту повертається на підприємство і експлуатується до наступного виходу з ладу. Машина може ремонтуватися 3-4 рази, а час напрацювання на відмову складає 0,5 ... 1,5 року.

Підтримання працездатності ЕМС за рахунок проведення ремонтів не є економічно доцільною. Характеристики відремонтованих ЕМС істотно відрізняються від шойно випущених виробником через те, що в результаті експлуатації та ремонту змінюються характеристики конструкційних матеріалів. Відбувається насичення сталі та зростання струму намагнічування, який стає несинусоїдальним, оскільки містить крім першої також непарні гармоніки 5,7,11... порядків. Зменшення під час ремонту двигуна ЕМС кількості витків на 10% призводить до різкого підвищення густини магнітного потоку у сталі статора, і струм холостого ходу збільшується до 25%, а ККД й коефіцієнт потужності знижуються [1].

Експлуатація ЕМС, яка супроводжується численними ремонтами, призводить до того, що на підприємствах використовується ЕП, реальні енергетичні показники якого значно нижчі декларованих виробником (номінальних) і не відповідають високому рівню енергоефективності.

Для виявлення можливостей підвищення рівня енергоефективності потужних ЕМС при проведенні сучасного комплексного енергетичного аудиту і зниження витрат на експлуатацію слід здійснювати аналізування вартості їх життєвого циклу за складниками витрат (LCC analysis). Детальне дослідження кожного з них дозволяє врахувати їх вплив на подальше зменшення витрат шляхом реалізації відповідних рішень [2].

У розрахунку вартості життєвого циклу LCC складною задачею є визначення залишкового ресурсу устаткування. Це обумовлено великою кількістю факторів, які впливають на ресурс обладнання.

**Мета роботи:** вдосконалити методичні засади визначення залишкового ресурсу потужних ЕМС при проведенні комплексного енергоаудиту, які дозволяли б оцінювати скорочення строку служби у залежності від режиму навантаження і додаткових втрат, зумовлених несиметрією та несинусоїдальністю напруги. Залишковий ресурс ЕМС, при проведенні енергетичного аудиту, повинен визначатися на основі параметрів, що вимірюються миттєвих значень напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$ .

**Аналіз попередніх досліджень.** Технічний стан ЕМС визначається насамперед дефектами ізоляції ЕП [3]. Вразливість міжвиткової ізоляції обумовлена входженням її до механічної системи, яка складається з різномірних елементів: міді провідників і полімерних ізоляційних матеріалів. Деформації від зміни температури, електродинамічних зусиль, вібрації обмотки призводять до утворення дефектів.

У переважній більшості випадків (85-95%) відмови ЕП ЕМС потужністю понад 5 кВт пов'язані з пошкодженням ізоляції обмоток і розподіляються наступним чином: міжвиткові замикання - 93%, пробій міжвиткової ізоляції - 2%. Решта відмов у роботі викликані механічними пошкодженнями [4]. Таким чином, термін служби ЕП визначається, в основному, якістю ізоляції його обмоток.

Найчастіше перегрів обмоток ЕП виникає при загальмованому роторі (заклинювання), обриві фази статора, відхиленні напруги мережі від нормованих значень, несиметрії напруги живлення [5].

Одним з методів дослідження теплових процесів ЕП є метод еквівалентних теплових схем заміщення [3, 4]. Теплові процеси в двигуні ЕМС описуються системою диференціальних рівнянь

$$C \frac{d\tau}{dt} + \Lambda \tau = P, \quad (1)$$

де  $C$  – вектор-стовпець теплоємностей вузлів двигунів,  $\tau$  - вектор-стовпець перевищення температури відповідних вузлів над температурою довкілля,  $\Lambda$  - матриця теплопровідностей вузлів,  $P$  - вектор втрат потужності у вузлах двигуна.

Спрощено рівняння (1)

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\tau_M}{dt} = \frac{1}{C_M} [\Delta P_M - A_M \Delta\tau_M - A_{MCT} (\Delta\tau_M - \Delta\tau_{CT})] \\ \frac{d\Delta\tau_{CT}}{dt} = \frac{1}{C_{CT}} [\Delta P_{CT} - A_{CT} \Delta\tau_{CT} - A_{MCT} (\Delta\tau_M - \Delta\tau_{CT})] \end{cases} \quad (2)$$

де  $\Delta\tau_M, \Delta\tau_{CT}$  - перевищення температури міді й сталі над температурою довкілля;  $\Delta P_M$  - втрати потужності в міді;  $C_M, C_{CT}$  - теплоємність міді й сталі;  $A_M, A_{CT}$  - тепловіддача міді й сталі в довкілля;  $A_{MCT}$  - теплопередача між міддю і сталлю [6].

