

УДК 621.313

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ПОШКОДЖЕНЬ СТРИЖНІВ РОТОРА ПРИБІ ДІАГНОСТИЦІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Ж. І. Ромашихіна, А. П. Калінов

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: romashykhina.zhanna@gmail.com

Наведено методику досліджень впливу пошкоджень стрижнів ротора асинхронних двигунів за аналізом електрорушійної сили в обмотках статора у режимі самовибігу. Представлено дослідження по обґрунтуванню режиму випробування асинхронних двигунів та діагностичного сигналу. Проведено аналіз методів розрахунку електромагнітного поля та виконано обґрунтування використання вейвлет-перетворення. За результатами досліджень тестових сигналів електрорушійної сили котушок вибрано оптимальну функцію вейвлет-базису для вейвлет-перетворення. Досліджено чинники, які впливають на формування електрорушійної сили в обмотках статора асинхронних двигунів.

Ключові слова: асинхронний двигун, вейвлет-перетворення, електрорушійна сила, метод скінченних елементів, пошкодження стрижнів ротора.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТЕРЖНЕЙ РОТОРА ПРИБІ ДІАГНОСТИКЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ж. И. Ромашихина, А. П. Калинов

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: romashykhina.zhanna@gmail.com

Приведена методика исследований влияния поврежденных стержней ротора асинхронных двигателей по анализу электродвижущей силы в обмотках статора в режиме самовыбега. Представлены исследования по обоснованию режима испытания асинхронных двигателей и диагностического сигнала. Проведен анализ методов расчета электромагнитного поля и выполнено обоснование использования вейвлет-преобразования. По результатам исследований тестовых сигналов электродвижущей силы катушек выбрана оптимальная функция вейвлет-базиса для вейвлет-преобразования. Исследованы факторы, влияющие на формирование электродвижущей силы в обмотках статора асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, вейвлет-преобразование, электродвижущая сила, метод конечных элементов, повреждения стержней ротора.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Асинхронні двигуни (АД) є основними споживачами електричної енергії в промисловості та сільському господарстві. Згідно зі статистичними даними вони споживають понад 60 % усієї виробленої електроенергії та широко застосовуються у більшості електроприводів механізмів промислового обладнання. Тому якість і надійність роботи АД визначають ефективність, економічність, продуктивність та інші техніко-економічні показники технологічних процесів.

На надійність роботи АД впливають різні чинники конструкторського та експлуатаційного характеру, зокрема поява різного роду пошкоджень та дефектів [1]. Довід експлуатації АД показав, що досить серйозними є пошкодження обмоток ротора. Так, пошкодження стрижнів короткозамкненої обмотки ротора призводять до підвищеної вібрації двигуна, збільшення втрат в обмотках статора і ротора, зниження частоти обертання під навантаженням, зменшення коефіцієнта корисної дії [2].

Своєчасна діагностика АД є одним з критеріїв ефективної експлуатації електричних машин (ЕМ). На практиці контроль стану ЕМ здійснюється лише під час проведення планового ремонту, що не дозволяє своєчасно виявляти зароджувані дефекти. Тому, актуальним є діагностування пошкоджень стрижнів ротора, а також удосконалення відомих методів діагностики, підвищення надійності та довговічності обладнання.

Мета роботи – розробка методики досліджень впливу пошкоджень стрижнів ротора АД для задач діагностики.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Одним із важливих етапів методики діагностики є вибір режиму випробування, оскільки від цього залежить ефективність діагностики.

Аналіз літературних джерел показав, що при використанні усталених режимів роботи, таких, як режим неробочого ходу, режим роботи під навантаженням, АД необхідно вилучати з технологічного процесу. Також на результати діагностики суттєво впливає як рівень навантаження двигуна, так і неякісність напруги мережі живлення [3]. Проведення діагностики у пускових режимах також обмежене через складність аналізу результатів діагностики через вплив зміни електромагнітних параметрів АД під час пуску.

Альтернативним рішенням є діагностика АД у режимі самовибігу, оскільки випробування у цьому режимі дозволяє не вилучати двигун з технологічного процесу та не розбирати його; виключає вплив неякісності напруги мережі живлення та роботу технологічного механізму на результати діагностики; результати діагностики практично не залежать від попереднього режиму роботи двигуна; реалізація методу не вимагає використання додатково датчиків потоку чи датчиків Холла та додаткових джерел тестових впливів [2]. Отже, режим самовибігу двигуна є найбільш ефективним для діагностики пошкоджень стрижнів ротора.

