

## СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ, МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ РЕСУРСОМ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ОСНОВІ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ. ПІДСУМКИ РОБОТИ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАУКОВОГО НАПРЯМУ

*Калінов А.П., к.т.н., доц.*

*Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського  
39600, м. Кременчук, Полтавська обл., вул. Першотравнева, 20*

*E-mail: [scenter@polytech.poltava.ua](mailto:scenter@polytech.poltava.ua)*

**Вступ.** Електромеханічне обладнання енергетичного, промислового та агропромислового комплексу здебільшого знаходиться в експлуатації на протязі десятиліть. Продовження строку працездатності та ефективної експлуатації в режимах оптимального енергоспоживання можливе за умови визначення його реальних характеристик, оцінки та зберігання або збільшення експлуатаційного ресурсу роботи. Така задача вирішується за рахунок застосування систем оцінки ресурсу роботи із застосуванням теорії енергозбереження та показників якості перетворення енергії, урахування складових споживаної потужності та фізичного стану механічних, електричних та магнітних складових систем електромеханічного обладнання – електричних двигунів постійного та змінного струму. Проведення діагностики та моніторингу дозволяє визначити реальний ресурс та працездатність обладнання, що знаходиться в експлуатації або в процесі ремонту чи технічного огляду. Розробка такого обладнання дозволяє реалізовувати задачі реального енергозбереження в Україні. Попередні дослідження створили ґрунтовну базу – теорію енергозбереження засобами електроприводу на основі трьох основних складових будь-якого процесу перетворення енергії: енергоспоживання, енерговикористання, енергокерування. Ці засади дозволяють перейти до вирішення основної задачі – створення енергоресурсозберігаючого обладнання, що вкрай необхідно за наявної економічної ситуації, оскільки дозволить реалізовувати задачі реального енергозбереження. Впровадження у промисловість вказаного обладнання призведе до підвищення ефективності ведення енергоспоживання, зменшення витрат на проведення експлуатаційних та ремонтних робіт за рахунок виводу обладнання з технологічного процесу не згідно плану, а згідно фактичного стану.

**Мета роботи.** Характеристика наукового напрямку досліджень, аналіз результатів і перспективи розвитку.

**Матеріал і результати дослідження.** Ідея створення комплексних систем діагностики, моніторингу та керування ресурсом роботи

електромеханічних комплексів полягає в створенні спеціальних умов експлуатації електротехнічних систем, які забезпечують, окрім виконання головних функцій, роботу з мінімальним енергоспоживанням і вичерпуванням ресурсу шляхом керування електроприводом (ЕП) комплексу за показниками якості перетворення енергії.

Задачі керування взагалі невід’ємно пов’язані з наявністю інформації про об’єкт керування, його параметри та структуру, тобто об’єкт повинен бути спостережимим. Це призводить до необхідності вирішення задач ідентифікації електромагнітних параметрів схем заміщення та електромеханічних параметрів електричних машин та технологічних механізмів, нелінійностей усіх елементів електромеханічних комплексів. При цьому слід зауважити, що в умовах наявності суттєвих нелінійностей в системі, пов’язаних в основному з нелінійностями характеристик електротехнічної сталі електричних машин та з ключовими режимами роботи статичних напівпровідникових перетворювачів, суттєві переваги здобуває метод аналізу електричних кіл, що базується на розв’язанні систем рівнянь балансу складових миттєвої потужності.

Керування енергоперетворенням у ланках електромеханічної системи, окрім ідентифікації зазначених параметрів, потребує ідентифікації енергетичних параметрів, а саме втрат потужності у вузлах системи, і визначення технічного стану цих вузлів. Це дозволяє, окрім пасивного спостереження за зміною енергетичних параметрів та розрахунку залишкового ресурсу роботи з метою оптимізації заходів щодо проведення ремонтних робіт та технічного обслуговування, здійснювати втручання у процес перетворення енергії з метою зменшення впливів конструктивної та параметричної несиметрії системи, нелінійностей та пошкоджень окремих елементів, що викликає появу змінних складових у споживаній потужності та електромагнітному моменті електричних двигунів.

Таким чином, основні напрями роботи за темою «Системи діагностики, моніторингу та керування ресурсом роботи електромеханічних

комплексів на основі показників якості перетворення енергії» можна представити

наступною структурно-логічною схемою (рис. 1).