Для розрахунків за наведеною системою рівнянь необхідно визначити початкові параметри – теплоємність і коефіцієнти тепловіддачі, що не завжди можливо. Для цього потрібні такі параметри міді, як середня довжина витків, їх кількість, діаметр дроту, а також геометричні розміри сталі.

Найчастіше застосовується розрахунок нагрівання за експонентою, тобто представлення моделі двигуна диференціальним рівнянням теплового стану

$$\frac{d\Delta\tau}{dt} = \frac{1}{C} [\Delta P - A \Delta\tau], \quad (3)$$

де  $\Delta\tau$  - перевищення температури двигуна над температурою довкілля у разі синусоїдальної напруги живлення;  $\Delta P$  – «тріючі» втрати потужності в двигуні,  $\Delta P = \Delta P_{\Sigma} - K$ ;  $C, A$  - теплоємність та тепловіддача відповідно,  $\Delta P_{\Sigma}$  – повні втрати потужності,  $K$  – постійні втрати потужності в двигуні.

У формулі (3) прийнято стандартні припущення: двигун розглядається як однорідне тіло з нескінченно великою теплопровідністю і однаковою температурою в усіх своїх точках; тепловіддача в зовнішнє середовище пропорційна різниці температур двигуна й довкілля; навколишнє середовище має нескінченно велику теплоємність, тобто у процесі нагрівання двигуна температура середовища не змінюється; теплоємність і тепловіддача двигуна не залежать від його температури.

#### Матеріал і результати досліджень.

Існує кілька підходів до визначення усталеного перевищення температури обмотки статора. Їх недоліком є неврахування параметрів конкретного ЕП, використання специфічних величин (діаметри розточування і зовнішній діаметр сердечника статора), коефіцієнта номінальних втрат в двигуні, тоді як він не завжди працює в номінальному режимі. Найдоцільнішим є підхід, у якому розрахунок поточної температури здійснюється за фактичними втратами в двигуні ЕМС.

У придатній для реалізації в цифровому пристрої різницевій формі рівняння (3) має вигляд [5]

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} + \frac{\Delta h}{C} [\Delta P - A \Delta\tau_{k-1}], \quad (4)$$

де  $\Delta\tau_k$  - перевищення температури в  $k$ -й момент часу;  $\Delta\tau_{k-1}$  - перевищення температури в  $(k-1)$ -й момент часу;  $\Delta h$  - крок розрахунку.

Розрахунок тепловіддачі здійснюється для усталеного номінального режиму роботи двигуна ЕМС  $A = \Delta P_H / \tau_H$ , де  $\tau_H$  - усталене значення перевищення температури двигуна в номінальному режимі роботи [6].

Згідно [7], сталі нагрівання обмоток статора і ротора відповідно

$$T = \frac{150 \Delta\tau_H}{j_H^2}, T_p = \frac{T}{2},$$

де  $j_H$  - густина струму в обмотці статора за номінального навантаження.

У випадку асинхронного двигуна (АД) ЕМС, у формулі (4)  $\Delta P = V_1 + V_2 + \Delta P_{1H} k_{3I}^2 + \Delta P_{НСМ} + \Delta P_{НС}$ , де  $V_1, V_2$  – змінні втрати в статорі та роторі,  $\Delta P_{НСМ}, \Delta P_{НС}$  – додаткові втрати від неякісної напруги живлення. Таким чином, ураховуються всі втрати, у т. ч. від несиметрії та несинусоїдальності напруги.

Рівняння (4) можна переписати, як

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} + \frac{\Delta h}{T_H} \left[ \frac{(V_1 + V_2 + \Delta P_{1H} k_{3I}^2 + \Delta P_{НСМ} + \Delta P_{НС}) \Delta\tau_{i3}}{\Delta P_H} - \Delta\tau_{k-1} \right]. \quad (5)$$

Модель (5) ураховує лише теплове старіння, а під час роботи АД ізоляція зазнає ще й електричного і механічного впливу. Можна припустити, що насправді її руйнування внаслідок пробою відбудеться значно раніше.