У ході досліджень виконано обґрунтування діагностичного сигналу. Оскільки дослідження проводяться у режимі самовибігу АД, то в якості вимірювальних параметрів недоцільно використовувати механічні, електромеханічні чи температурні величини. Це пояснюється низьким рівнем або відсутністю зазначених параметрів у режимі самовибігу АД.

У режимі самовибігу в обмотках ротора протікають струми, що загасають. Під дією цих струмів створюється електромагнітне поле (ЕМП), яке обертається та наводить електрорушійну силу (ЕРС) в обмотках статора.

ЕРС фази обмотки статора за законом електромагнітної індукції (згідно з рівняннями Максвелла) дорівнює [4]:

$$e_{ph}(t) = - \frac{d\Psi_{ph}(t)}{dt}, \quad (1)$$

де Ψ_{ph} – потокозчеплення фази.

Повне потокозчеплення фази обмотки статора:

$$\Psi_{ph} = \frac{2l_1 w}{S_s} \int_{S_{ph}} A_{z\Sigma} dS, \quad (2)$$

де l_1 – активна довжина статора; w – кількість послідовно з'єднаних витків у пазу; S_s – площа перерізу паза статора; $A_{z\Sigma}$ – сумарне арифметичне значення векторного магнітного потенціалу (ВМП) у всіх пазах фази; S_{ph} – сумарна площа поперечного перерізу всіх послідовно з'єднаних котушок фази.

Циркуляція векторного магнітного потенціалу по замкненому колу дорівнює магнітному потоку \hat{O} , що пронизує це коло:

$$Adl = \hat{O}. \quad (3)$$

Отже, ЕРС в обмотках статора АД є похідною величиною, яка обумовлена наявністю електромагнітного поля двигуна. Відповідно, скориставшись розв'язком рівнянь Максвелла, можна розрахувати ЕРС в елементах обмотки статора.

При розрахунку ЕРС в обмотках статора варто враховувати, що в сигналі ЕРС будуть присутні зубцеві пульсації, викликані наявністю зубчатих поверхонь статора і ротора. Вони дають можливість співставлення ліній ЕМП з геометричним розташуванням зубців ротора.

У свою чергу, наявність пошкоджень стрижнів ротора обумовлює спотворення ЕМП АД. Тому зроблено припущення про те, що сигнал ЕРС обмотки статора містить інформацію як про нерівномірність ЕМП, зумовлену зубчатістю статора і ротора, так і про спотворення поля, викликані наявністю пошкоджень стрижнів.

Для підтвердження цього з використанням лабораторного вимірювального обладнання (рис. 1) були проведені експериментальні дослідження для АД типу АИР80В4У2 ($P=1,5$ кВт, $n=1395$ об/хв, $\eta=77\%$, $\cos\varphi=0,81$) у режимі самовибігу двигуна.

Дослідження проводилися для непошкодженого АД та з пошкодженням стрижнів ротора, які було

зімітовано штучно створеними отворами у місцях кріплення стрижнів до короткозамкнених кілець (рис. 2).



Рисунок 1 – Експериментальний вимірювальний стенд



Рисунок 2 – Ротор АД з пошкодженням стрижнів

Для проведення експериментальних досліджень у пази статора було укладено вимірювальні обмотки, за допомогою яких фіксувалися миттєві значення ЕРС.

Результати проведених досліджень наведені на рис. 3.

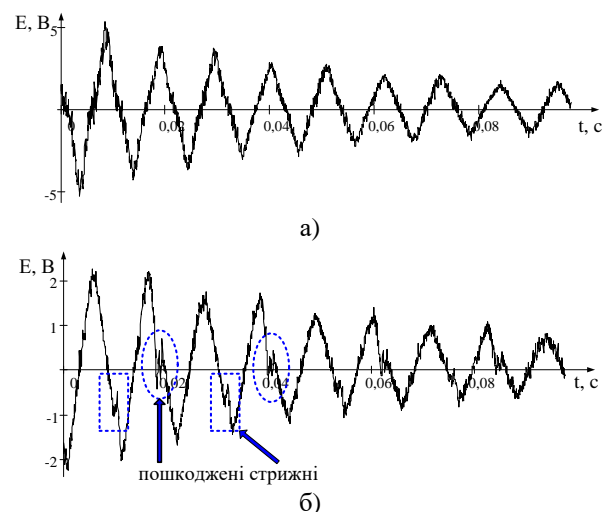


Рисунок 3 – Сигнали ЕРС у вимірювальній обмотці:
а) для непошкодженого АД;
б) для АД з пошкодженням стрижнів

Результати досліджень показали, що у сигналі ЕРС у вимірювальній обмотці АД з пошкодженнями стрижнів ротора присутні характерні спотворення, які відповідають пошкодженим стрижням ротора (рис 3, б) та які відсутні в ЕРС непошкодженого АД (рис 3, а). Отже, ЕРС, яка наводиться в обмотках статора у режимі самовибігу двигуна, можна використовувати для діагностики пошкоджень стрижнів ротора.