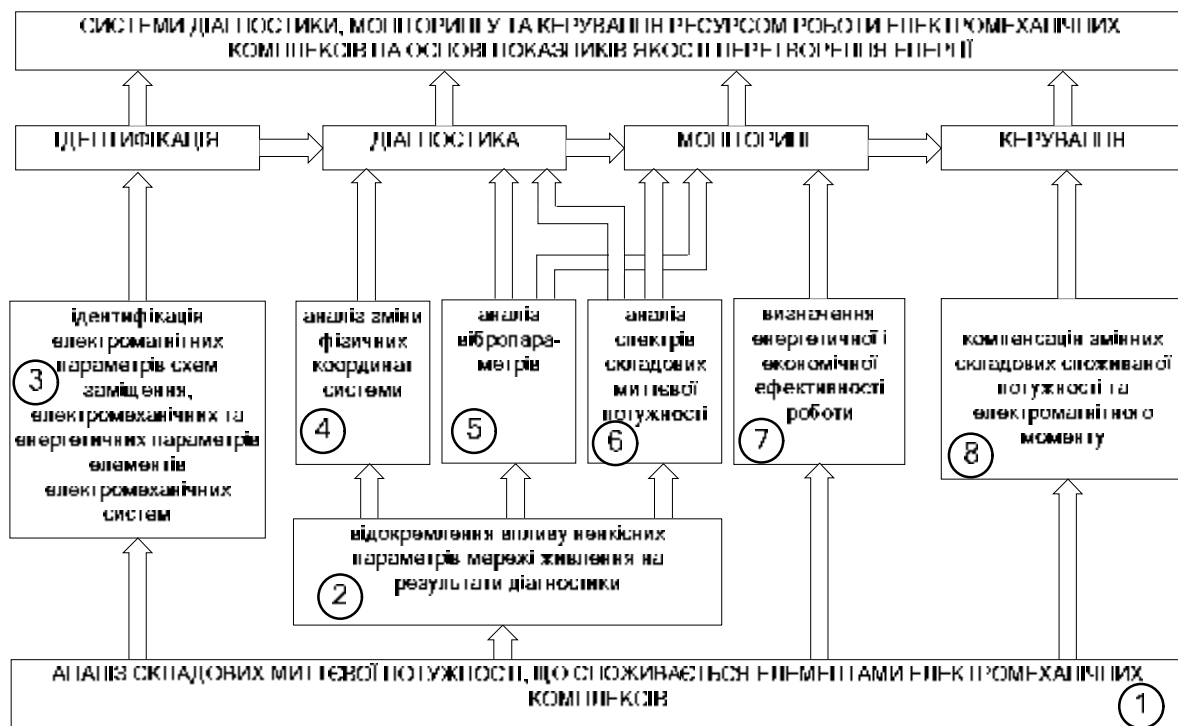


Рисунок 1 - Структурно-логічна схема основних напрямів роботи за темою «Системи діагностики, моніторингу та керування ресурсом роботи електромеханічних комплексів на основі показників якості перетворення енергії»

Науковий напрям започатковано у 2000 р. на кафедрі систем автоматичного управління і електропривода (САУЕ) Кременчуцького державного політехнічного університету (КДПУ). Він базується на дослідженнях проф. Родькіна Д.Й. [1, 4] з питань миттєвої потужності та проф. Родькіна Д.Й. і проф. Чорного О.П. [2, 3, 5, 6] з питань перетворення енергії у електромеханічних системах. До складу наукового колективу, що займається складовими загальної проблеми входять співробітники кафедри САУЕ: Калінов А.П., к.т.н., доц., Мамчур Д.Г., асистент, Прітченко О.В., аспірант, магістри: Браташ О.В., Мельников В.О., Ухань Ж.І., Чумачова А.В., студентка Малякова М.С. Розглянемо характер і результати кожного з напрямів.

### 1. Методи аналізу складових миттєвої потужності.

При вирішенні багатьох інженерних задач у різних галузях електротехніки часто виникають труднощі, пов'язані з аналізом електричних кіл, що містять нелінійні елементи, які не можуть бути описані за допомогою постійних коефіцієнтів, а їх характеристики є нелінійними функціями однієї або декількох змінних. При аналізі нелінійних кіл за гармонічними складовими струмів та напруг не можна застосовувати принцип накладання, що викликано взаємодією складових напруг і струмів різних частот. Лінеаризація нелінійних елементів призводить до зниження точності розрахунків, втрати важливої інформації, а іноді і суті самого

досліджуваного явища. Оскільки до гармонічних складових миттєвої потужності може застосовуватись принцип накладання, то є можливим аналіз як лінійних, так і нелінійних електричних кіл. Таким чином, вирішення завдання створення ефективних методів аналізу електричних кіл з використанням складових миттєвої потужності є фундаментом для подальших досліджень зазначеної загальної проблеми (рис. 1).