Якщо навантаження відрізняється від номінального, то повні змінні втрати  $V = V_H k'_{3I}$ , або для Г-подібної схеми заміщення  $V = V_1 + V_2 = 3I'^2_2(R_1 + R'_2)$ , де  $R'_2$  — приведений активний опір ротора,  $I'_2$  — приведений струм ротора АД,  $k'_{3I}$  — коефіцієнт звантаження за приведеним струмом ротора.

Додані (паразитні) втрати визначаються втратами на гістерезис і вихрові струми в режимі холостого ходу та під навантаженням  $\Delta P_1 = \Delta P_{1H} k^2_{3I}$ , де  $k_{3I}$  - коефіцієнт звантаження за струмом двигуна  $k_{3I} = I/I_H$ .

Додаткові втрати в обмотках і сердечниках двигуна  $\Delta P_2 = \Delta P_{НСМ} + \Delta P_{НС}$  обумовлені несиметрією  $\Delta P_{НСМ}$  та несинусоїдальністю  $\Delta P_{НС}$  напруги живлення.

Додаткові втрати від несиметрії напруги визначаємо як потужність, витрачену на подолання гальмівного моменту двигуна  $M_2$  від струмів зворотної послідовності

$$\Delta P_{НСМ} = M_2 \omega .$$

Гальмівний момент двигуна від струмів зворотної послідовності з урахуванням впливу відхилення напруги і частоти від номінальних значень

$$M_2 = \frac{2M_K \frac{c_{U2}^2}{c_f^2} \left(1 + \frac{R_1 s_K}{R_2 c_f}\right)}{\frac{s_K}{c_f(2-s)} + \frac{c_f(2-s)}{s_K} + 2 \frac{R_1 s_K}{R_2 c_f}},$$

де  $c_{U2} = \frac{U_2}{U_H}$  - відносна напруга зворотної послідовності,  $c_f = \frac{f}{f_H}$  - коефіцієнти відхилення частоти від номінальних значень,  $s_K$  – критичне ковзання,  $M_K$  – критичний момент двигуна.

Додаткові втрати від несинусоїдальності напруги

$$\Delta P_{НС} = 2\lambda_{\Pi}^2 V_{IH} \sum_{v=n}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}},$$

де  $U_v$  - відношення напруги  $v$ -ї гармоніки до номінальної [9].

У [9] наведено вираз для розрахунку температури обмоток  $\tau_{2U}$  АД ЕМС у функції несиметрії напруги

$$\tau_{2U} = \tau [1 + 2(K_{2U}\%)^2].$$

Згідно [10] додаткове перегрівання обмотки статора внаслідок несинусоїдальності напруги  $\Delta\tau_{НС}$  визначається за формулою

$$\Delta\tau_{НС} = 42\Delta\tau \sum_{v=2}^n \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}.$$

Також додаткове перегрівання  $\Delta\tau_{НС}$  можна визначити з формули

$$\Delta\tau_{НС} = \tau \frac{\Delta P_{МВ}}{\Delta P_M},$$

де  $\Delta P_{МВ}$  - втрати в міді, зумовлені вищими гармоніками напруги [10].

У [9] наведено спрощену формулу визначення перегрівання обмоток внаслідок несинусоїдальності й несиметрії напруги живлення

$$\Delta\tau_{пер} = \frac{280}{b} \left(1,55K_{2U}^2 + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}\right)$$

де  $\Delta\tau_{пер} = \tau_{пер} - \tau_H$ .

Відносне значення строку служби з урахуванням перегрівання внаслідок несинусоїдальності й несиметрії напруги живлення

$$z = \exp \left[ -280 \left(1,55K_{2U}^2 + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}\right) \right].$$

Якщо ЕМС з АД тривалий час працює на пониженої напрузі, то через прискорене зношування ізоляції строк служби його зменшується. Строк служби ізоляції  $Z$  можна визначити за формулою  $Z = Z_H/R$ , де  $Z_H$  - строк служби ізоляції двигуна для номінальних напруги і навантаження,  $R$  - коефіцієнт, який залежить від величини і знаку відхилення напруги, а також від коефіцієнта звантаження двигуна [11].

$$R = (47\delta U_y^2 - 7,55\delta U_y + 1)k_3^2 \text{ при } -0,2 < \delta U_y < 0; R = k_3^2 \text{ при } 0,2 \geq \delta U_y > 0.$$

Термін придатності ізоляції електродвигуна ЕМС, який працює зі сталим навантаженням

$$Z = ce^{-b\tau},$$

де  $c$  і  $b$  – сталі коефіцієнти для даного виду ізоляції.

