

# ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

А. ЗАКЛАДНИЙ, О. ЗАКЛАДНИЙ, В. ПЕРМІЯКОВ

## TECHNICAL EQUIPMENT FUNCTIONAL DIAGNOSTIC ENERGY EFFICIENCY OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

**Анотація.** Статтю присвячено питанням розробки технічних засобів функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем. Запропоновано принципи побудови і структурні схеми систем функціонального діагностування, а також мобільний програмно-апаратний комплекс МАК, який дозволяє автоматизувати процес діагностування.

**Ключові слова:** енергоефективність, електромеханічна система, система функціонального діагностування.

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам разработки технических средств функциональной диагностики энергоэффективности электромеханических систем. Предложены принципы построения и структурные схемы систем функциональной диагностики, а также мобильный программно-аппаратный комплекс МАК, который позволяет автоматизировать процесс диагностирования.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, электромеханическая система, система функционального диагностирования.

**Annotation.** The article is devoted to the development of technical equipment energy efficiency of functional diagnosis of electromechanical systems. The principles of construction and block diagrams of systems of functional diagnostics, as well as a mobile equipment range of software and MAC, which allows automate process of diagnosis.

**Key words:** energy efficiency, electromechanical system, system of functional diagnosis.

### Вступ

Основними причинами низької енергоефективності електромеханічних систем (ЕМС) та виникнення аварій є відхилення від номінальних режимів експлуатації, неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про їх технічний стан, несвочасне виявлення і усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт. Робота електропривода ЕМС у таких умовах призводить до значних втрат, зниження ККД та коефіцієнта потужності. Встановлюється неефективний баланс складових потужності (зі збільшеним рівнем реактивної) в живильних мережах, зростає рівень енергоспоживання ЕМС, і збільшується споживання реактивної потужності [1,2].

Найближчими за функціональною побудовою до систем діагностування енергоефективності ЕМС є електронні системи обліку електричної енергії та системи вимірювання якості електроенергії на основі промислових засобів автоматизації. Отримали розвиток системи

контролю та керування, спрямовані на підтримання ефективного функціонування ЕМС. Зарубіжні фірми Nippon Steel, Siemens, ABB мають стенди для випробувань електропривода. Однак, володіючи розвиненими функціями вимірювання та оброблення даних, вони не забезпечують аналізування отриманої інформації про енергетичні процеси і не призначені для діагностування енергоефективності ЕМС, оскільки не мають функцій математичного моделювання та програмування.

**Мета роботи.** Метою роботи є розроблення технічних засобів функціонального діагностування для підвищення рівня енергоефективності електромеханічних систем шляхом 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.

**Постановка задачі.** Для досягнення мети важливо вирішити такі завдання:

- визначення принципів побудови технічних засобів функціонального діагностування енергоефективності ЕМС;
- розроблення схемотехнічних рішень систем функціонального діагностування енергоефективності ЕМС;
- створення мобільного програмно-апаратного комплексу для автоматизації процесу діагностування енергоефективності ЕМС.

**Матеріали і результати досліджень.** Для реалізації завдань функціонального діагностування енергоефективності ЕМС розроблено схемно-технічні рішення в основу яких покладено методологію бенчмаркінгу енергоефективності з наступними основними принципами.

Принцип достатності регламентує вибір мінімальної кількості діагностичних параметрів процесів, якими супроводжується робота ЕМС, без порушення умови достатності інформації щодо енергетичного та технічного стану об'єктів.

Принцип інформаційної повноти відображає обмеженість знань про технологічну установку і полягає в тому, що крім діагностичних ознак використовується також залишковий "шум".

Принцип корекції неідеальності вимірювальних каналів обчислювальними методами на ЕОМ (нелінійності датчиків, амплітудно-фазових характеристик узгоджувально-перетворювальних каналів тощо).

Принцип самодіагностування забезпечує полегшене введення системи діагностування в експлуатацію, простоту обслуговування, високу метрологічну і функціональну надійність засобів, їх виживання і пристосованість до реальних умов, що постійно змінюються.

Принцип дружності інтерфейсу за максимальної інформаційної ємності забезпечує достовірне сприйняття оператором стану технологічної установки з одного погляду на монітор.