Розрахунки нелінійних електричних кіл на основі систем рівнянь миттєвих потужностей спричиняють такі негативні аспекти як громіздкість та складність систем рівнянь, а найголовніше, вимагають великого проміжку часу. Тому, для подолання цих труднощів, був розроблений алгоритм обчислення, який дозволяє отримувати вирази складових миттєвої потужності не лише для простих кіл, але і для контурів, що містять нелінійні елементи [7].

Подальші дослідження за цим напрямом повинні бути направлені на: визначення кількості значущих гармонік струму при розв'язанні прямої задачі аналізу електричних кіл при відомих параметрах нелінійних елементів; визначення критеріїв значимості гармонік струму, напруги та потужності і спрощення формування систем рівнянь за цими критеріями; обґрунтування методів апроксимації нелінійних елементів; підвищення точності та стійкості отримуваних рішень.

## **2. Відокремлення впливу неякісних параметрів мережі живлення на результати діагностики.**

Проблеми визначення взаємного впливу нелінійних споживачів і мережі живлення й поділу їхніх часткових внесків у погіршення показників якості електроенергії в точці підключення споживача турбують фахівців як електропостачального профілю, так і фахівців, що працюють в області ідентифікації, діагностики й моніторингу параметрів споживачів, істотну частину яких становлять електроприводи електромеханічних систем. У даний момент найбільш перспективними методами досліджень стану електромеханічних систем є методи, що базуються на основі аналізу миттєвих значень струму, напруги й потужності, а також їх гармонійних складових. Ефективна реалізація таких підходів буде здійснена тільки тоді, коли вся необхідна інформація для аналізу буде виходити без застосування спеціальних силових пристроїв, що змінюють параметри й режим роботи мережі живлення або споживача. Вирішення поставленого завдання в рамках випробувань і діагностики електричних машин змінного струму дозволить привести режим роботи двигуна до режиму при живленні від ідеальної мережі, що істотно спростить ідентифікацію нелінійностей і аналіз погіршення технічного стану електромеханічної системи.

До результатів роботи за напрямом можна віднести наступне: аналіз компонентів постійної (активної) складової миттєвої потужності дозволяє за напрямом сумарного вектора, сформованого одночастотними складовими гармонік струму й напруги; визначити, які гармоніки напруги надходять у точку підключення з мережі живлення, а які генеруються нелінійним споживачем. Визначення внеску споживача й навантаження у формування гармонік різних частот здійснюється на основі розв'язання системи рівнянь балансу складових миттєвої потужності джерела живлення, ділянки мережі й потужності на затискачах споживача [8, 9].

Подальші дослідження за цим напрямом повинні бути направлені на урахування особливостей мережі живлення, підвищення точності розрахунків та експериментальну апробацію розроблених методів. Відмінною рисою є робота з низькими значеннями гармонік струму й напруги, що генеруються нелінійним споживачем. Тому для розв'язання системи рівнянь балансу складових миттєвої потужності необхідно використовувати сучасні експертні й адаптивні алгоритми поліпшення збіжності розв'язку.

## **3. Ідентифікація електромагнітних параметрів схем заміщення, електромеханічних та енергетичних параметрів елементів електромеханічних систем.**

Все більшої актуальності в промисловості та сільському господарстві набувають задачі ідентифікації параметрів електромеханічних систем. Це пов'язано з тим, що впровадження будь-яких законів керування електроприводами, організація спостерігачів, систем діагностики, моніторингу та систем захисту не має сенсу, якщо параметри електромеханічної системи невідомі. Ефективна діагностика, енергозбереження та інші пріоритетні напрями досліджень в області електропривода можливі тільки за наявності даних про динамічні та енергетичні параметри електричного двигуна, перетворювача та механічної системи. Результати ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів використовуються в стаціонарних та мобільних системах діагностики і паспортизації асинхронних машин (АМ). Використання в таких системах перетворювачів частоти з широтно-імпульсною модуляцією напруги в якості силових пристроїв відкриває великі можливості у формуванні різних тестових дій і режимів випробувань. На даний час відома велика кількість методів ідентифікації параметрів електродвигунів змінного струму, але відсутній простий та надійний метод, який дозволяв би з достатньою точністю визначати всі параметри схеми заміщення, включаючи еквівалентні параметри, що характеризують складові втрат в сталі статора і ротора.

