

**ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
СИСТЕМ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ**

A. PRAKHOVNIK, A. ZAKLADNYI, O. ZAKLADNYI

**FUNCTIONAL DIAGNOSTIC OF THE
EFFECTIVENESS OF
ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH ASYNCHRO
NOUS MOTORS**

Анотація. Стаття присвячена питанню підвищення рівня енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами. Розглянуто сучасний стан проблеми. Запропоноване рішення полягає в контролюванні у реальному часі енергоефективності електромеханічних систем засобами функціонального діагностування, обслуговуванні за фактичним станом та безперервному захисті під час експлуатації.

Ключові слова: енергоефективність, електромеханічна система, асинхронний двигун, енергетичний стан, технічний стан.

Анотация. Статья посвящена вопросу повышения энергоэффективности электромеханических систем с асинхронными двигателями. Рассмотрено современное состояние проблемы. Предложенное решение заключается в контроле в реальном времени энергоэффективности электромеханических систем средствами функциональной диагностики, обслуживании по фактическому состоянию и непрерывной защите во время эксплуатации.

Ключевые слова: энергоэффективность, электромеханическая система, асинхронный двигатель, энергетическое состояние, техническое состояние.

Annotation. The article is devoted to the question to increasing of energy efficiency exploitation of electromechanical systems with asynchronous motors. Considered the current state of the problem. The offered solution is to monitor real-time energy efficiency of electromechanical systems with facilities of functional diagnostic, servicing actual state and continuous protection during exploitation.

Key words: energy efficiency, electromechanical system, asynchronous motor, the energy state, technical state.

Вступ

Енергозбереження – найважливіше завдання сьогодення. Понад 60% виробленої у світі електричної енергії споживається електромеханічними системами (ЕМС). Частка ЕМС з асинхронними двигунами (АД) становить близько 80% [1,2]. Переважна більшість з них – ЕМС з нерегульованими двигунами. Вартість електроенергії, яку вони споживають протягом строку експлуатації (життєвого циклу), значно перевищує вартість устаткування і витрати на обслуговування [2].

Значна частина промислових установок і механізмів на підприємствах України експлуатуються з перевищенням установленого строку служби, що призводить до їх високої аварійності та виходу з ладу АД [3,4]. Переважна більшість двигунів може ремонтуватися 3–4 рази й після ремонту часто не відпрацьовує навіть одного року, а третина з них – і трьох місяців.

Експлуатація ЕМС з АД, яка супроводжується численними ремонтами, призводить до того, що на підприємствах використовуються АД, реальні енергетичні показники яких значно нижчі декларованих виробником, а середній строк служби двигунів не перевищує 5–7 років. Тим часом АД розраховано на термін служби 15–20 років без капітального ремонту за умови його експлуатації відповідно до ТУ і виконання.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення рівня енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами за рахунок контролювання у реальному часі їх поточних експлуатаційних параметрів та діагностування й оцінювання енергетичного і технічного стану для виявлення неефективних режимів роботи та прийняття обґрунтованих рішень щодо подальшої експлуатації.

Матеріали і результати досліджень. Діагностування енергоефективності ЕМС поєднує завдання технічного діагностування з завданнями енергетичного менеджменту (безперервного аудиту електроенергії, що споживається), основною функцією яких є управління енергоспоживанням та технічним станом [5,6,7,8].

Мета діагностування енергоефективності ЕМС – шляхом контролювання у реальному часі енергетичного і технічного стану забезпечити найефективніше використання фактичного ресурсу з мінімальним споживанням електроенергії та запобігти аварійним режимам. Головним (тактичним) завданням діагностування енергоефективності ЕМС (відповідно до ГОСТ 20911-89) є контролювання її технічного й енергетичного стану, пошук місця і визначення причини відмови, прогнозування працездатності, визначення шляхів і засобів її подовження або відновлення.

Основною причиною низької енергоефективності ЕМС та виникнення аварій є неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, відсутність ефективного безперервного захисту двигунів, несвочасне виявлення і усунення дефектів устаткування, недостатній рівень експлуатації, неякісний ремонт тощо (рис. 1).