Принцип інваріантності регламентує вибір діагностичних ознак, інваріантних до типу технологічної установки і форми зв'язку з параметрами її енергетичного й технічного стану, що забезпечує застосування самонавчальних рангових процедур безеталонного діагностування та прогнозування ресурсу.

Принцип структурної гнучкості і програмованості забезпечує реалізацію оптимальної паралельно-послідовної структури діагностування, виходячи з критеріїв необхідної швидкодії за мінімальної вартості.

Принцип багаторівневої організації забезпечує можливість роботи з засобами діагностування фахівцям різного рівня кваліфікації та відповідальності, а також дозволяє використовувати фаховість персоналу в міру підвищення його кваліфікації. Завдяки наявності мережевої підтримки локальні пристрої діагностування енергоефективності поєднуються в загальну діагностичну мережу, до якої підімкнено комп'ютери технагляду і користувачів – головних механіків, інженерів і підприємства в цілому. Такий багаторівневий контроль забезпечує оптимізацію електроспоживання ЕМС та їх безпечну експлуатацію. Головне завдання діагностичної мережі - організація автоматизованої системи діагностування енергоефективності, енергетичного менеджменту і аудиту всього підприємства, коли в оперативній службі автоматично накопичуються дані про енергоефективність та стан обладнання, що забезпечує постійний розвиток і вдосконалення таких систем.

Аналіз принципів функціонування діагностичних систем дозволяє окреслити структурні елементи схеми (рис. 1).

Пристрій вимірювання діагностичних параметрів містить три вимірювальних вузли з лінійними амплітудно-частотними характеристиками: трансформатори напруги або подільники

для вимірювання напруги; рознімні струмові датчики; датчик температури довкілля. Часові аналогові сигнали трифазних напруг і струмів, отримані від датчиків, містять завади, а також надлишкову інформацію, яка характеризує роботу окремих вузлів діагностованого двигуна та їх взаємодію. Пристрій попереднього оброблення і перетворення даних виділяє корисний сигнал за допомогою детектування й фільтрації. Пристрої вимірювання, попереднього оброблення і перетворення даних формують сигнали діагностичних параметрів для моделей – діагностування, спектрально-струмового аналізу і визначення показників якості електроенергії – ПЯЕ (рис. 2).