До результатів роботи за напрямом можна віднести наступне:

- Запропонований метод вимірювання напруги і струмів фаз статора асинхронного двигуна (АД) при живленні від перетворювача частоти з широтно-імпульсною модуляцією при застосуванні фільтрів низької частоти з подальшою цифровою корекцією сигналу є простим і ефективним рішенням та дозволяє підвищити точність вимірювань. Розроблено технічні рішення щодо побудови керованого джерела живлення, що дозволяє відпрацьовувати широкий діапазон сигналів завдань для дослідження методів ідентифікації електромагнітних параметрів [10].

- Розраховані початкові наближення шляхом аналізу перших гармонік струму та напруг в режимах короткого замикання, для визначення параметрів обмоток статора і ротора, та неробочого ходу, для визначення індуктивності контуру намагнічування, можуть бути використані в математичному апараті ідентифікації для підвищення електромагнітних параметрів схеми заміщення асинхронних двигунів. Обґрунтовані початкові наближення дозволяють встановити межі можливого пошуку точних значень параметрів схем заміщення [11]. Проведені дослідження щодо зміни критеріїв мінімуму відхилення експериментальних та розрахованих сигналів дозволили виявити вплив похибок вимірювання та похибок визначення

параметрів на розрахункове відтворення експериментального сигналу.

- Запропоновано метод ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів при різночастотному живленні обмоток статора напругою низької частоти, перевагами якого є спрощення математичного апарату ідентифікації та підвищена точність визначення електромагнітних параметрів за рахунок використання ітераційних алгоритмів, що базується на порівнянні експериментального та розрахованого сигналів струму.

Подальші дослідження за цим напрямом повинні бути направлені на: розробку методів визначення електромеханічних, енергетичних та механічних параметрів системи регульованого електропривода; обґрунтування використання визначених параметрів для настроювання систем векторного керування асинхронними двигунами; підвищення точності та збіжності розрахунків.

#### **4. Діагностика за аналізом зміни фізичних координат системи.**

Сфера діагностування стану електродвигунів охоплює безліч методів і способів, направлених на поліпшення якості діагностики, її достовірності та адекватності. На сьогоднішній день розвиток діагностики електромеханічних систем здійснюється за рахунок використання нових математичних методів обробки сигналів, наприклад, апарату вейвлет перетворень, або методів експертної оцінки та інструментів штучного інтелекту для розпізнавання дефектів. Аналіз існуючих методів діагностики пошкоджень обмоток статора і ротора асинхронного двигуна показав, що вони мають недоліки, пов'язані з необхідністю розбору двигуна та виведення його з робочого процесу для виявлення дефектів, або використання неефективних методів аналізу і обробки сигналів. Основна увага при цьому приділялася діагностиці пошкоджень обмоток статора і ротора як основних вузлів, що найчастіше пошкоджуються.

До результатів роботи за напрямом можна віднести наступне:

- Проведений комплексний аналіз результатів експериментальних досліджень та виконана порівняльна оцінка існуючих методів діагностики пошкоджень обмоток ротора з використанням сигналів струмів та напруг в якості діагностичних параметрів показали, що діагностика пошкоджень обмоток ротора за спектром струму має недоліки, а саме: використання перетворення Фур'є спричиняє розтікання спектру сигналу і не дозволяє адекватно судити про наявність пошкоджень на частотах, які не кратні частоті мережі. Крім того при діагностиці за спектром струму встановлюється лише факт пошкодження, без визначення його ступеню, що підтверджує комплексний аналіз спектрів струму та віброхарактеристик [13].

- Запропонований спосіб діагностики пошкоджень обмоток ротора асинхронного двигуна на основі вейвлет-аналізу сигналу е.р.с., який наводиться загасаючими струмами ротора в обмотках статора при відключенні двигуна від мережі живлення, дозволяє виявити пошкодження ротора з високою точністю та локалізувати їх у просторі [12].

- Запропоновано спосіб виявлення виткових замикань обмотки статора асинхронного двигуна, який базується на основі порівняння сталих часу перехідних процесів за струмом при ступінчатому впливі постійною напругою на обмотки статора електродвигуна.

Розроблені методи діагностики пошкоджень обмоток асинхронних двигунів дозволяють виявляти дефекти на ранніх етапах їх розвитку, проводити діагностику без виведення АД з технологічного процесу, підвищуючи таким чином ефективність та надійність експлуатації електричних машин.

