

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

Складність широкого застосування спектральних методів функціонального діагностування полягає в тому, що недостатньо досліджено окремі несправності електромеханічних систем на предмет отримання діагностичної інформації і не стандартизовано діагностичні параметри, які характеризують електромагнітні, вібраційні й акустичні процеси. Тому, останнім часом як альтернативу спектральним методам розглядають енергетичні методи діагностування електромеханічних систем. У статті обґрунтовано можливість визначення технічного стану на основі діагностичних параметрів – втрат потужності в елементах електромеханічної системи та відносного зношування ізоляції. Математичне моделювання та експериментальна перевірка підтвердила адекватність енергетичного підходу до визначення несправностей.

Ключові слова: електромеханічна система, технічний стан, діагностування, відносне зношення, втрати потужності, якість напруги живлення, режим навантаження.

Вступ. Більшість аварій електромеханічних систем (ЕМС) має прихований характер і виявляється лише після відповідних випробувань або розбирань. Складність діагностування ЕМС зумовило появу значної кількості різних методів та підходів, кожний з яких має свої переваги, недоліки й сферу використання. Найбільш розповсюджені методи функціонального діагностування – спектральні (вібродіагностика, спектрально-струмовий аналіз, спектральний аналіз магнітного поля), енергетичні методи (електричні, теплові) та методи розпізнавання станів.

Основною причиною виникнення аварій та низької енергоефективності ЕМС є неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, відсутність ефективного безперервного захисту двигунів, несвоєчасне виявлення і усунення дефектів, недостатній рівень експлуатації, неякісний ремонт.

Метою роботи є: обґрунтування можливості визначення технічного стану ЕМС на основі діагностичних параметрів – втрат потужності в її елементах та відносного зношування ізоляції.

Аналіз попередніх досліджень. Спектральні методи діагностування базуються на виділенні з вимірюваного сигналу частотних складових з подальшим їх аналізуванням. Найпоширенішим з них є вібродіагностика [1, 2]. Комплекс параметрів вібрації практично повністю характеризує технічний стан ЕМС і дозволяє прогнозувати виникнення пошкоджень і аварій [3]. Основними недоліками цього методу є відсутність можливості контролювання енергетичного й теплового стану та необхідність зупинки устаткування і доступу до елементів ЕМС. Основним недоліком діагностування за спектральним аналізом магнітного поля є складне вимірювання сигналу – необхідність встановлення датчиків у повітряний зазор асинхронного двигуна (АД).

Останнім часом отримали розвиток методи діагностування стану ЕМС, засновані на моніторингу споживаного струму з виконанням спеціального спектрального аналізу отриманого сигналу [4-6]. Принцип методу полягає в тому, що будь-які збурення в роботі механічної і електричної частин двигуна та пов'язаного з ним механізму призводять до змін магнітного потоку в зазорі електричної машини, а отже – до слабкої модуляції споживаного струму. Поява у спектрі спожитого струму характерних частот певної величини свідчить про наявність пошкоджень електричної або механічної частин ЕМС [4, 6].

Складність широкого застосування наведених методів полягає в тому, що недостатньо досліджено окремі несправності ЕМС на предмет отримання діагностичної інформації і не стандартизовано діагностичні параметри, які характеризують електромагнітні, вібраційні й акустичні процеси. Ці методи не завжди можуть запобігти розвитку дефектів на ранній стадії їх виникнення.

Неврахування зв'язків між процесами перетворення енергії та їх наслідками є істотним недоліком існуючих засобів діагностування ЕМС. Це не дозволяє встановити причини, які призводять до виникнення і розвитку несправностей та аварій, погіршення енергоефективності. Існує взаємозв'язок між якістю електроенергії, режимом навантаження, процесами перетворення енергії та технічним станом ЕМС.

Матеріали і результати досліджень.