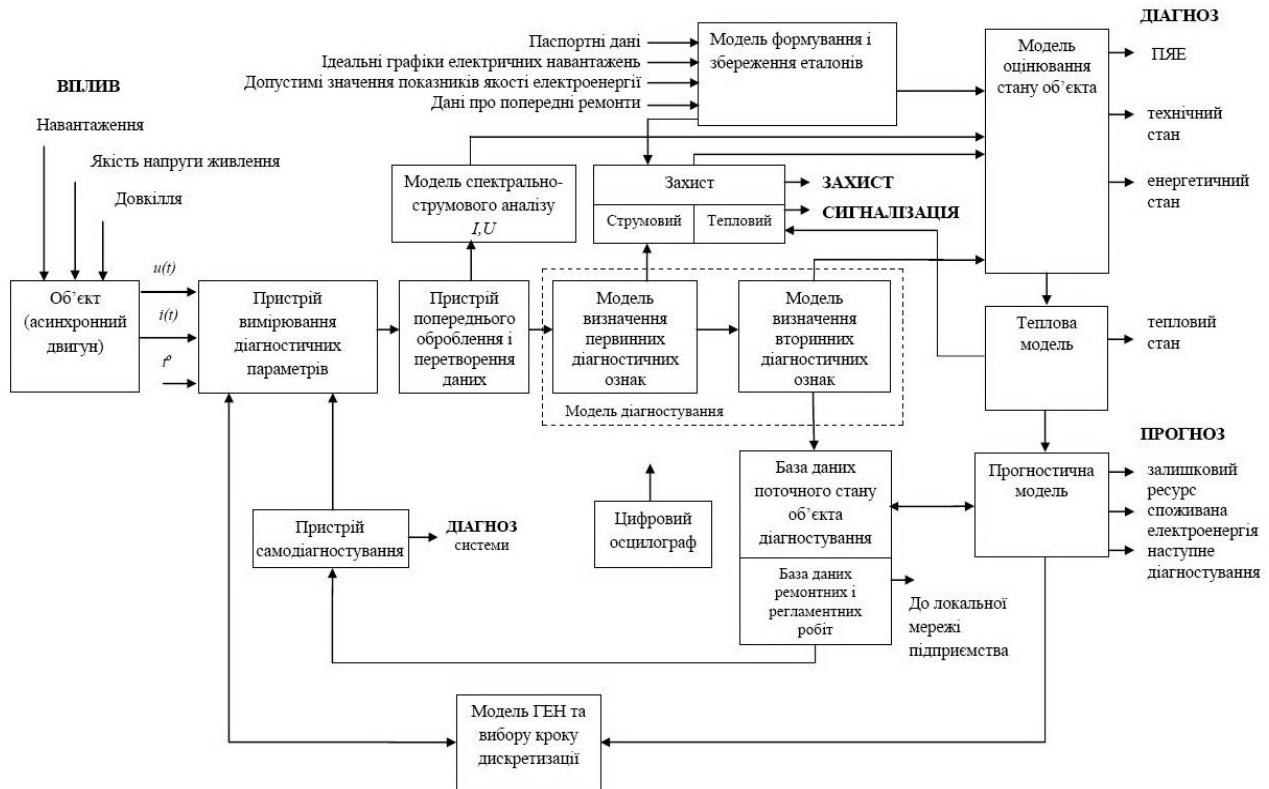


Рис. 1. Структурна схема системи функціонального діагностування енергоефективності ЕМС



Рис. 2. Структурна схема пристроїв вимірювання, попереднього оброблення і перетворення діагностичних параметрів для однієї фази двигуна

Для діагностичного аналізу потрібні середньоквадратичні значення (СКЗ) напруги і струму фаз. Кут зсуву  $\varphi$  в кожній фазі двигуна і частота мережі  $f$  визначаються програмно. Алгоритм вимірювань та вибір кроку дискретизації визначаються за моделлю графіка електричних навантажень (ГЕН) і коригуються прогностичною моделлю.

Для спектрально-струмового аналізу реєстрація струму і напруги здійснюється протягом часу кратного періоду основної частоти, необхідного для виконання спектрального аналізу, на частотах до 10 кГц [150]. Вимірювання виконується декілька раз на частотах 0,01–0,1 Гц. Сигнали пропускаються крізь фільтр нижніх частот з частотою зрізу вищою від найбільшої частоти корисного сигналу, що необхідно для запобігання завадам. Це зумовлено тим, що результати вимірювань не є неперервною функцією, а являють собою вибірку значень з певним кроком аргументу в часі.

Аналоговий сигнал подається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), у якому він перетворюється на цифровий, і далі – на ЕОМ. За допомогою моделі спектрально-струмового аналізу формуються спектри векторів Парка струму і напруги. В результаті аналізування модулів векторів Парка струму і напруги виявляються лінії, відсутні в спектрі напруги, але наявні в спектрі струму. Невідповідність вказаних спектрів свідчить про наявність ушкоджень в діагностованому двигуні.

Алгоритми вимірювання ПЯЕ визначено ГОСТ 13109-97. Фазні й міжфазні відхилення напруги, а також коефіцієнти несиметрії розраховуються за напругою основної частоти. Вхідна оцифрована напруга виражається за допомогою розкладення Фур'є у вигляді спектру гармонік кратних основній частоті. За виділеною в такий спосіб напругою основної частоти методом симетричних складових у трифазній мережі розраховуються напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей. Відхилення напруги та її несиметрію в трифазній мережі розраховують відносно напруги основної частоти й прямої послідовності.

АЦП перетворює аналогові сигнали напруги і струму в цифрову форму, причому найвища частота дискретизації сигналів потрібна для визначення ПЯЕ. За один період (0,02с) основної частоти виконується 256 вимірювань, що дозволяє з достатньою точністю визначити діюче значення гармонічної складової вхідної напруги 40-го порядку, частота якої 2 кГц. З отриманих на кожному періоді діючих значень гармонічних складових від 1-ї (50 Гц) до 40-ї гармоніки розраховується середнє на  $i$ -му інтервалі. Тривалість цього інтервалу вибирається такою, що дорівнює 8–16 періодам основної частоти (0,16-0,32 с), і визначає тривалість «вікна вимірювання». Значення того або іншого параметра обчислюється як СКЗ за кількома вимірами.