Подальші дослідження за цим напрямом повинні бути направлені на: урахування конструктивних параметрів обмоток при дослідженні спотворення магнітного поля в зазорі двигунів змінного струму; удосконалення методів виявлення виткових замикань в обмотках статора та обривів стрижнів ротора.

#### **5. Діагностика за аналізом вібропараметрів.**

Розвиток методів діагностики електричних машин пов'язаний з бажанням оптимізувати експлуатацію великого парку електричних двигунів широкого діапазону потужностей і конструктивних виконань, що мають різну історію експлуатації і ремонту. Ефективними методами контролю стану устаткування за таких умов є методи вібродіагностики. При цьому, як в методах вібродіагностики, так і в методах діагностики за електричними параметрами існує проблема впливу якості енергії живлення ЕД на результати вимірювань і аналізу. В умовах живлення від мережі з неякісними параметрами електричної енергії спектри струму і вібрації від дефектів, і від вищих гармонік напруги живлення можуть накладатися або взаємно компенсуватися. З тієї ж причини накладення дефектів і неякісної напруги живлення на однакових частотах спостерігатимуться неоднозначності в методах, які базуються на порівнянні електромагнітних і механічних вібрацій, тому вирішення проблеми відділення впливу мережі живлення на результат діагностики є актуальною задачею.

До результатів роботи за напрямом можна віднести наступне:

- Використання розробленої математичної моделі, яка враховує зміну параметрів схеми заміщення двигуна внаслідок зміни інтегрального значення повітряного зазору на полюсному діленні,

дозволяє адекватно аналізувати режими роботи АД з різними видами небалансу. Комплексне урахування зміни положення ротора відносно статора, під дією зміни кута повороту ротора у напрямку обертання та зміни положення статора внаслідок вібропереміщень при неякісному кріпленні АД до основи, дозволило створити математичну модель електромеханічної системи, яка включає електромагнітні, електромеханічні складові АД та механічну підсистему кріплення до фундаменту, для дослідження неякісності кріплення АД до основи. Порівняльний аналіз розрахованих та експериментальних електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів довів адекватність розроблених математичних моделей [14].

- Комплексний облік зміни гармонічних складових електричних, енергетичних та вібраційних параметрів при конструктивних несиметриях асинхронних двигунів дозволяє досліджувати віброхарактеристики з наступною оцінкою їхнього впливу на ресурс АД, дозволяє підвищити точність та адекватність діагностики. Експериментальні дослідження вібрацій АД у різних режимах показали, що: низькочастотні гармоніки несуть в собі більшу частину вібропотужності, тому вони потребують більш детального аналізу, високочастотні гармоніки віброшвидкості та віброприскорення викликані вібрацією підшипників та вібрацією корпусу машини, що встановлена на основі без кріплення [13].

- Ідентифікація моделі, що пов'язує віброхарактеристики з електромагнітними та електромеханічними вібраціями АД, дозволяє визначити та виключити з аналізу вплив неякісності напруги живлення на вібрації і, таким чином, збільшити точність та достовірність діагностики АД за віброхарактеристиками. У результаті проведених досліджень розроблений і експериментально доведений метод відокремлення впливу неякісності мережі живлення на результати вібродіагностики АД шляхом використання математичної моделі, що пов'язує електромагнітні і механічні вібрації [15].

Подальші дослідження за цим напрямом повинні бути направлені на: удосконалення методів вібродіагностики; визначення енергетичних параметрів вібрацій; розробку методів прогнозу ресурсу роботи елементів електромеханічного перетворювача за рівнем та характером вібропатраметрів.

#### **6. Діагностика за аналізом спектрів складових миттєвої потужності.**

В сучасних умовах підвищення вимог щодо ефективності використання енергоресурсів на промислових підприємствах постає задача своєчасного діагностування дефектів, що зароджуються у системах асинхронного

електроприводу як найбільш масового споживача енергії. Існуючі регламентовані методи діагностики асинхронних двигунів (АД) потребують виводу устаткування з технологічного процесу і часткового розбирання, що пов'язано з простоюванням виробничих потужностей, а також не надає гарантії надійності роботи в міжремонтний період. Більш сучасним рішенням даної задачі є використання систем моніторингу стану обладнання, що не потребують зупинки виробничого процесу та дозволяють виявити наявність найбільш поширених видів пошкоджень. Сформулювати рекомендації щодо оцінки можливості і ефективності використання систем електроприводу в поточних експлуатаційних умовах можна, аналізуючи режими їх роботи, що дозволить на основі аналізу енергетичних параметрів системи електроприводу виконувати наступні операції:

- проводити діагностику – визначити наявність та ступінь ушкоджень або дефектів елементів системи електроприводу;
- здійснювати прогноз залишкового ресурсу роботи системи електропривода за аналізом процесу тепловиділення в обмотках АД, а також розраховувати зниження ресурсу ізоляції і підшипників на основі аналізу вібросигналів;
- оцінювати якість виконання технологічних операцій асинхронним двигуном за аналізом рівня змінних складових миттєвої потужності і моменту, які можуть істотно впливати на якість вихідної продукції;
- здійснювати корегування режимів роботи електромеханічної системи шляхом компенсації змінної складової електромагнітного моменту і оптимізації режимів енергоспоживання.

Погіршення режимів роботи АД виникають у зв'язку з наявністю електричних або механічних пошкоджень машини або у зв'язку з неякісним живленням (несиметрія, несинусоїдність). Електричні неякісності пов'язані з обмотками двигуна (обрив паралельних секцій обмоток двигуна, виткові замикання, обрив стрижнів ротора), з нелінійністю машини (нелінійністю кривої намагнічування, ефектом витіснення струму і т. ін.), несиметрією параметрів за фазами, статичним та динамічним дисбалансом. Механічні пошкодження виникають внаслідок фізичних ушкоджень двигуна, викривлення валу, просідання місць кріплення підшипників, поганого кріплення АД з основою та технологічним механізмом. Наявність значної змінної складової споживаної потужності або електромагнітного моменту зазвичай спричинена серйозним дефектом або ушкодженням машини і свідчить про необхідність додаткового аналізу з метою виявлення джерела її виникнення. Аналіз експериментальних даних показав, що робота системи електроприводу змінного струму при наявності змінної складової

моменту, більшої за 15% від номінального значення моменту, призводить до інтенсивного вичерпування ресурсу та є небажаною. При цьому визначення граничних меж амплітуди змінної складової моменту необхідно виконувати в залежності від потужності двигуна та вимог до роботи технологічного механізму.

До результатів роботи за напрямом можна віднести наступне:

- Запропоновано додатковий показник якості перетворення енергії, що визначається за середньозваженими значеннями окремих гармонік миттєвої потужності, за яким можна оцінювати ступінь несиметрії перетворювача або мережі живлення та компенсувати її, а також показник, заснований на аналізі вищих гармонік сигналу потужності трьох фаз.

- На основі аналізу існуючих та запропонованих показників якості перетворення енергії сформульовано правила для оцінки режимів роботи асинхронного електропривода, виявлення наявності найбільш поширених видів неякісностей та оцінки можливості подальшої роботи електромеханічної системи за даних експлуатаційних умов.

Подальші дослідження за цим напрямом повинні бути направлені на експериментальну перевірку сформульованих логічних правил та їх розширення з метою використання при діагностиці декількох одночасно присутніх пошкоджень.

## **7. Визначення енергетичної і економічної ефективності роботи електротехнічних комплексів на основі показників якості перетворення енергії.**

Одним з перспективних напрямів енергозбереження є розвиток регульованого ЕП на базі АД з перетворювачем частоти. Регульований ЕП на базі АД має ряд переваг перед іншими ЕП, у числі яких енергозбереження, ресурсозбереження. Кількісною оцінкою цих якостей є енергетичні показники, такі як потужність, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності. В роботах ряду дослідників показано, що існуючі методи оцінки енергоефективності роботи електричних машин морально застаріли внаслідок збільшення кількості електроприводів змінного струму, що працюють при несинусоїдних струмах і напругах, а також мають певний ступінь вихідної або набутої конструктивної параметричної несиметрії. Статистика та експериментальні дані показують, що з урахуванням збільшення сумарних втрат в двигуні після кожного капітального ремонту та зростання вартості цих ремонтів подальша експлуатація цього АД стає економічно не доцільною. Адекватне визначення енергетичної ефективності роботи АД та своєчасна його заміна дозволять значно скоротити витрати підприємства, які пов'язані з позаплановими ремонтами двигуна, з простим виробництва під час таких ремонтів, зі

збільшенням вартості подальших ремонтів, зі зростом сплати за спожиту електроенергію.