Залишковий ресурс ЕМС

$$Z = Z_{поч} e^{-b\Delta\tau}, \tag{6}$$

де  $Z_{\text{поч}}$  - початковий ресурс ізоляції.

Якщо температура  $\tau$  змінюється у часі  $t$ , тобто графік електричного навантаження змінний, строк служби ізоляції

$$Z = c \int_0^t e^{-b\tau} dt.$$

Зношеність ізоляції для роботи ЕМС із постійним навантаженням

$$\xi = \frac{1}{Z} = ce^{b\tau}.$$

Відносна зношеність ізоляції

$$\chi = \frac{\xi}{\xi_H} = e^{b(\tau - \tau_H)} = e^{b\Delta\tau}.$$

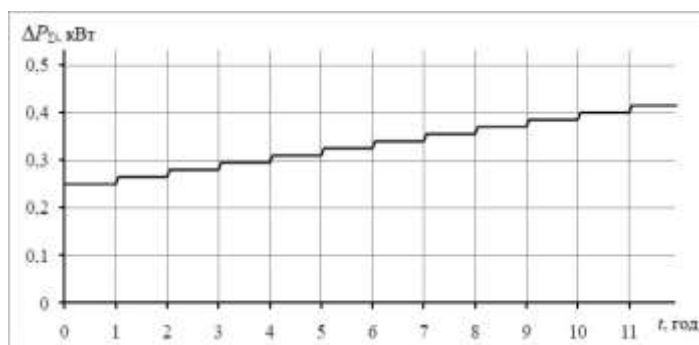
Середнє значення відносної зношеності ізоляції ЕП за період часу  $T$

$$\bar{\chi} = \frac{1}{T} \int_0^T e^{b\Delta\tau} dt.$$

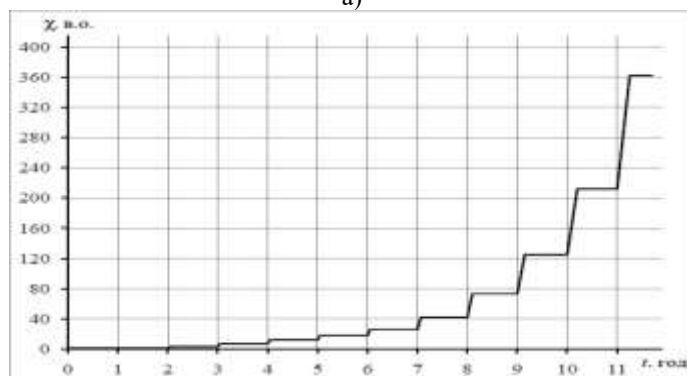
Якщо ЕМС працює зі знизеним навантаженням, то відносна зношеність ізоляції, як правило, нижча від номінального значення. Коли робоча температура вища припустимої, відносна зношеність перевищує одиницю. Таким чином, головна умова справного технічного стану - відносна зношеність ізоляції за певний період часу (цикл роботи, зміну тощо) не повинна перевищувати одиницю.

Для перевірки достовірності моделі (5, 6) для розрахунку залишкового ресурсу ЕМС з АД виконано експериментальне дослідження методом прискореного експерименту. Здійснено вимірювання параметрів (струмів і напруги) АД типу 4A90LB8Y3 ( $P_H = 1,1$  кВт,  $n_H = 750$  об/хв,  $U_H = 380$  В,  $\eta_H = 70\%$ ,  $\cos\phi_H = 0,68$ ), визначення залишкового ресурсу та його порівняння з експериментально встановленим. Дослідження здійснено в умовах послідовного збільшення навантаження до 150% з дискретністю приблизно 5% та витримування на кожному рівні навантаження протягом однієї години (рис., а). АД навантажувалася за допомогою навантажувального пристрою «Тормоз ПТ-2,5М» в лабораторних умовах.