Модель визначення первинних діагностичних параметрів, наприклад, асинхронного двигуна (АД) у відповідності до алгоритмів перетворювання інформації формує компоненти вектора первинних діагностичних ознак ( $U, I, P, \varphi, f$ ). Однак цієї інформації недостатньо для висновку про стан двигуна, і первинні діагностичні параметри не можуть бути використані для визначення дефектів на стадії їх зародження. Необхідні додаткові обчислення виконуються моделями визначення вторинних діагностичних ознак (ПЯЕ, параметрів процесу енергоспоживання, схеми заміщення, робочих параметрів, параметрів процесу енерговикористання), які є інформативними параметрами діагностичної моделі, що характеризують поточний стан двигуна.

Модель формування і збереження еталонів на основі паспортних даних АД, ідеальних 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. У випадку перевищення струмом двигуна порогового значення, а також при перевищенні температури спрацьовує захист, сигналізація, і формується сигнал на відключення.

Другий етап – визначення технічного й енергетичного стану АД. На цьому етапі в ознаковому просторі формуються області відповідні особливим станам двигуна – гранично припустимому значенню параметра технічного стану, передаварійній ситуації або припиненню нормального функціонування.

Аналіз трендових характеристик параметрів діагностичної моделі дає можливість оцінювання 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.

Вимірювання струмів і напруг та їх аналіз виконуються з деякою періодичністю відповідно до режиму роботи АД, його ГЕН і коригуються прогностичною моделлю в залежності від його технічного стану. Результати вимірювань і аналізу заносяться в базу даних, за якою контролюється розвиток ушкоджень у часі, і визначається остаточний ресурс двигуна [3].

В результаті створення і регулярного поповнення бази даних вимірювань і результатів їх аналізу, в процесі експлуатації устаткування можливо простежити динаміку фактичного розвитку окремих ушкоджень і прогнозувати їх подальший розвиток. Моніторинг напруги дозволяє уточнювати прогноз розвитку ушкоджень, зумовлених якістю напруги живлення.

Запропоновано два шляхи побудови технічних засобів функціонального діагностування енергетичної ефективності ЕМС.

Перший шлях полягає в створенні автономного промислового мікропроцесорного пристрою, оснащеного датчиками струму, напруги й температури, АЦП, пам'яттю, дисплеєм, клавіатурою, пультом керування тощо (рис. 3). Мікропроцесорна система виконує вимірювання, оброблення їх результатів, відображення даних на дисплеї і виведення на друк. Передавати результати обчислень на ПЕОМ для подальшого оброблення можливо через інтерфейси RS232 або знімний носій інформації.

Пристрій попереднього оброблення і перетворення даних, наприклад, Analog Devices містить мультиплексор на 16 каналів, 16-розрядний АЦП з частотою вибірки до 200 кГц і програмований таймер. Перетворювач має вбудовані кола захисту від перенапруг, фільтр захисту від накладання спектрів, АЦП послідовного наближення, програмований цифровий фільтр, паралельний та послідовний інтерфейси. Обмін даними з мікроконтролером, наприклад, фірми NXP Semiconductors на базі ядра ARM7 архітектури Cortex, можливий програмним шляхом, з перериванням і в режимі прямого доступу до пам'яті (використовується для оброблення сигналів у реальному часі). Мікроконтролер має стандартні порти (RS232/422/485, PS/2, паралельний), інтерфейси (VGA, EIDE, Ethernet IEEE, магнітних накопичувачів) тощо.