Для аналізу впливу пошкоджень стрижнів ротора АД та розробки методу діагностики необхідно детально дослідити вплив ЕМП на формування ЕРС в обмотках статора двигуна. Тому в роботі запропоновано виконати розрахунок ЕРС в обмотках статора за результатами розрахунку електромагнітного поля АД.

ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ. Електромагнітне поле описується системою рівнянь Максвелла [4]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j}; \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \vec{B} &= \mu_a \vec{H}; \\ \vec{j} &= \frac{1}{\rho} \vec{E} + \vec{j}_{ext}; \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де \vec{H} і \vec{E} – вектори напруженості магнітного і електричного полів відповідно; \vec{j} – густина струмів; \vec{B} – вектор магнітної індукції; μ_a – магнітна проникність; ρ – густина електричних зарядів; \vec{j}_{ext} – густина струмів, викликана сторонніми ЕРС.

Оскільки розв’язок рівнянь Максвелла є досить складним завданням, то для приведення цих рівнянь до вигляду, більш зручного для розв’язку, використовуються допоміжні функції: векторний \vec{A} і скалярний ϕ магнітні потенціали.

Відомо, що електромагнітне поле АД є тривимірним [4]. Однак у ряді випадків достатньо розглядати двовимірні електромагнітні поля, в яких всі вектори поля залежать тільки від двох просторових координат, і кожен з векторів має тільки одну або дві просторові складові. До таких задач відносяться задачі аналізу поля у поперечному перерізі активної зони ЕМ.

Найбільш ефективним є використання векторного магнітного потенціалу \vec{A} при розрахунку двовимірних польових задач з такою орієнтацією системи координат, при якій струми обмоток направлені уздовж однієї з її осей. Осі x і y декартової системи координат розміщують при цьому у поперечному перерізі активної зони ЕМ, а вісь z направляють уздовж її поздовжньої осі.

В декартових координатах для нерухомих середовищ (при умові, що швидкість руху $v = 0$) скалярне рівняння відносно векторного магнітного потенціалу має вигляд [4]:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - \mu\gamma \frac{\partial A_z}{\partial t} = -\mu J_{zext}, \quad (5)$$

де J_{zext} – густина сторонніх струмів, які задаються в перерізах обмотки статора. На границі G розрахункової області рівняння (5) доповнюється однорідною граничною умовою першого роду $A_z|_G = 0$, яка відображає загасання поля за межами області.

Таким чином, розрахунок ЕМП двигуна можна виконати з використанням плоскопаралельної (двовимірної) математичної моделі у поперечному перерізі АД.

ОБґРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ. Проведені попередні дослідження з вибору діагностичного сигналу дозволили зробити висновок про те, що ЕРС в обмотках статора є похідною величиною, яка обумовлена наявністю електромагнітного поля, та може бути розрахована через вирази (1-5).

Рівняння електромагнітного поля розв’язуються, як правило, аналітичними або чисельними методами. Відповідно до поставленої задачі результатом розрахунку ЕМП має бути сигнал ЕРС в обмотках статора АД в режимі самовибігу. Цю задачу дозволяють вирішити чисельні методи розрахунку поля. Крім того, розрахунок ЕМП в ЕМ чисельними методами дозволяє детально проаналізувати його розподіл в окремих елементах електромагнітного кола.

На даний час на практиці для розрахунків та проектування ЕМ найбільш широко застосовуються метод скінчених різниць (МСР) та метод скінчених елементів (МСЕ), причому МСЕ більш розповсюджений завдяки ряду переваг, таких як:

- можливість точного опису криволінійних границь областей;
- простота зміни дискретизації області на різних її ділянках для отримання більш високої точності розрахунків при найменшому числі вузлів розрахункової сітки;
- можливість завдання граничних умов другого роду на границях будь-якої довжини, а також змішаних граничних умов;
- можливість накладення граничних умов з розривним поверхневим навантаженням.

Відповідно до задач електромеханіки МСЕ дозволяє розраховувати електричні, магнітні, температурні й інші поля.