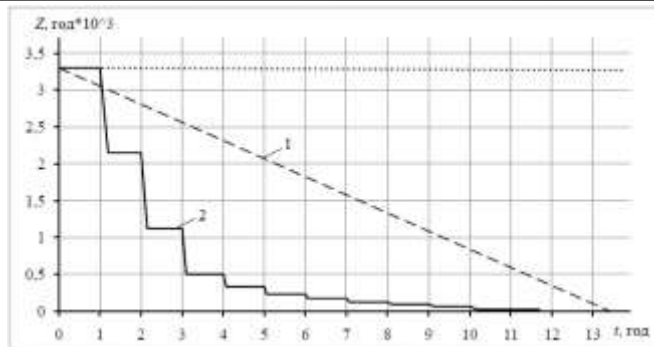
Результат прогнозування вказав (рис. б, в) на те, що АД повинен вийти з ладу в кінці 11 години роботи за даних умов експерименту. Фактично відмова двигуна відбулась в кінці 13 години. Відносна похибка прогнозування залишкового ресурсу за експериментом, обумовлена неточністю визначення початкового ресурсу та похибкою власне моделі старіння ізоляції, не перевищує 20%.



а)



б)



в)

Рисунок – Графіки зміни в часі: а – сумарних втрат потужності; б – зношування ізоляції; в – залишкового ресурсу (1 - експериментальне значення, 2 - прогнозоване)

**Висновки.** Удосконалено методичні засади визначення залишкового ресурсу потужних ЕМС при проведенні комплексного енергоаудиту, які дозволяють оцінювати скорочення строку служби у залежності від режиму навантаження і додаткових втрат, зумовлених несиметрією та несинусоїдальністю напруги. Експериментальна перевірка підтвердила достатню точність оцінки залишкового ресурсу ЕМС з АД. Відносна похибка прогнозування залишкового ресурсу за експериментом, обумовлена неточністю визначення початкового ресурсу та похибкою власне моделі старіння ізоляції, не перевищує 20%.

#### Список використаної літератури.

1. Ермолаев С.А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве: Учебник / С.А. Ермолаев, Е.П. Масюткин, В.Ф. Яковлев. – К.: Фирма “Инкос”, 2005. – 670 с.
2. Gill P. Electrical power equipment maintenance and testing / Paul Gill. – USA, CRC Press: 2008. – 1002 с.
3. Воробьев В.Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: Письменные лекции / В.Е. Воробьев, В.Я. Кучер. – СПб.: СЗТУ, 2004. – 56 с.
4. Бурковский А.Н. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения / А.Н. Бурковский, Е.Б. Ковалев, В.К. Коробов. – М.: Энергия, 1970. – 184 с.
5. Синчук О.Н. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, С.Л. Михайлов // Электротехника, 2003, №3. С. 205-211
6. Определение допустимого тока статора взрывозащищенных асинхронных двигателей серии В, ВР в кратковременных режимах работы/ [А.Н. Бурковский, Т.О. Титкова, Т.П. Канашенкова, В.В. Макеев] // Электротехническая промышленность. Серия “Электрические машины”. Вып. 7(89). 1978г. – С.5-7.
7. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 384 с.
8. Филиппов И.Ф. Теплообмен в электрических машинах / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
9. Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
10. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – [2-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
11. Суднова В.В. Качество электрической энергии [Электронный ресурс] / В.В. Суднова. – М.: Энергосервис, 2000. - Режим доступа <http://www.test-electro.ru>.

**O. Zakladnyi**, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692

**V. Prokopenko** Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-5518-5802

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

#### REMAINING RESOURCE ESTIMATION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR ENERGY AUDIT

*The article deals with the determination of the residual life of high-power electromechanical systems in the energy audit. Maintaining performance through EMC repairs are not economically feasible. EMC characteristics renovated differ significantly from the newly issued by the manufacturer because the resulting operation and maintenance characteristics of structural change materialiv. Otsinka remaining resources needed to justify energy efficiency improvements electromechanical systems using the method of calculating the cost of the life cycle. In calculating life cycle cost LCC one of the main tasks is to determine the residual life of the equipment. The article shows that the lifetime of the electromechanical system is largely determined by the quality of the motor winding insulation. The main factor that affects the lifetime of the insulation is its operating*