Перспективними є енергетичні методи діагностування. Як діагностичні параметри використовуються струми (миттєві значення, імпульси надструмів, струми витоків), напруги (миттєві значення, напруга нульової та зворотної послідовності) й температура частин двигуна (обмотки, сталі) [7].

На сьогодні не існує загального критерію визначення технічного стану ЕМС енергетичними методами, який був би придатний для кількісної оцінки. Пропонується визначати технічний стан ЕМС за допомогою показника відносної зношеності ізоляції та аналізу складових втрат, за якими діагностується ушкодження у відповідному вузлі.

Відносна зношеність ізоляції $\bar{\chi}$ АД за період часу T

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

де $\Delta\tau_H$ - перевищення температури АД над номінальною температурою, b – сталий коефіцієнт для даного виду ізоляції.

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

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

де $\Delta\tau$ - перевищення температури АД над температурою довкілля; ΔP – «гріючі» втрати потужності в двигуні; C, A - теплоємність та тепловіддача відповідно.

Таким чином відносна зношеність ізоляції обмотки АД визначається через «гріючі» втрати потужності в двигуні, всі інші параметри є умовно сталими.

Якщо ЕМС з АД працює зі зниженим 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.

Виконано математичне моделювання роботи АД потужністю 40 кВт відповідно до типового графіка електричного навантаження (ГЕН) насосної установки комунального водопостачання в умовах неякісної напруги живлення і зміни навантаження (рис. 1, 2, 3). Визначення параметрів процесу енерговикористання проводилось відповідно до методики функціонального діагностування енергоефективності ЕМС [8]. Вказана методика за результатами вимірювань експлуатаційних параметрів (струмів і напруг) дозволяє визначити в реальному часі технічний і енергетичний стан ЕМС. Методика урахує якість напруги живлення (відхилення, несиметрію та несинусоїдальність напруги, відхилення частоти), величину і характер навантаження, різницю між моментами на валу й електромагнітним для різних навантажень, гальмівний момент двигуна від струмів зворотної послідовності, додаткові втрати через несинусоїдальність та несиметрію напруги (визначається за моментом двигуна від струмів зворотної послідовності).

На рис. 1 наведено змодельовані параметри АД ЕМС в умовах поступового збільшення завантаження в 1,5 рази, а потім його зменшення до початкового значення.

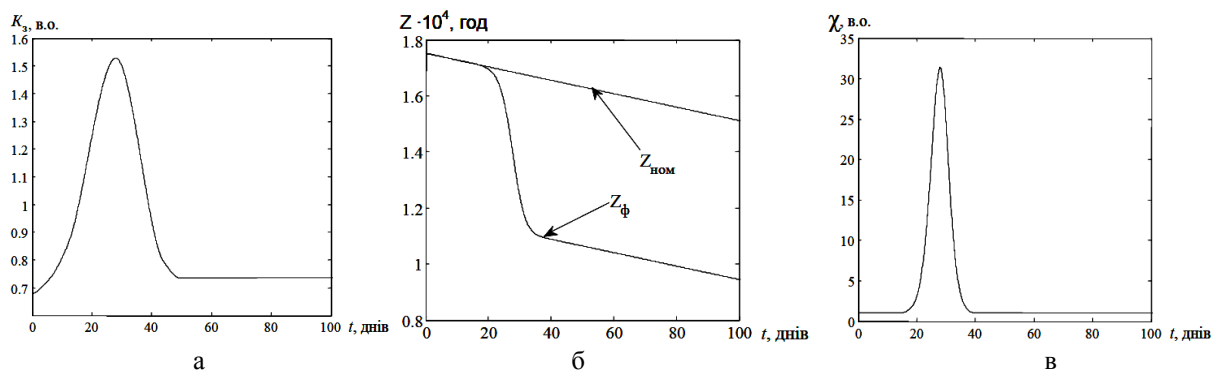


Рисунок 1 – Результати моделювання характеристик насосної установки в умовах збільшення навантаження:

а – ГЕН; б - залишковий ресурс; в - відносна зношування

Як видно з рис. 1, під час роботи в такому режимі зношеність зростає суттєво. В момент досягнення навантаженням максимуму відносна зношеність сягає значення понад 30 відн. од., а залишковий ресурс зменшується з 730 днів до 24.