МСЕ дозволяє враховувати нелінійності фізичних характеристик конструктивних матеріалів, однотипність обчислювальних процедур і т.д. МСЕ має ряд переваг перед іншими чисельними методами, що дозволило зробити висновок про доцільність його використання при розрахунку ЕМП АД для подальшого визначення ЕРС в обмотках статора.

ОБґРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ВЕЙВ-ЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ. На сьогодні значна кількість методів діагностики пошкоджень стрижнів роторів АД базується на спектральному аналізі електричних величин, таких як струми, напруги фаз статора та активна споживана потужність [3, 5–6]. За окремими невідповідностями у спектрах цих величин звичайно робиться висновок про наявність пошкодження. Однак при цьому використовується перетворення Фур’є, яке має ряд обмежень:

- неможливість виявлення пошкоджень на частотах, які не кратні частоті мережі;
- неможливість аналізу нестационарних сигналів зі складними частотно-часовими характеристиками;
- неможливість локалізації місця та ступеня пошкодження;

– низька точність виявлення локальних особливостей сигналів або ж миттєвих змін частотних складових сигналів.

За результатами експериментальних досліджень (рис. 3) можна стверджувати, що ознакою наявності пошкоджень стрижнів є особливості сигналу ЕРС обмотки статора, які виявляються у спотворенні його форми. Оскільки у режимі самовибігу частота обертання ротора знижується, змінюється стала часу загасання сигналу, то, ймовірно, періодичність повторень ознак пошкоджень (спотворення форми сигналу) також змінюється зі зміною періоду сигналу. Тому використання перетворення Фур'є для аналізу загасаючих сигналів можливе лише на ділянках часу, на яких не змінюється період сигналу та інформаційні ознаки пошкоджень. Саме через неможливість виявлення пошкоджень через їх зміщення на сигналі ЕРС, використання перетворення Фур'є для обробки діагностичних сигналів є неефективним. Тому виникає необхідність вибору іншого методу обробки сигналів ЕРС.

В задачах діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД уникнути вказаних обмежень перетворення Фур'є дозволяє використання вейвлет-перетворення (ВП) [7]. Вейвлет-перетворення є узагальненням спектрального аналізу, однак завдяки можливості аналізу як у частотній, так і в часовій областях, дозволяє проводити аналіз та обробку сигналів і функцій, нестационарних у часі або ж неоднорідних у просторі. З урахуванням цього, можна виділити переваги використання ВП для діагностики пошкоджень стрижнів ротора (рис. 4).

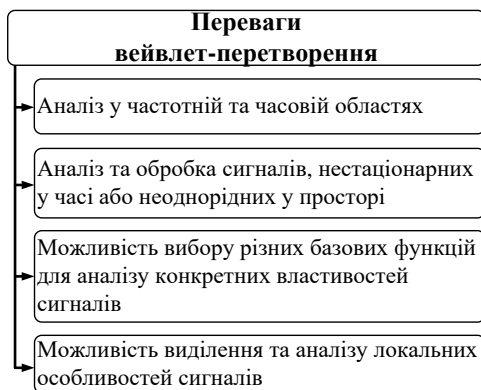


Рисунок 4 – Переваги вейвлет-перетворення сигналів при аналізі сигналів ЕРС для діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД

Таким чином, аналіз особливостей ВП дозволив встановити, що в якості методу обробки діагностичних сигналів для діагностики пошкоджень стрижнів ротора за аналізом ЕРС в обмотках статора АД доцільно використовувати вейвлет-перетворення [7, 8].

ВИБІР ФУНКЦІЇ ВЕЙВЛЕТ-БАЗИСУ. Вибір функції вейвлет-базису є важливою задачею, оскільки від результатів вибору залежить ефективність аналізу діагностичного сигналу. Метою аналізу при дослідженні є виявлення у сигналі ЕРС інформаційних ознак, викликаних наявністю пошкоджень стрижнів ротора.

Для виділення інформаційних ознак ЕРС в обмотках статора при використанні ВП спочатку необхідно вибрати загальний клас вейвлетів, потім сформулювати множину вейвлет-базисів (ВБ) з набору базисів з порядковими номерами для конкретних вейвлетних сімейств, визначити оптимальний рівень декомпозиції та вибрати найбільш оптимальний базис вейвлету.

Процес визначення оптимального ВБ містить такі етапи:

1. Вибір типу частотно-часового перетворення. Вибрано неперервне вейвлет-перетворення (НВП), яке характеризується відмінною частотно-часовою локалізацією, доступністю різних існуючих ВБ.