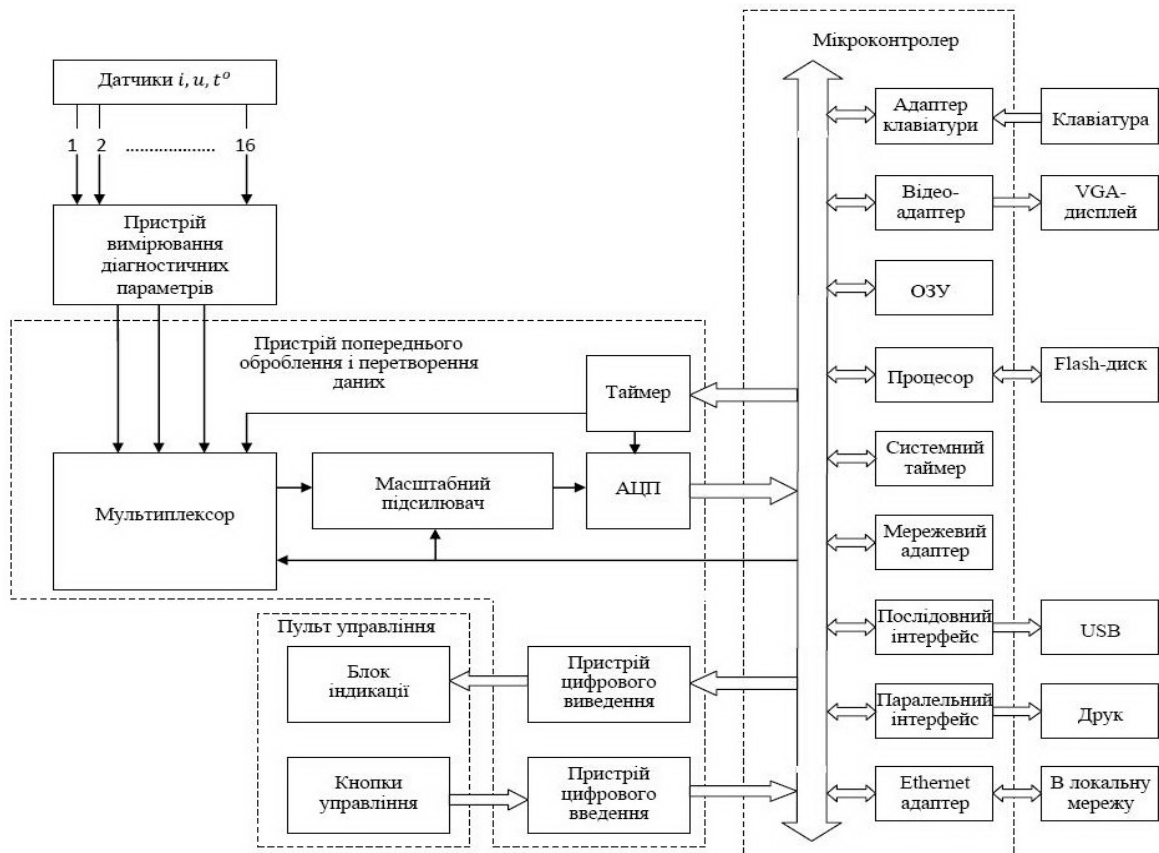


Рис.3. Структурна схема діагностування на основі промислового автономного мікропроцесорного пристрою

Вказані характеристики дозволяють використовувати пристрій для проведення тривалого безперервного діагностування ЕМС в умовах промислових приміщень, без участі оператора. Використання промислових засобів автоматизації, які легко поєднуються один з одним, робить систему апаратно гнучкою і відкритою для модернізації.

У другому випадку програмно-апаратний комплекс містить ПЕОМ, на яку покладаються всі функції програмної частини діагностувальних засобів. Сполучення ПЕОМ з вимірювальними датчиками виконується за допомогою комутаційного пристрою з АЦП, який перетворює аналогові сигнали на цифрові.

Для реалізації на апаратному рівні завдань функціонального діагностування енергоефективності ЕМС розроблено мобільний програмно-апаратний комплекс (МАК). МАК дозволяє автоматизувати процес функціонального діагностування енергоефективності ЕМС і може встановлюватися безпосередньо на клемній коробці двигуна, який діагностується, без будь-якого порушення режиму його роботи або на електрощитку живлення (рис. 4).