На рис. 2 наведено змодельовані параметри АД ЕМС в умовах неякісної напруги живлення, що виражається у відхиленні напруги від номінальної.

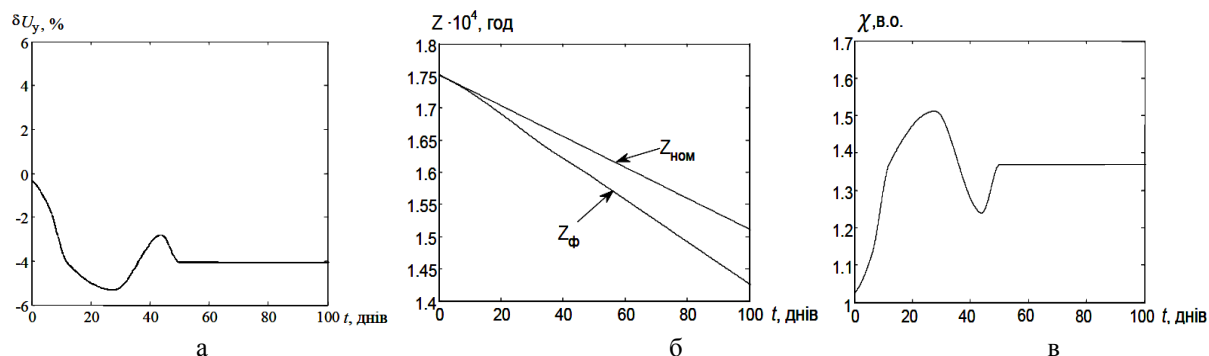


Рисунок 2 – Результати моделювання характеристик насосної установки в умовах відхилення напруги живлення від номінальної: а - відхилення напруги; б - залишковий ресурс; в - відносне зношування

З рис. 2 видно, що робота в такому режимі відхилення напруги призводить до зростання зношеності ізоляції АД ЕМС у 1,5 рази. Таким чином, залишковий ресурс у момент найбільшого значення відхилення напруги зменшується з 730 днів до 485.

На рис. 3 наведено змодельовані параметри АД ЕМС в умовах живлення неякісною напругою, що виражається у несиметрії напруги.

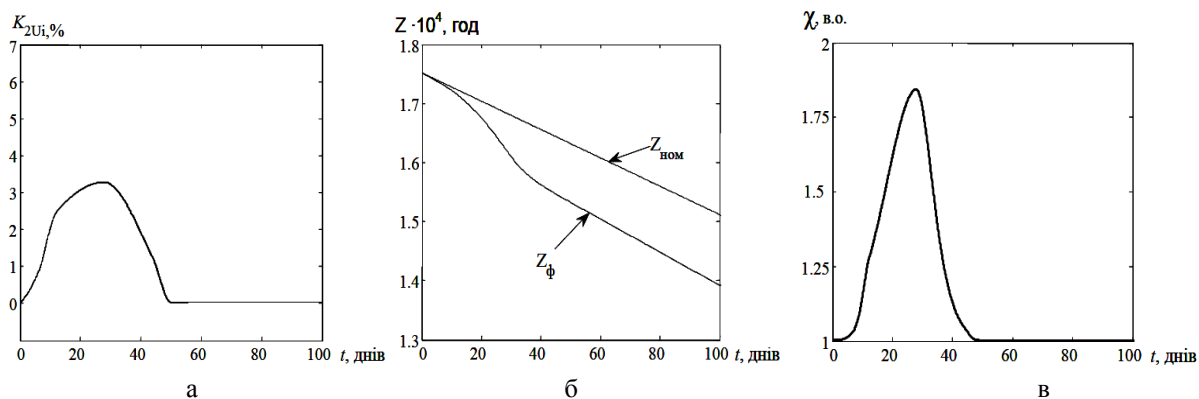


Рисунок 3 – Результати моделювання характеристик насосної установки в умовах несиметрії напруги живлення: а - коефіцієнт несиметрії за оберненою послідовністю; б - залишковий ресурс; в - відносне зношування

Як видно з рис. 3, робота в такому режимі збільшує відносне зношення у 2,8 рази, а залишковий ресурс у момент найбільшої несиметрії зменшується з 730 днів до 260.