2. На основі необхідних характеристик ВП вибирається загальний клас ВБ. Вибрано ортогональні вейвлети з компактним носієм, для яких характерна наявність числа нульових моментів відповідно до номеру порядкового індексу базису, добре реалізується швидкий алгоритм обчислення.

3. Вибір сімейства ВБ з набором порядкових індексів. Вибрано сімейства вейвлетів Добеші (dbN), Симлета (symN) і Койфлетса (coifN), де N – числовий індекс (1, 2,...). Вибрані функції ВБ сконструйовані виходячи з необхідних вимог вейвлет-аналізу, ортогональності, компактності носія; при цьому симетрія та гладкість зростають зі збільшенням номеру порядкового індексу вейвлету. На рис. 5 наведені ψ -функції часу $\psi(t)$ та ϕ -функції масштабу $\phi(t)$ зазначених вейвлет-базисів одного рядку ($N = 4$).

4. Визначення оптимального рівня декомпозиції. Визначається на основі максимальної частоти та частоти дискретизації вихідного сигналу. Оптимальний граничний рівень для аналізованих нестационарних сигналів обчислюється за виразом [9]:

$$L_a = \left\lceil \log_2 \left(\frac{f_s}{f_m} \right) \right\rceil + 1 = -(\log_2(2f_m \Delta t)) + 1, \quad (6)$$

де L_a – оптимальний верхній рівень вейвлет-декомпозиції; f_m – верхня границя полоси частот зосередженої основної енергії сигналу (у низькочастотній області); f_s – частота дискретизації; Δt – період дискретизації.

Тобто подальший розклад аналізованого сигналу до рівнів, які перевищують знайдений поріг L_a , не буде ефективним.

5. Визначення оптимального ВБ. Для визначення оптимального ВБ з обраного сімейства вейвлетів запропоновано провести ряд досліджень для сигналів, наближених до очікуваних сигналів ЕРС в обмотках статора АД з пошкодженнями стрижнів ротора (з урахуванням того, що зубчатою є лише поверхня ротора АД). Для цього запропонована математична модель спрощеної системи котушок обмотки статора, які утворюють котушкову групу, вектори ЕРС котушок зсунуті на кут θ , який складає 10 електричних градусів.

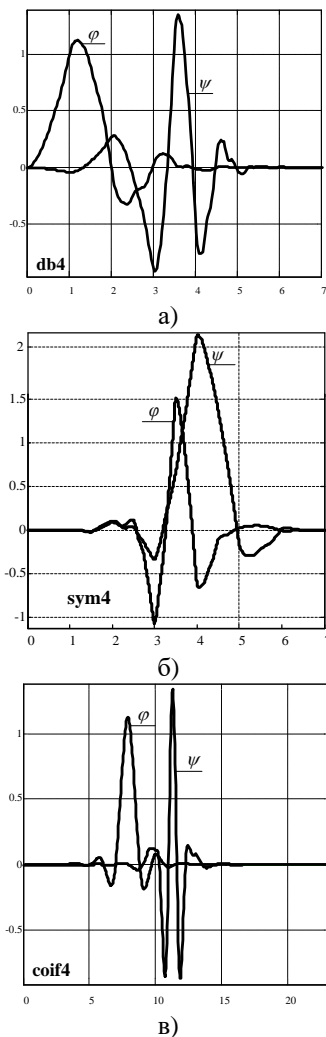


Рисунок 5 – Вейвлети Добеші (а), Симлета (б) та Койфлетса (в) 4-го порядку

Тестовий сигнал сумарної ЕРС котушкової групи обмотки статора розраховується за виразом:

$$e_{test\Sigma}(t) = e_{test1}(t) + e_{test2}(t) + e_{test3}(t). \quad (7)$$

Тестові сигнали, наближені до очікуваних ЕРС котушок обмотки статора наведені на рис. 6.

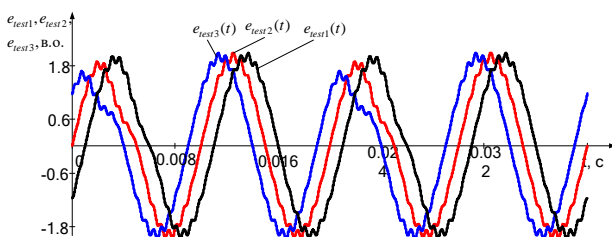


Рисунок 6 – Тестові сигнали ЕРС котушок обмотки статора, наближені до очікуваних сигналів ЕРС

Для вибору функції ВБ виконано ВП тестових сигналів ЕРС котушок з використанням вейвлет-базисів Добеші, Симлета і Койфлетса. Результати досліджень одного з тестових сигналів ЕРС котушки e_{test1} з накладеним збуренням, яке відповідає пошкодженню одного стрижня, та їх вейвлет-спектри наведені на рис. 7.