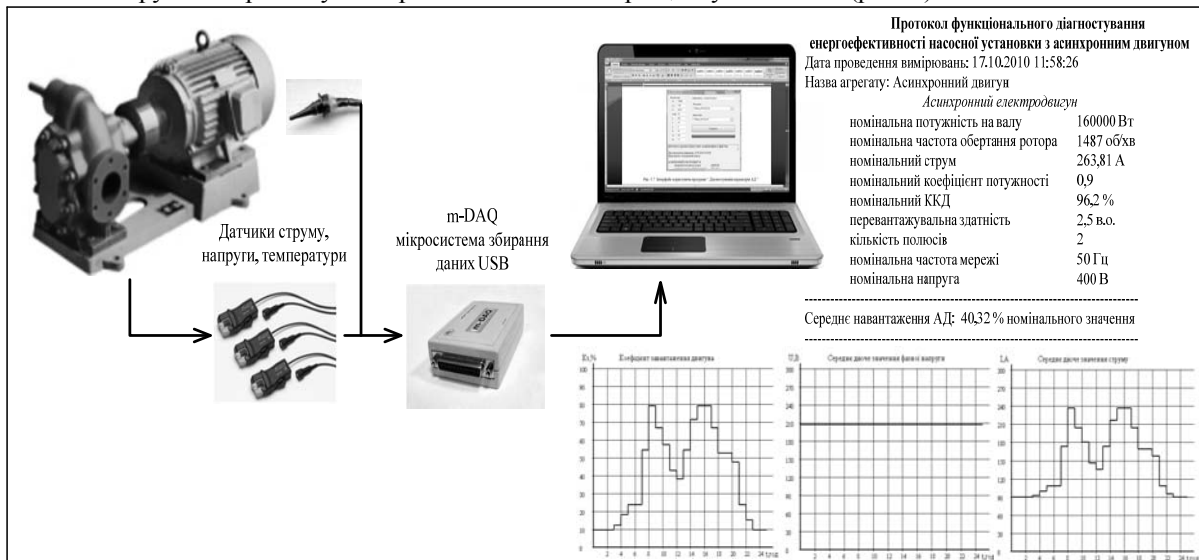


Рис. 4. Мобільний програмно-апаратний комплекс для функціонального діагностування енергоефективності ЕМС

Такий принцип побудови має істотні переваги: можливість прискореного розроблення пристрою – апаратна частина зведена до мінімуму; застосування потужних процесорів для оброблення сигналів у реальному часі; програмне забезпечення мовами високого рівня; можливість застосування стандартних засобів введення-виведення і накопичувачів інформації; дрібносерійний характер виробництва робить економічно виправданою структурну надлишковість і відносно високу вартість компонентів.

За допомогою МАК під час энергоаудиту було здійснено експериментальне дослідження роботи насосної установки з АД [4]. Номінальні дані АД насосної установки:

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

Строк служби - 20 000 год. Усталене відхилення напруги - 5%, коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності - 1%, зношення - 11240 год. Результати дослідження, еталонні та фактичні характеристики насосної установки, наведено на рис. 5.

Як видно з рис. 5, залишковий ресурс АД становить 5840 год, а для роботи в номінальному режимі – 8760 год. Відносне зношення становить 1,5, що свідчить про передаварійний режим роботи двигуна. Застосування функціонального діагностування енергоефективності ЕМС дозволить знизити споживання активної енергії на 10%, реактивної - на 30%, підвищити в 1,5 рази залишковий ресурс до паспортного його значення, ККД - на 8%, коефіцієнт потужності - на 9%, знизити втрати на 33%.