Таким чином, математичне моделювання роботи АД насосної установки в умовах неякісної напруги живлення і зміни навантаження підтвердило, що відносне зношення може розглядатись як діагностична ознака, а його значення понад одиницю свідчить про перехід ЕМС до неномінального, передаварійного режиму.

Як другий критерій технічного стану АД пропонується застосовувати величину втрат у його вузлах. Аналіз цих значень здійснюється шляхом порівняння поточних значень складових втрат ΔP_{ϕ} з їх еталонними значеннями ΔP_e . Якщо $\Delta P_{\phi} > \Delta P_e$, ЕМС знаходиться у незадовільному технічному стані. Таким чином, за складовими втрат діагностується несправність у відповідному вузлі ЕМС з АД.

Результати математичного моделювання роботи АД 40 кВт відповідно до типового ГЕН насосної установки комунального водопостачання з несправністю в обмотці статора, яка виражена в суттєвому зниженні її опору внаслідок міжвиткових замикань, наведено на рис. 4.

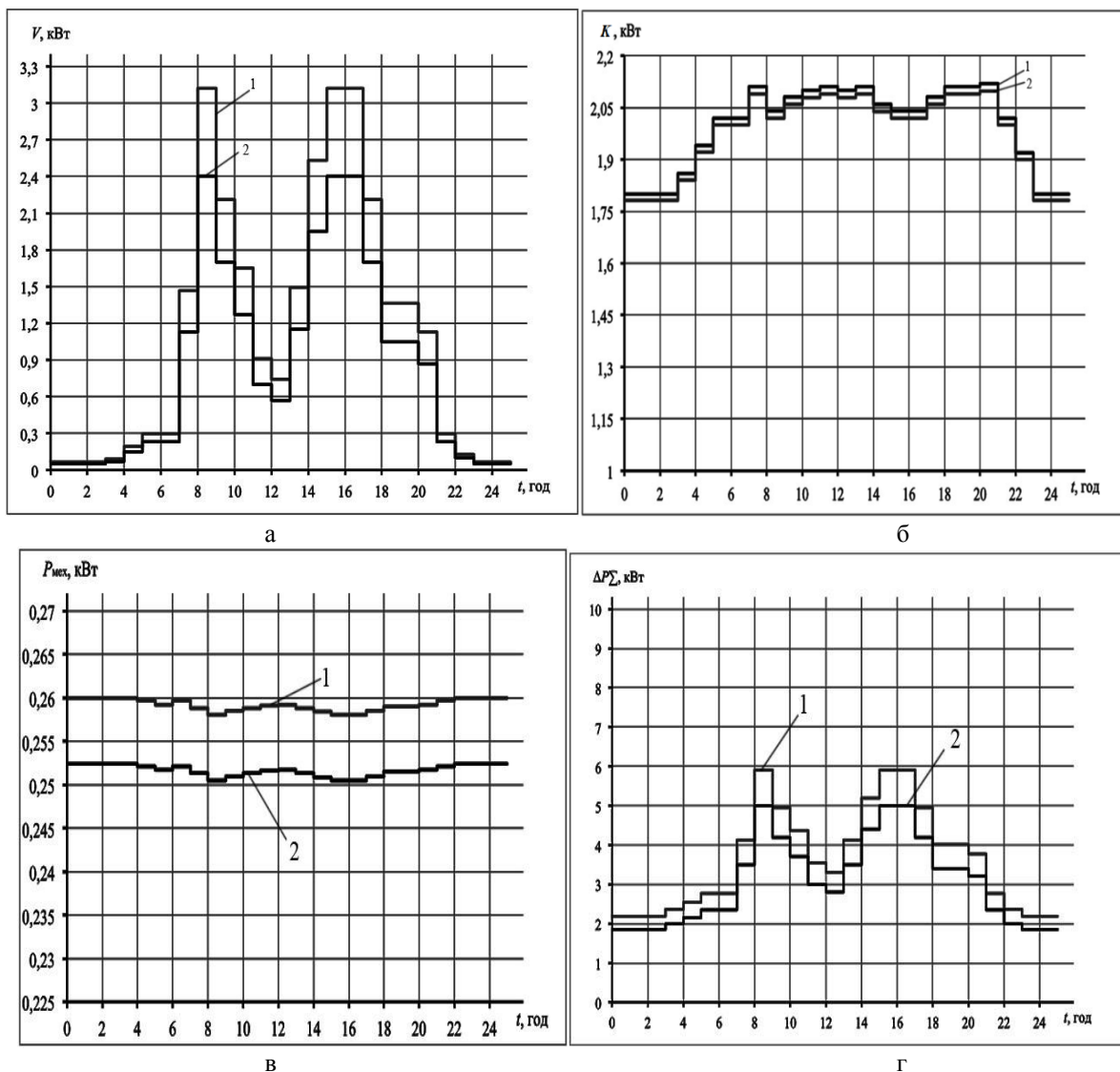


Рисунок 4 – Результати моделювання складових втрат АД насосної установки з несправностями обмотки статора (1 – несправний двигун, 2 - справний):
а - змінні втрати; б - постійні втрати; в - механічні втрати; г - повні втрати