Енергоефективність ЕМС прямо пов'язана з її технічним станом. Несправність механізму, наприклад, насосної установки та порушення технологічного режиму (заклинювання підшипників, проривання напірного трубопроводу тощо) призводить до зміни навантаження. З іншого боку, двигун може перебувати у стані прихованої відмови задовго до відпрацювання ним нормативного ресурсу. У цих випадках, а також у разі погіршення якості напруги живлення, знижуються ККД і коефіцієнт потужності двигуна.

Запропоновано використовувати показники енергоефективності – ККД та коефіцієнт потужності АД для визначення енергетичного і технічного стану ЕМС з урахуванням режиму навантаження та погіршення якості напруги живлення. Для деталізації визначення технічного стану АД пропонується використовувати показник відносного зношування ізоляції та аналіз значень втрат у його окремих вузлах.

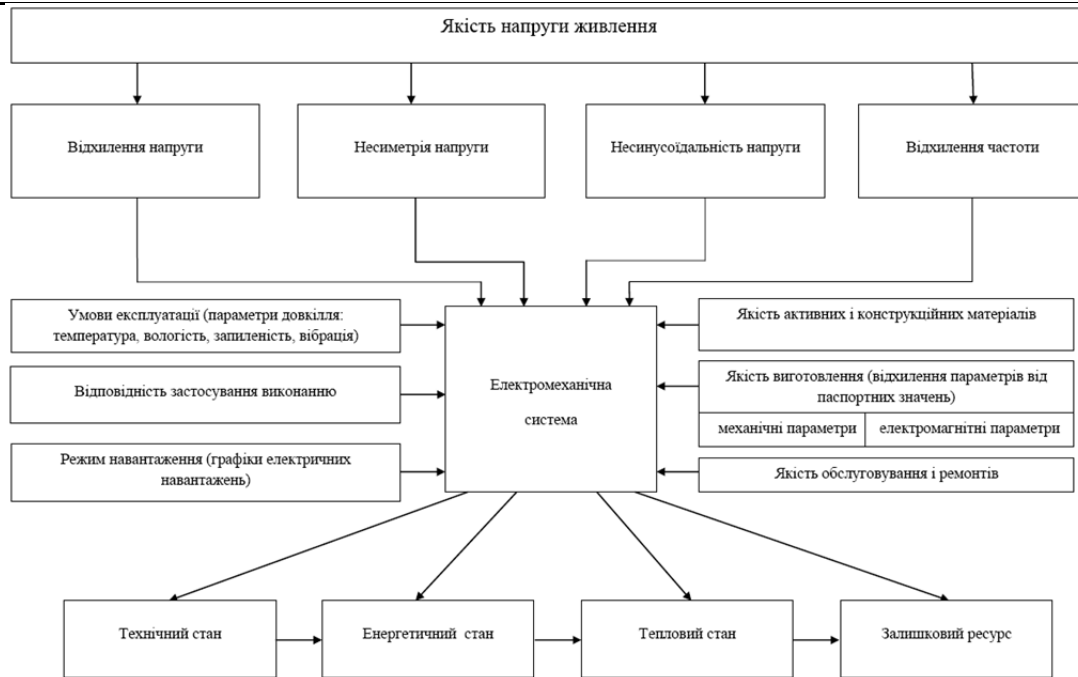


Рис. 1. Фактори впливу на енергоефективність та технічний стан ЕМС

Однією з причин зниження рівня енергоефективності ЕМС є низька якість напруги живлення. Виникають додаткові втрати потужності від несиметрії $\Delta P_{НСМ}$ і несинусоїдальності напруги $\Delta P_{НС}$, і в цьому випадку ККД знижується:

$$\eta' = \frac{P}{P + K + V_1 + V_2 + \Delta P_{1H} k_{3I}^2 + \Delta P_{НСМ} + \Delta P_{НС}}$$

де η' – ККД за умови неякісної напруги живлення;
 K – постійні втрати;
 V_1, V_2 – змінні втрати в статорі і роторі відповідно;
 $\Delta P_{1H} k_{3I}^2$ – додані втрати.