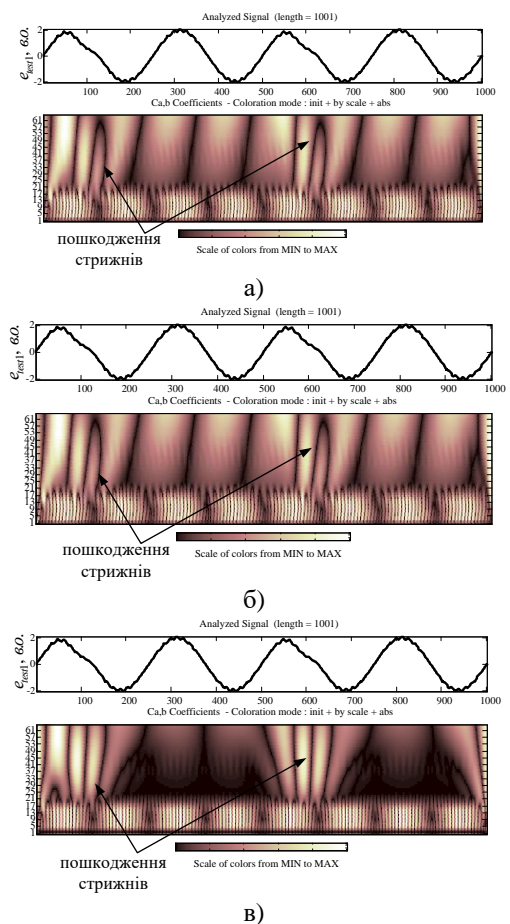


Рисунок 7 – Тестові сигнали ЕРС котушки з пошкодженням стрижнів, та їх вейвлет-спектри відповідно: а) з використанням вейвлету Добеші; б) з використанням вейвлету Симлета; в) з використанням вейвлету Койфлетса

Аналіз отриманих вейвлет-спектрів показав, що застосування вейвлету Койфлетса завдяки властивостям самого ВБ має значну надмірність, що може неоднозначно впливати на достовірність результатів діагностики. Цей базис є несиметричним.

Використання вейвлетів Добеші та Симлета дозволяє виявити збурення у тестових сигналах ЕРС котушок, які проявляються на вейвлет-спектрі у вигляді характерних ділянок з вейвлет-коефіцієнтами. Як видно з рис. 7, отримані вейвлет-спектри з базисами Добеші та Симлета ідентичні. Це пояснюється тим, що при $N=2$ вейвлети Добеші та Симлета однотипні та відрізняються тільки знаком ψ -функції. Вейвлети Добеші та Койфлетса є несиметричними та недостатньо періодичними. Певною мірою близькі до симетричних вейвлети Симлета. Тому можна зробити висновок, що при наявності накладених збурень в тестових сигналах ЕРС обмоток доцільно використання ВБ Симлета.

Обраний вейвлет Симлета має такі властивості [10]:

- масштабуюча функція і функція зсуву мають компактний носій;
- можливі НВП та дискретні перетворення із застосуванням швидкого ВП;
- забезпечується принципова можливість реконструкції сигналів і функцій;
- є симетричним вейвлетом.

Вейвлет Симлета може бути представлений у вигляді [10]:

$$\hat{\psi}(\xi) = -e^{-i\xi/2} \overline{m_0(\xi/2 + \pi)} \hat{\phi}(\xi/2), \quad (8)$$

де $\xi \in K$, $\hat{\phi}(\xi)$ – масштабуюча функція:

$$\hat{\phi}(\xi) = (2\pi)^{-1/2} \prod_{j=1}^{\infty} m_0(2^{-j}\xi),$$

$m_0(\xi)$ – тригонометричний поліном:

$$m_0(\xi) = \left(\frac{1 + e^{-i\xi}}{2} \right)^N L(\xi),$$

де N – порядок вейвлету; $L(\xi)$ – фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою, заданий у вигляді:

$$L(\xi) = P \left(\frac{\sin^2 \xi}{2} \right),$$

$P(y)$ – поліном виду:

$$P(y) = \sum_{k=0}^{N-1} \binom{N-1+k}{k} y^k.$$

Таким чином, у результаті проведених досліджень щодо вибору ВБ для НВП діагностичного сигналу було встановлено, що для аналізу сигналів ЕРС в обмотках статора в якості ВБ доцільно використовувати вейвлет Симлета.