Як видно з рис. 4, суттєво більшими порівняно з еталонними є значення змінних втрат. А саме – зросли на 50% втрати в обмотці статора внаслідок збільшення струму, що споживається. Це свідчить про несправність в обмотці статора. Змінні втрати в роторі лишилися практично сталими. Постійні втрати зменшились на 1% внаслідок спадання напруги в обмотці ротора через збільшення струму АД, що споживається. Механічні втрати збільшились на 3% через виникнення гальмівних моментів під час роботи несправного двигуна. Загальні втрати зросли на 18%. Крім того, ККД знизився на 2%. Таким чином, за методом складових втрат можна зробити висновок про пошкодження в обмотці статора.

Для обґрунтування можливості визначення технічного стану на основі втрат потужності в елементах ЕМС та відносного зношування ізоляції проведено експериментальне дослідження: виявлення несправностей обмоток статора і ротора АД. Несправність у обмотці статора реалізована шляхом припаювання в лобовій частині однієї з фаз обмотки перемички з мідного дроту, яка зашунтувала декілька витків. Додатково введення несправності в ротор здійснювалось заміною справного ротора іншим, з трьома відірваними стрижнями. АД типу 4А80В4У3 ($P_H = 1,5$ кВт, $n_H = 1500$ об/хв, $U_H = 380$ В, $\eta_H = 77\%$, $\cos\phi_H = 0,83$) навантажувався за допомогою навантажувального пристрою «Тормоз ПТ-2,5М» в лабораторних умовах відповідно до ГЕН АД промислового насоса (рис. 5,а).