Зниження ККД за рахунок неякісної напруги живлення $\Delta \eta_u$ і незадовільного технічного стану $\Delta \eta_T$ ЕМС з АД відповідно :

$$\Delta \eta_u = \eta_e - \eta', \Delta \eta_T = \eta_{min} - \eta_\phi$$

Важливим є врахування впливу несиметрії напруги на потужність АД. Коефіцієнт завантаження k'_3 , який враховує зниження рівня номінальної потужності двигуна P'_H від несиметрії напруги живлення,

$$k'_3 = \frac{P}{P'_H} = \frac{100P}{P_H(100 - k_{2U}^2)} = \frac{100k_3}{100 - k_{2U}^2}$$

Умови енергоефективної роботи ЕМС з АД відповідно до вимог державних стандартів ГОСТ 28173 (МЭК 60034-1), ДСТУ 3886-99:

$$\begin{cases} \eta_e(k_3) - 0,15(1 - \eta_n) \leq \eta_\phi \leq \eta_e(k_3), \\ \cos\phi_e(k_3) - \frac{1 - \cos\phi_n}{6} \leq \cos\phi_\phi \leq \cos\phi_e(k_3), \\ (0,7 \dots 0,75) \leq k_{3\phi} < 0,9. \end{cases}$$

де $\eta_e(k_3), \cos\phi_e(k_3)$ – еталонні (паспортні) характеристики ККД та коефіцієнта потужності;
 $\cos\phi_\phi, \eta_\phi$ – фактичні (визначені) значення ККД та коефіцієнта потужності;
 η_{min}, k_{3min} – найменші значення ККД та коефіцієнта завантаження для області енергоефективної роботи.

Еталонні характеристики представлені залежностями $\eta_e(k_3)$ і $\cos\phi_e(k_3)$, а фактичним значенням ККД і коефіцієнта потужності відповідають точки з координатами $k_{3\phi}, \eta_\phi$ та $k_{3\phi}, \cos\phi_\phi$ відповідно (рис. 2). Залежно від того, в яку область потрапляє точка з координатами $k_{3\phi}, \eta_\phi$ та

$k_{3\phi}, \cos\phi$, робиться висновок про рівень енергоефективності ЕМС з АД. Можливі рівні енергоефективної роботи ЕМС з АД наведено в табл. 1. Використовуючи залежність $\cos\phi_e(k_3)$, можна отримати подібну таблицю також для процесу енергоспоживання.

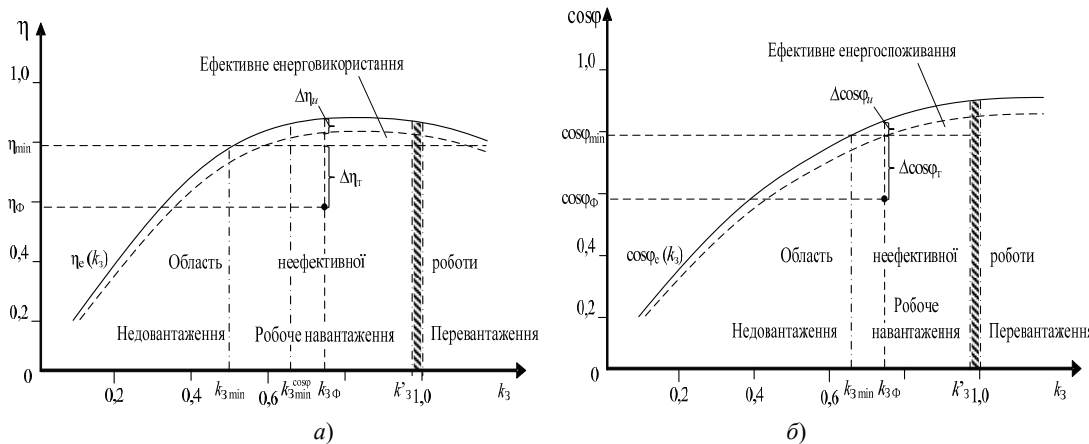


Рис. 2 Области ефективного енерговикористання (а) і енергоспоживання (б) ЕМС з АД

В інституті енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ» створено мобільний програмно-апаратний комплекс (МАК), який дозволяє автоматизувати процес функціонального діагностування енергоефективності ЕМС (рис. 3). Комплекс може встановлюватися безпосередньо на клемній коробці двигуна, який діагностується, без будь-якого порушення режиму його роботи або на електрощитку живлення.