З використанням вейвлету Симлета отримано вейвлет-спектр тестового сигналу ЕРС котушкової групи обмотки статора (рис. 8).

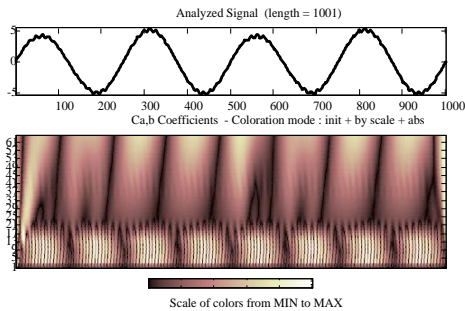


Рисунок 8 – Тестовий сигнал ЕРС котушкової групи обмотки статора $e_{test\Sigma}$ та його вейвлет-спектр

Як видно з отриманих результатів, на відміну від сигналів ЕРС котушок (рис. 7), при аналізі сигналу ЕРС котушкової групи характерні ознаки пошкодження, які проявляються у вигляді характерних ділянок на вейвлет-спектрах, накладаються одна на одну. Виходячи з цього, виникає необхідність аналізу чинників, які впливають на формування електрорушійної сили в елементах обмотки статора АД.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧИННИКІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ФОРМУВАННЯ ЕРС. Для розподіленої у просторі обмотки статора число пазів на полюс і фазу $q > 1$ розподілено на кілька ($q > 1$) послідовно з'єднаних обмоток меншого розміру, розташованих у q пазах, які знаходяться поруч. При цьому усі q котушок з'єднані між собою послідовно так, що до кінця будь-якої котушки приєднується початок наступної.

Осі розподілених в q сусідніх пазах котушки зсунуті одна відносно одної на електричний кут $\alpha Z = 2\pi p/Z$ радіан. Вектори ЕРС зсунуті між собою на той же кут, тому сумарна ЕРС дорівнюватиме геометричній сумі ЕРС усіх котушок, які входять в групу, тобто $E_q = \left| \sum E_c \right|$.

У ході досліджень враховувалися конструктивні особливості досліджуваного АД, а саме параметри статорної обмотки АД: тип обмотки – одношарова петльова; число полюсів $2p = 4$; число пазів статора $Z_1 = 36$; число пазів на полюс і фазу $q = 3$; число паралельних гілок обмотки $a = 1$; крок обмотки по пазах $y = 9$; число пазів між котушками сусідніх фаз обмотки $\lambda = 6$.

Кожна фаза обмотки статора складається із двох котушкових груп, кожна з яких, у свою чергу, містить по три котушки. Котушка фази обмотки утворена групою послідовно з'єднаних витків, які укладені у одні й ті ж пази.

Для досліджуваного АД ЕРС фази обмотки дорівнює сумі ЕРС шести котушок:

$$E_{ph} = \sum_{i=1}^6 E_{ci},$$

де E_{ci} – ЕРС i -тої котушки; i – номер котушки.

Оскільки ЕРС котушок зсунуті одна відносно одної, то як зазначалося вище, інформаційні ознаки, що є присутніми у сигналах ЕРС кожної окремої котушки та обумовлені наявністю пошкоджень стрижнів ротора, при додаванні ЕРС накладаються одна на одну.

Отже, при дослідженні пошкоджень стрижнів ротора варто враховувати число пар полюсів двигуна, схему з'єднання котушкових груп у фазі обмотки та тип обмотки статора, оскільки це спричиняє взаємне накладання інформаційних ознак пошкоджень стрижнів ротора у сигналі ЕРС.

Узагальнюючи результати досліджень, можна структурувати сукупність умов, за яких необхідно виконувати діагностику та які направлені на виявлення інформаційних ознак пошкоджень у сигналах ЕРС в елементах обмотки статора (рис. 9).

ВИСНОВКИ. 1. Проведений аналіз режимів випробування АД дозволив обґрунтувати використання режиму самовибігу двигуна для діагностики пошкоджень стрижнів ротора, оскільки він дозволяє проводити діагностику без вилучення двигуна з технологічного процесу та його розбирання, виключає вплив неякості напруги мережі живлення на результати діагностики та не залежить від попереднього режиму роботи двигуна.