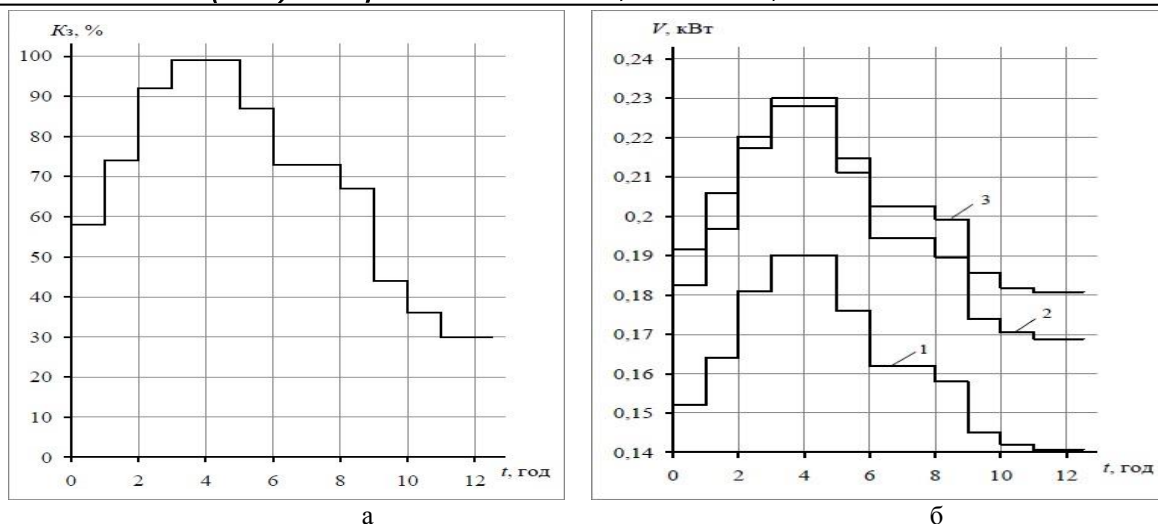


Рисунок 5 – Графіки: а - ГЕН АД промислової насосної установки; б - змінних втрат у часі (1 – неушкодженого двигуна; 2 – ушкодженого двигуна, визначені згідно ГОСТ 25941-83; 3 – ушкодженого двигуна, визначені за допомогою методики [8])

На першому етапі експерименту виявлено зменшення активного опору обмотки статора двигуна на 20% і збільшення втрат в обмотці в середньому на 25% протягом циклу роботи. Після введення додаткової несправності у ротор виявлено зменшення активного опору обмотки ротора на 10% і збільшення втрат у обмотці на 12%. Сумарні змінні втрати зросли на 21% (рис. 5,б). Отримані результати підтвердили наявність несправностей в обмотках статора і ротора двигуна, які діагностовано за методом складових втрат.

Визначення технічного стану ЕМС на основі діагностичних параметрів – втрат потужності в її елементах та відносного зношування ізоляції дозволяє поєднати завдання технічного діагностування з завданнями енергетичного менеджменту (аудиту), основною функцією яких є управління енергоспоживанням і технічним станом. Енергетичний підхід до визначення технічного стану ЕМС може застосовуватися в системах моніторингу та функціонального діагностування, при визначенні показників енергоефективності ЕМС та причин їх зниження, в програмному забезпеченні сучасних інформаційних систем «розумного енергоспоживання».

Висновок. Для визначення технічного стану та виявлення механічних несправностей ЕМС з АД запропоновано використовувати показник відносної зношеності ізоляції та метод складових втрат. Доцільність їх застосування обґрунтована за допомогою математичного моделювання та експериментальних досліджень. Поєднання завдань, енергетичного менеджменту та технічного діагностування ЕМС на основі енергетичного підходу, дозволить на основі контролювання у реальному часі енергетичного і технічного стану забезпечити найефективніше використання фактичного ресурсу з мінімальним споживанням електроенергії та запобігти аварійним режимам.