Комплекс реалізовано на основі датчиків струму, напруги, температури, комутаційного пристрою з аналого-цифровим перетворювачем, персонального комп'ютера та розроблених алгоритмів і програмного забезпечення. У результаті формуються протоколи діагностування, та визначаються енергетичний стан і залишковий ресурс ЕМС у відповідності до розроблених моделей і методик [9]. Комплекс може використовуватись для експериментальних досліджень і для роботи в режимі комп'ютерного експерименту.

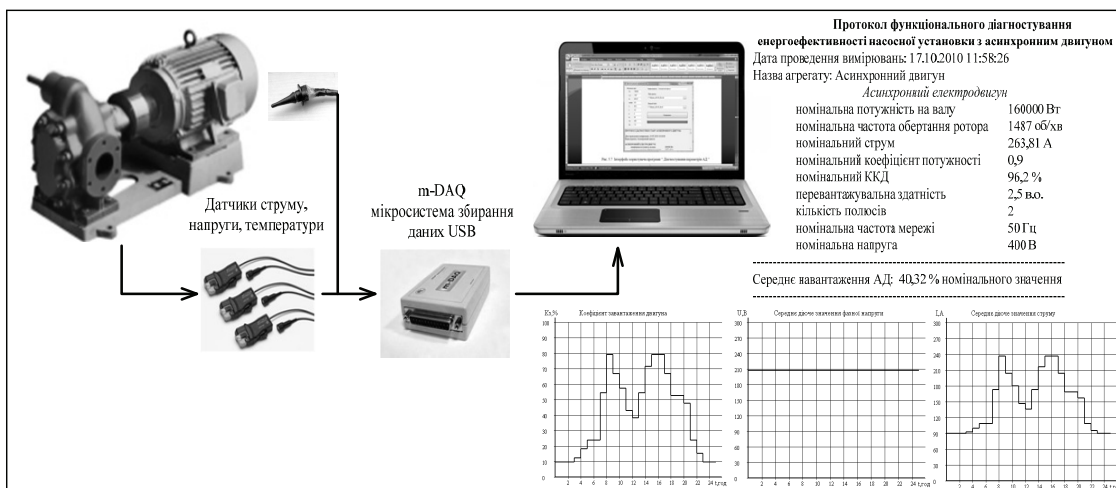


Рис. 3. Мобільний програмно-апаратний комплекс для функціонального діагностування енергоефективності ЕМС з АД

Послідовність діагностування ЕМС з АД така (рис. 4): вимірювання діагностичних параметрів $u(t), i(t), t^0$; визначення первинних діагностичних ознак; струмовий захист; визначення показників якості електроенергії (ПЯЕ); спектрально-струмовий аналіз; визначення параметрів процесу енергоспоживання і робочих параметрів; діагностування технічного стану; визначення параметрів процесу енерговикористання; діагностика енергетичного стану; визначення параметрів теплової моделі й захисту, залишкового ресурсу, енергії, що споживається, її втрат; встановлення наступного строку діагностування.

Аналіз факторів впливу на енергоефективність і технічний стан ЕМС з АД доводить

доцільність використання як інформативних діагностичних саме їх електричних параметрів (миттєві значення напруги і струмів фаз) та врахування температури довкілля для корекції прогнозу залишкового ресурсу.

Спочатку аналізується діагностичний параметр, від зміни величини якого залежить решта параметрів та інформація про який не потребує уточнень за допомогою інших перевірок. Для АД доцільно спочатку аналізувати зміну напруги на обмотках статора, а потім – струм. Контроль напруги фазних обмоток за ПЯЕ дозволяє виявляти можливі несиметричні й аварійні режими роботи двигуна. Зміна параметрів живильної мережі призводить до зміни струму статора. Навпаки, якщо досліджувати спочатку струм, то без додаткових перевірок параметрів, які впливають на нього (величини навантаження, відхилення ПЯЕ від припустимих тощо) неможливо однозначно встановити причину його зміни.