temperature. The most frequently used calculations heating exponentially, ie representation model motor thermal state differential equation. Is the most appropriate approach in which the calculation of the current temperature during isolation of complex electromechanical system powerful energy audit carried out by the actual losses in the electric motor mode the light load and additional losses due to asymmetry and nonsinusoidal voltage. The remaining resource in conducting energy audit determined based on measurement of parameters  $\rightarrow$  instantaneous values of voltage and current. Mathematical modeling has confirmed the adequacy of this approach to predicting the residual life of asynchronous motors. Experimental verification of the accuracy of prediction proved sufficient residual life. The relative error of prediction of residual life of the experiment due to inaccurate determination of the initial resource and the actual error model of aging insulation does not exceed 20%. The technique, considers only thermal aging and isolation during suffers even electrical and mechanical effects. We can assume that in fact its destruction as a result of the breakdown will take place much earlier.

**Keywords:** energy audits, life cycle cost, electromechanical systems, residual life.

#### References

1. S.A. Ermolaev, E.P. Masyutkin, and V.F. Yakovlev, *Operation of power equipment in agriculture: Textbook*. Kyiv, Ukraine: Firm "Inkos", 2005.
2. P. Gill, *Electrical power equipment maintenance and testing*. USA: CRC Press: 2008.
3. V.E. Vorobyov, and V.Ya. Coachman, *Forecasting the service life of electric machines: Written lectures*. St. Petersburg, Russia: SZTU, 2004.
4. A.N. Burkovsky, and E.B. Kovalev, *Heating and cooling of explosion-proof electric motors*. Moscow, Russia: Energiya, 1970.
5. O.N. Sinchuk, V.V. Chumak, and S.L. Mikhailov, "Thermal model of crane AD for diagnosing and setting up digital overload protection", *Electrical Engineering*, Ukraine, vol 3, 2003.
6. A.N. Burkovsky, T.O. Titkova, T.P. Kanashenkova, and V.V. Makeev, "Determination of the admissible stator current of explosion-proof induction motors of series B, BP in short-time operation modes", *Electrical engineering industry. A series of "Electric Machines"*. Volume. 7 (89), 1978.
7. N.F. Kotelenets, N.A. Akimova, and M.V. Antonov, *Tests, operation and repair of electric machines: Textbook for high schools*, Moscow, Russia: Publishing Center "Academy", 2003.
8. I.F. Filippov, *Heat transfer in electrical machines*, Leningrad, USSR: Energoatomizdat, 1986.
9. A.K. Shidlovsky, and V.G. Kuznetsov, *Improving the quality of energy in electrical networks*, Kyiv: Naukova. Dumka, 1985.
10. I.V. Zhezhelenko, *Higher harmonics in power supply systems for industrial enterprises - [2-nd ed.]*, Moscow: Energoatomizdat, 1984.
11. V.V. Sudnova, *The quality of electrical energy [online]*, Available: <http://www.test-electro.ru>. Moscow: Energoservis, 2000.

УДК 621.311.001.57(063)

**О.А. Закладной**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692

**В.В. Прокопенко**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5518-5802

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

#### ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА

В статье рассматриваются вопросы определения остаточного ресурса мощных электромеханических систем при проведении энергетического аудита. Оценка остаточного ресурса необходима для обоснования мероприятий по повышению энергоэффективности электромеханических систем с помощью метода расчета стоимости жизненного цикла. В статье показано, что срок службы электромеханической системы в значительной степени определяется качеством изоляции обмоток электродвигателя. Главным фактором, который влияет на срок службы изоляции, является ее рабочая температура. Чаще всего применяется расчет нагрева по экспоненте, то есть представления модели электродвигателя дифференциальным уравнением теплового состояния. Наиболее целесообразным является подход, при котором расчет текущей температуры изоляции при проведении комплексного энергоаудита мощной электромеханической системы осуществляется по фактическим потерям в электродвигателе с учетом режима нагрузки и дополнительных потерь, обусловленных несимметрией и несинусоидальность напряжения. Математическое моделирование и экспериментальная проверка подтвердила адекватность такого подхода к прогнозированию остаточного ресурса асинхронных двигателей.

**Ключевые слова:** энергетический аудит, стоимость жизненного цикла, электромеханическая система, остаточный ресурс.

Надійшла 30.03.2017

Received 30.03.2017