Список використаної літератури

1. А. Ширман Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А. Ширман, А. Соловьев – Москва 1996, 252 с.
2. В.Н. Костюков Система контроля технического состояния машин возвратно-поступательного действия / В.Н. Костюков, А.П. Науменко // Контроль. Диагностика. – №3. – 2007. – С. 50-59.
3. Браташ О.В. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей. / Браташ О.В., Калинов А.П. // Электромеханика и энергозберігаючі системи. 2010. – Вип. 2/2010 (10). – 78 с.
4. Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler, Farrukh Kamran, Robert G. Barthel «Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring» IEEE transactions on industry applications, vol.31, no. 6, November/December 1995.
5. Петухов В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения. Ч.1 / В. Петухов // «Новости электротехники», №1(49), 2008.
6. Петухов В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока / В. Петухов, В. Соколов // «Новости электротехники», №1(31), 2005.
7. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. / Овчаров В.В. – Киев: Изд-во УСХА, 1990. -110 с.
8. Закладний О.О. Методика функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – №1, – С. 79-84.

O.O. Zakladnyi, A. Lutc

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

DEFINITIONS OF TECHNICAL ELECTROMECHANICAL SYSTEM USING ENERGY

METHODS

Difficulty widespread use of spectral methods of functional diagnosis of electromechanical systems is insufficiently explored some fault of asynchronous motors for the purpose of obtaining diagnostic information and is not standardized diagnostic parameters that characterize electromagnetic, vibration and acoustic processes. Therefore, in recent years as an alternative to consider methods of spectral energy diagnosing techniques. In the article the possibility of determining the technical condition on the basis of diagnostic parameters - power losses in the electromechanical system elements and the relative deterioration of insulation. Mathematical modeling and experimental verification confirmed the adequacy of energy approach to determining malfunctions.

Keywords: electromechanical system, technical condition, diagnosis, relative wear loss of power quality supply voltage, load mode.

References

1. A. Shearman. Practical vibration diagnostics and monitoring of mechanical equipment / A. Shearman, A. Soloviev - Moscow 1996, 252 p.
2. V.N. Kostjukov. Control systems of technical condition of machinery control reciprocating / V.N. Kostjukov, A.P. Naumenko // Control. Diagnostics. - No. 3. - 2007. - P. 50-59.
3. O.V. Bratash. Analysis of vibration diagnostics methods of induction motors. / Bratash O.V., Kalinov A.P. // Electromechanical and energy saving systems. – 2010 - №. 2/2010 (10). - 78 p.
4. Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler, Farrukh Kamran, Robert G. Barthel «Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring» IEEE transactions on industry applications, vol.31, no. 6, November / December 1995.
5. V. Petukhov. Diagnostics motors. Spectral analysis of the magnitude of the current and voltage of the Park. Part 1 / Electrical Engineering News, – №1 (49), 2008.
6. Petukhov V. Diagnosis of the electric motors. Method of spectral analysis of the current consumption / V. Petukhov, V. Sokolov // Electrical Engineering News, – №1 (31), – 2005.
7. Ovcharov V.V. Operating modes and continuous diagnostics of electrical machines in agricultural production. / Ovcharov V.V. - Kiev: Publishing house USKHA, 1990. – 110 p.
8. Zakladnyi O.O. Methods of functional diagnostics asynchronous electric energy // Power engineering: economics, technique, ecology. - 2013. - №1, - P. 79-84.

УДК 621.311.001.57 (063)

О.А. Закладной, канд. техн. наук, доцент, А.О. Луц, студент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Сложность широкого применения спектральных методов функционального диагностирования заключается в том, что недостаточно исследованы отдельные неисправности электромеханических систем на предмет получения диагностической информации и не стандартизированы диагностические параметры, характеризующие электромагнитные, вибрационные и акустические процессы. Поэтому, в последнее время в качестве альтернативы спектральным методам рассматриваются энергетические методы диагностики электромеханических систем. В статье обоснована возможность определения технического состояния на основе диагностических параметров – потерь мощности в элементах электромеханической системы и относительного износа изоляции. Математическое моделирование и экспериментальная проверка подтвердила адекватность энергетического подхода к определению неисправностей.

Ключевые слова: электромеханическая система, техническое состояние, диагностирование, относительный износ, потери мощности, качество напряжения питания, режим нагрузки.

Надійшла 07.04.2016

Received 07.04.2016