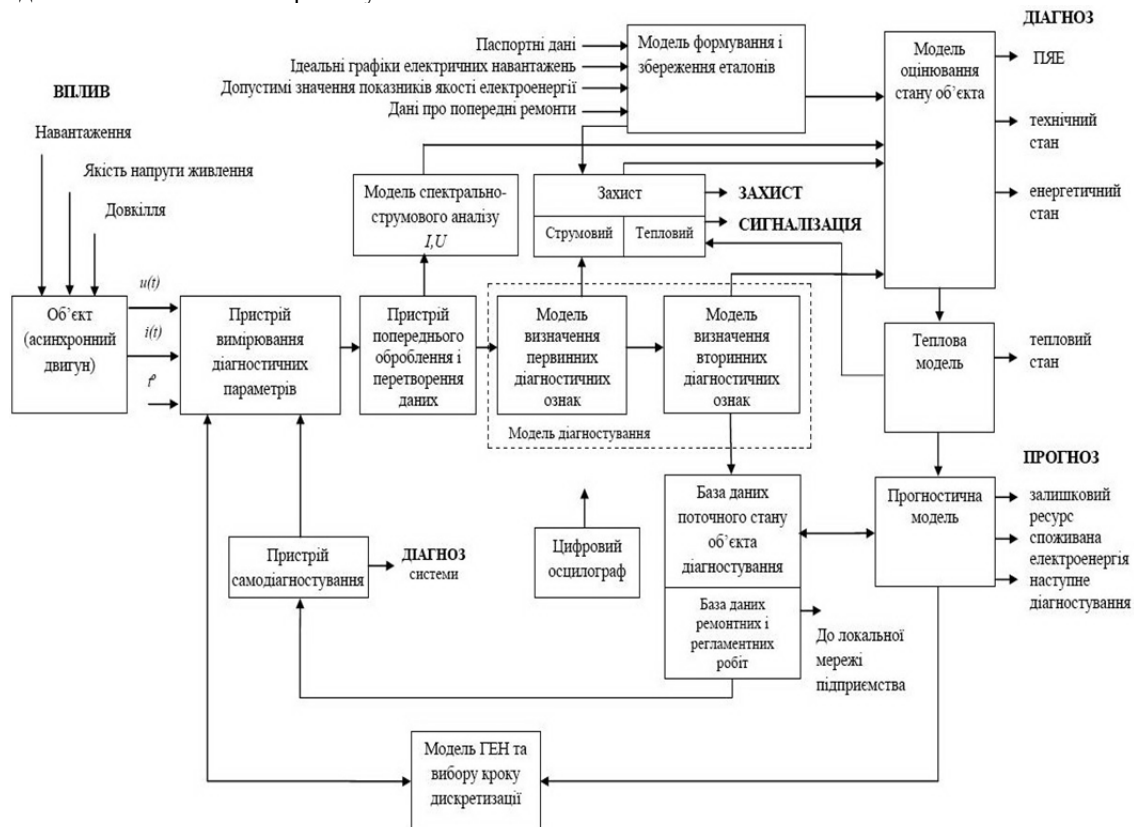


Рис. 4 Структурна схема функціонального діагностування енергоефективності ЕМС

Перевищення діючого значення номінального струму в усталеному режимі є діагностичною ознакою теплового процесу, оскільки визначає нагрівальні втрати в обмотках, а миттєвого значення – для струмового захисту [10]. Крім цього, застосувавши метод спектрально-струмового аналізу, можна виявити механічні дефекти, що розвиваються, заздалегідь, до виникнення аварії.

Модель визначення первинних діагностичних параметрів АД у відповідності до алгоритмів перетворювання інформації формує компоненти вектора первинних діагностичних ознак (U, I, P, φ, f). Розрахунок вторинних діагностичних ознак здійснюється за діагностичними параметрами, а визначення аварійних режимів, діагностування енергетичного і технічного стану, прогнозування залишкового ресурсу – шляхом аналізування первинних і вторинних діагностичних ознак. Визначенню енергетичного стану і прогнозуванню передують визначення аварійних режимів (у випадку аварії подальші дії недоцільні).