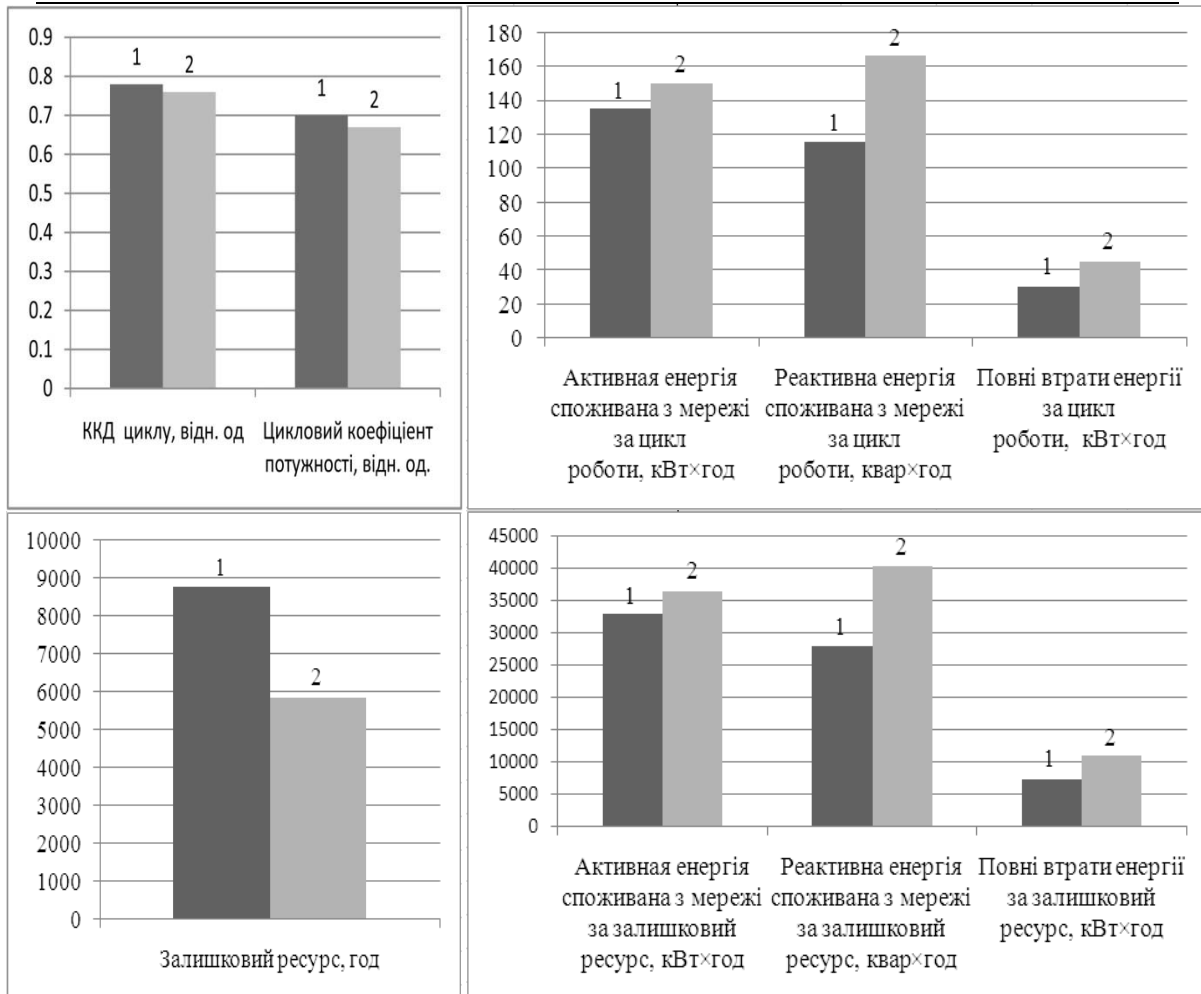


Рис. 5. Результати дослідження насосної установки:  
1 – еталонні значення; 2 - фактичні

### Висновки

Авторами розв'язано актуальні науково-практичні завдання розроблення принципів побудови і схемно-технічних рішень систем функціонального діагностування енергоефективності ЕМС. Створено мобільний програмно-апаратний комплекс для автоматизації процесу діагностування енергоефективності ЕМС.

Запропоновано рішення, яке полягає в контролюванні у реальному часі енергоефективності ЕМС засобами функціонального діагностування. Математичний апарат діагностування поєднує методи аналізування миттєвих значень струмів і напруг електропривода, температури доквілля 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. Праховник А.В., Закладний О.М., Закладний О.О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2011. №1. С. 66-72.
2. Закладний О.М. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник / О.М. Закладний, А.В. Праховник, О.І. Соловей – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
3. Закладний О.О. Оцінка залишкового ресурсу асинхронного електропривода // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2010, - Вип. 19. С. 137-146

- 
4. Праховник А.В., Закладний О.М., Закладний О.О. Діагностування енергоефективності електромеханічних систем як інструмент енергоменеджменту // ВІСНИК Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2011, - Вип. 21. С. 121-128.
- 
- 
- 
-