До результатів роботи за напрямом можна віднести наступне:

- Розроблений метод опосередкованого визначення енергетичних параметрів АД дозволяє оцінити його енергетичну ефективність роботи і технічний стан в умовах неякісності напруги живлення, конструктивної й параметричної несиметрії електричної машини, роботи лише на основі миттєвих значень фазних струмів і напруг статора, за кривими складових сумарних втрат, коефіцієнта потужності, миттєвого ККД статора, ротора та машини в цілому, електромагнітного моменту. Перевага розробленого методу полягає в тому, що він дозволяє витратити менше часу на аналіз даних у порівнянні з методами, що передбачають розкладання сигналів струму й напруги на гармонічні складові. Запропонований метод може бути використаний як основа для створення систем визначення залишкового ресурсу працездатності АД, систем компенсації конструктивної й параметричної несиметрії АД й оптимізації режимів енергоспоживання на основі частотно-регульованого електропривода [17].

- Результати математичного моделювання та експериментальні дані довели, що розрахунок електромагнітного моменту можна проводити як на основі миттєвих потужностей, так і на основі похідних потужностей. Однак необхідно враховувати недолік методу визначення електромагнітного моменту через потужності, пов'язаний з інтегруванням змінних, що вимагає відомих початкових умов. Використання розрахованого електромагнітного моменту дозволяє побічно розрахувати кутову частоту обертання двигуна, яка необхідна для визначення потужності на валу АД та інших енергетичних параметрів. При непрямому розрахунку швидкості обертання АД метод визначення електромагнітного моменту на основі похідних потужностей дає кращий збіг з експериментальною кривою за критерієм середньоквадратичного відхилення [17].

- На основі запропонованого методу визначення енергетичних параметрів АД була розроблена оптимальна за потоком система керування, яка дозволяє оптимізувати енергоспоживання АД в умовах недовантаження та при роботі в режимі неробочого ходу.

- На основі запропонованого методу розрахунку енергетичних параметрів АД був розроблений алгоритм визначення оптимального строку експлуатації АД за критерієм мінімальних витрат, що також дозволяє розраховувати вартість експлуатації двигуна за визначений період та економічну вигоду прийнятого рішення. З урахуванням того факту, що парк двигунів промислового підприємства становить досить

велику кількість одиниць різної потужності, економічний ефект буде ще більш відчутним.

Подальші дослідження за цим напрямом повинні бути направлені на удосконалення існуючих критеріїв оцінки енергоефективності та розробку систем керування підвищенням енергоефективності роботи електротехнічних систем.

#### **8. Системи компенсації змінних складових споживаної потужності та електромагнітного моменту на основі показників якості перетворення енергії.**

Несиметрія струмів і напруг у фазах викликає появу вібрацій моменту. Коливання, викликані несиметрією, мають несинусоїдний характер. Несиметричний режим навантаження асинхронного двигуна обумовлений як несиметрією струмів мережі живлення, так і розходженням опорів окремих фаз обмотки статора. Як показує досвід, навіть незначна несиметрія фазних струмів (у межах 2-3 %) призводить до значного зростання тангенціальної вібрації на подвійній частоті під впливом пульсуючого крутильного моменту. Виходячи з вищенаведеного, можна сказати, що, щоб уникнути аварійних режимів роботи електродвигуна, необхідно усунути пульсацію електромагнітного моменту.

Проведений аналіз гармонійного складу трифазної активної споживаної потужності показав, що несиметрія напруг або струмів призводить до появи другої гармоніки у спектрі потужності. Ступінь несиметрії було запропоновано оцінювати за середньозваженим коефіцієнтом другої гармоніки потужності. Цей коефіцієнт зручно використовувати для компенсації змінної складової споживаної потужності у складі частотно-керованого електроприводу. Несиметрія струмів у двигуні не відбиває повною мірою процес формування неякісного моменту. Були проведені дослідження миттєвої потужності, на основі яких був розроблений критерій оцінки несиметрії, що заснований на аналізі середньозваженого коефіцієнта: відношення гармоніки однієї з фаз до середнього значення даної гармоніки за трьома фазами.

Компенсація змінних складових миттєвої потужності, на відміну від існуючих методів, дозволяє підвищити ресурс роботи асинхронного двигуна з конструктивною або параметричною несиметрією шляхом зменшення змінної складової електромагнітного моменту при керуванні напругою живлення обмоток статора. При істотних несиметриях струмів статора (до 20 %) метод дозволяє знизити рівень змінної складової моменту приблизно у 3 рази, що призведе до пропорційного збільшення ресурсу роботи підшипників та збільшення ресурсу ізоляції обмоток на 50 %.