Процедура діагностування містить операцію порівняння поточних значень діагностичних параметрів з їх еталонними значеннями. Модель формування і збереження еталонів на основі паспортних даних АД, ідеальних графіків електричних навантажень (ГЕН), допустимих і граничних значень ПЯЕ, даних про попередні ремонти формує еталонні значення інформативних параметрів. На основі поточних значень параметрів діагностичної моделі і еталонних в моделі оцінювання стану двигуна виконується процедура прийняття рішення про приналежність до

заздалегідь визначеного класу станів.

Першим етапом розпізнавання стану є порівняння поточних параметрів діагностичної моделі з їх допустимими і граничними значеннями для визначення неприпустимого або аварійного стану АД. Другий етап – визначення технічного й енергетичного стану АД. На цьому етапі в ознаковому просторі формуються області, що відповідають особливим станам двигуна – гранично припустимому значенню параметра технічного стану, передаварійній ситуації або припиненню нормального функціонування.

Аналіз трендових характеристик параметрів діагностичної моделі дає можливість оцінювати тенденції зміни стану АД, тобто прогнозування його остаточного ресурсу, споживаної електроенергії протягом життєвого циклу і строку наступного діагностування. Для цього застосовуються теплова й прогностична моделі, а також бази даних поточного стану двигуна та ремонтних і регламентних робіт.

Аналітична перевірка створених моделей і методик діагностування енергоефективності ЕМС з АД та результати моделювання на ЕОМ у середовищі MATLAB енергетичних показників (складових повної потужності, коефіцієнта потужності, втрат, ККД) АД промислової серії 5А показали високу відповідність результатів розрахунків до експериментальних даних виробника. Відносні похибки розрахунку узагальнених діагностичних параметрів не перевищують 3% для ККД і 6% для коефіцієнта потужності, що цілком достатньо для інженерної практики.

За допомогою МАК під час енергоаудиту було здійснено експериментальне дослідження роботи насосної установки з АД (рис.5 і 6). Номінальні дані АД насосної установки:

$$P_H = 7,5 \text{ кВт}, n_H = 1450 \text{ об/хв}, I_H = 15,3 \text{ А}, \eta_H = 87,5\%, \cos \varphi_H = 0,85, \lambda = 2,8.$$

Строк служби – 20 000 год. Усталене відхилення напруги – 5%, коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності – 1%, зношення – 11240 год.

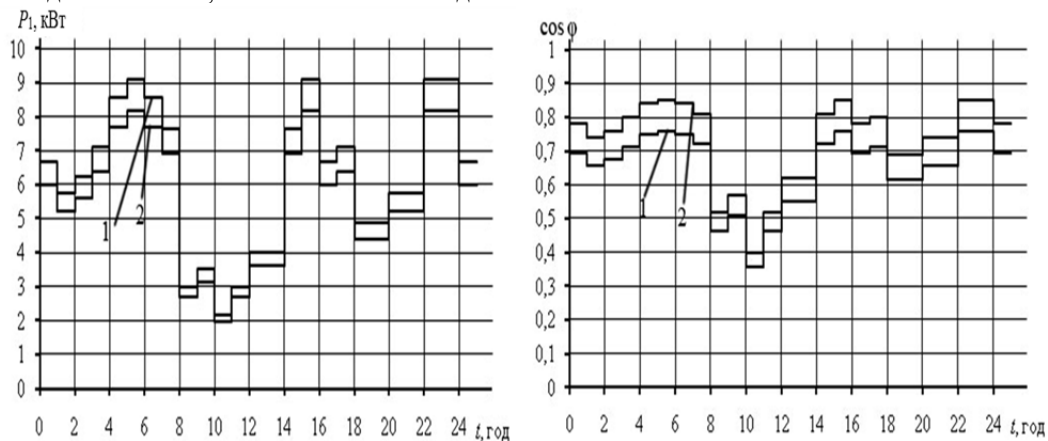


Рис. 5. ГЕН та коефіцієнт потужності насосної установки:

1 – фактичні; 2 – еталонні

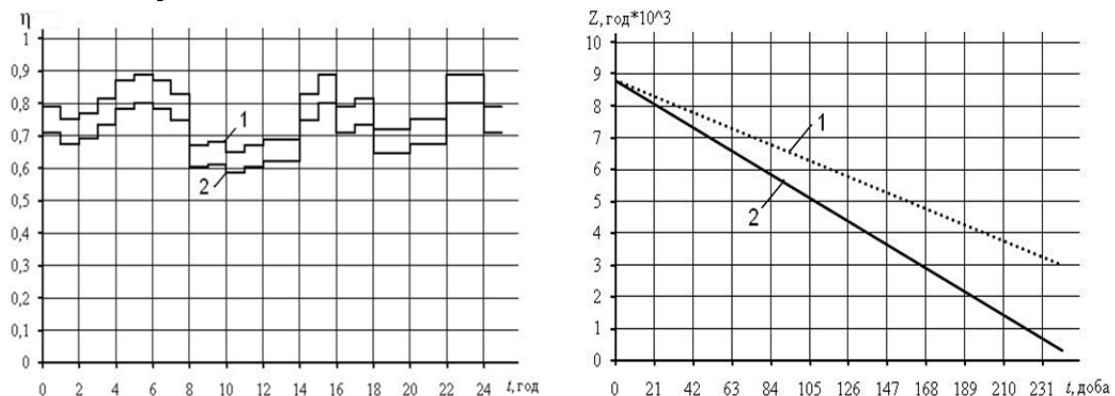


Рис. 6. ККД та залишковий ресурс насосної установки:

1 – еталонні; 2 – фактичні

Впровадження розроблених засобів функціонального діагностування енергоефективності ЕМС з АД дозволить за середнього експлуатаційного строку роботи 10 років зекономити близько

10% електроенергії, що споживається, а також заощадити до 50% коштів на сервіс та ремонт.

Висновки

Авторами розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення рівня енергоефективності ЕМС з АД. Запропоновано рішення, яке полягає в контролюванні у реальному часі енергоефективності ЕМС засобами функціонального діагностування, обслуговуванні за фактичним станом та безперервному захисті під час експлуатації. Математичний апарат діагностування поєднує методи аналізування миттєвих значень струмів і напруг АД, температури докільця й дозволяє визначати енергетичний і технічний стан ЕМС та прогнозувати залишковий ресурс, з методом спектрально-струмового аналізу, що надає можливість завчасного виявлення механічних ушкоджень двигуна та пов'язаного з ним механізму.

Література

1. Закладний О.М. Енергозбереження засобами промислового електроприводу: Навчальний посібник / О.М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
2. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсозбережение: Учебное пособие для студ. высш. уч. заведений / Н.Ф. Ильинский, В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.
3. Вовк О.Ю. Метод періодичного діагностування асинхронних двигунів/ О.Ю. Вовк, Л.М.Безменнікова, С.О. Квітка // Праці ТДАТУ. – 2010. - № 10, Т4. - С. 39-46.
4. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: Учебное пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М.М. Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
5. Bulletin of industrial energy efficiency and energy management standarts [“Vienna Energy Efficiency and Climate Meetings”], (Вена, Австрія, 19-22 березня 2007 р.) / United Nations Industrial Development Organization. - Vienna, Austria, 2007. – 150 с.
6. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України. / [Праховник А.В., Прокопенко В.В., Дешко В.І. та ін.]. – Луганськ: вид-во "Місячне сяйво", 2009. - 696 с.
7. Праховник А.В. Функціональне діагностування енергетичної ефективності асинхронного електроприводу промислових установок і механізмів протягом життєвого циклу / А.В.Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. № 28. С. 495-497.
8. Праховник А.В. Контроль та аналіз в реальному часі режимів енерговикористання промислових електроприводів / А.В. Праховник, О.М. Закладний, О.О. Закладний // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». - 2007. С. 151-155.
9. Закладний О.О. Оцінка залишкового ресурсу асинхронного електроприводу // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2010, - Вип. 19. С. 137-146.
10. Закладний О.О. Захист як одне із завдань системи моніторингу енергетичного стану асинхронного електроприводу // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. 2010, № 4/2010 (63), частина 2, С. 135-138.