Подальші дослідження за цим напрямом повинні бути направлені на розробку критеріїв

керування та побудову систем компенсації змінних складових споживаної потужності та електромагнітного моменту.

**Висновки.** Комплексна проблема визначення та корегування ресурсу роботи електротехнічних систем включає широке коло питань наукового та науково-прикладного характеру та направлена на підвищення техніко-економічної ефективності експлуатації систем, побудованих на базі електромеханічних перетворювачів з використанням показників якості перетворення енергії.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Родькин Д.И. О преобразовании энергии в электромеханических системах // Научные труды Кременчугского политехнического института «Проблемы создания новых машин и технологий». - Кременчуг: КГПУ, 2000. - Вып. 1, С. 106-112.
2. Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – 2002. – Вип. 1. – С. 81–85.
3. Родькин Д.И. О необходимости разделения понятий качества потребления и преобразования энергии // Вісник КДПУ: наук. праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2(19), Т. 1. – С. 143-148.
4. Родькин Д.И. Интерпретация результатов оценки мгновенной мощности полигармонических сигналов // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2. – С. 144–147.
5. Родькин Д.И. Новая система показателей качества использования электрической энергии // Науковий вісник НГУ, 2004, №3, С. 20-26.
6. Черный А.П. Определение снижения ресурса асинхронных двигателей по показателям качества преобразования энергии // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – 2004. - Вип. 15 – С. 160-168.
7. Калинов А.П., Малякова М.С. Автоматизированный метод расчета электрических кил за складовими миттєвої потужності // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 1/2009(5). – С. 34-38.
8. Мамчур Д.Г., Калинов А.П., Херардо Веласке Анголо. Отделение влияния некачественности питающей сети на электрические машины переменного тока в задачах диагностики // Вісник НТУ «ХП», «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» – Харків: НТУ «ХП», 2008, № 30. – С. 559-563.
9. Мамчур Д.Г., Калинов А.П. Отделение влияния некачественности питающей сети в

задачах діагностики асинхронних двигателів // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць VII ВНТК молодих учених і спеціалістів. – Кременчук, КДПУ, 2009. – С. 232-234.

10. Калинов А.П., Мельников В.А., Воробейчик О.С. Измерение токов и напряжений асинхронного двигателя в составе частотно-регулируемого электропривода // Збірник наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (техн. науки) / Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2009. Вип. №1 (11). - С. 110-117.

11. Калинов А.П., Мельников В.О. Обгрунтування початкових наближень при ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронного двигуна // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 1/2009(5). – С. 57-59.

12. Калинов А.П., Ухань Ж.І., Урдин І.В. Метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. Наукові праці КДПУ. - Вип. 4 (57). Ч.1. - Кременчук: КДПУ ім. Михайла Остроградського, 2009. - С. 98-101.

13. Калинов А.П., Мамчур Д.Г., Браташ О.В., Ухань Ж.І., Простак О.І. Дослідження режимів роботи асинхронних двигунів з пошкодженнями обмоток статора і ротора та з неякісним кріпленням до основи // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. Наукові праці КДПУ. - Вип. 3 (56). Ч.2. - Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2008. - С. 103-107.

14. Калинов А.П., Мамчур Д.Г. Математичні моделі для дослідження впливу конструктивних несиметрій електричних машин на їх електромагнітні параметри // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. - Вип. 3 (44). Ч.2. - Кременчук: КДПУ, 2007. - С. 150-154.

15. Калинов А.П., Мамчур Д.Г., Браташ О.В., Простак О.І. Оцінювання впливу неякісності напруги живлення на віброхарактеристики асинхронних двигунів // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. Наукові праці КДПУ. - Вип. 4 (57). Ч.1. - Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2008. - С. 78-81.

16. Мамчур Д.Г., Калинов А.П. Оцінка режимів роботи і діагностика асинхронних двигунів на основі показників якості перетворення енергії // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. Наукові праці КДПУ. - Вип. 3 (56). Ч.1. - Кременчук: КДПУ ім. Михайла Остроградського, 2009. - С. 90-96.

17. Калинов А.П., Мамчур Д.Г., Чумачова А.В. Энергетические характеристики асинхронных двигателей в динамических режимах работы // Збірник наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету: (техн. науки) / Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2009. Вип. №1 (11). - С. 104-110.

Стаття надійшла 6.08.2009 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.