2. Показано, що сигнал ЕРС в обмотках статора є похідним від сигналів електромагнітного поля АД та містить зубцеві пульсації, що дає можливість зрівняння ліній електромагнітного поля АД з геометричним розташуванням зубців ротора. Експериментально доведено, що сигнал ЕРС у додатковій вимірній обмотці статора містить інформаційні ознаки пошкоджень стрижнів ротора у вигляді спотворень форми сигналу. Встановлено, що ЕРС, яка

наводиться в обмотках статора АД загасаючими струмами ротора в режимі самовибігу, можна вико-

ристовувати в якості діагностичного сигналу для визначення пошкоджень стрижнів ротора АД.

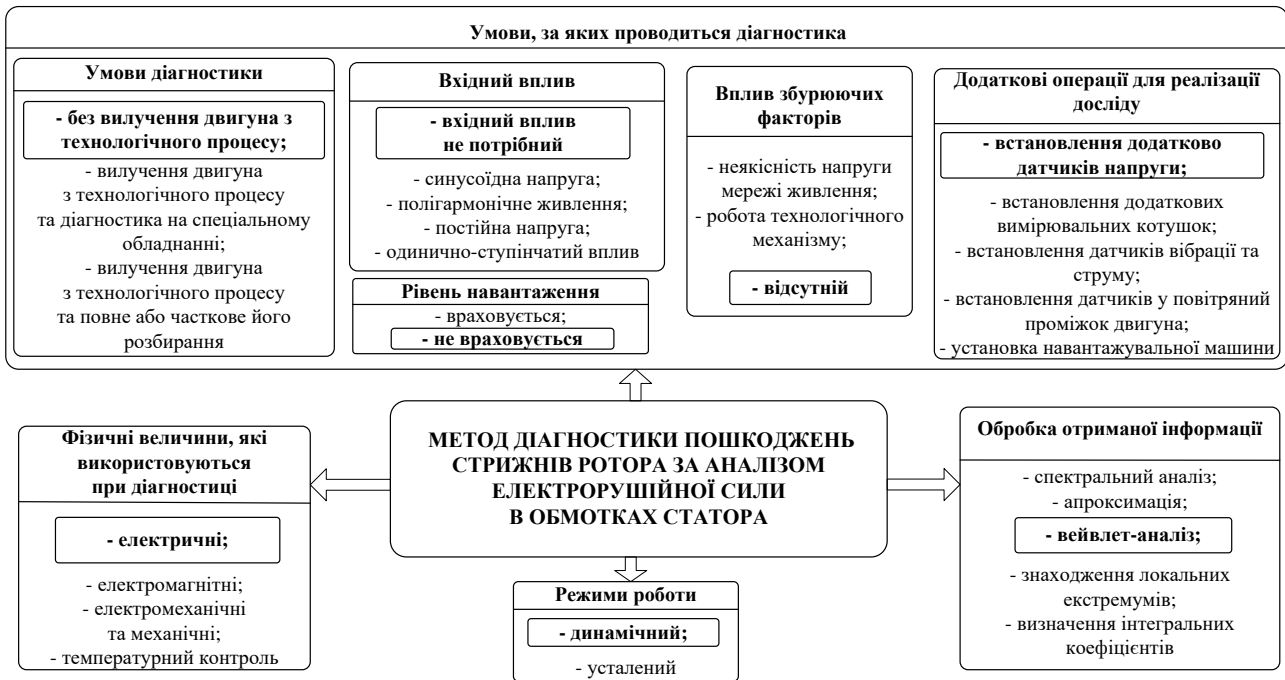


Рисунок 9 – Структурні ознаки методики дослідження впливу пошкоджень стрижнів ротора АД

3. Встановлено, що для визначення сигналів ЕРС в обмотках статора АД в режимі самовибігу необхідно виконати розрахунок електромагнітного поля у поперечному перерізі АД з використанням методу кінцевих елементів.

4. Доведено, що використання методів спектрального аналізу не дозволяє однозначно визначити кількість та взаємне розташування пошкоджених стрижнів ротора. Встановлено, що в якості методу обробки сигналу ЕРС в обмотках статора АД доцільно використовувати вейвлет-перетворення. Проведений аналіз вейвлет-базисів з урахуванням їхніх характерних особливостей у часовому і частотному просторах дозволив встановити, що для аналізу сигналів ЕРС в обмотках статора АД доцільно використовувати ортогональні вейвлети з компактним носієм.

5. Аналіз конструктивних особливостей обмоток різних типів АД та результатів моделювання показав, що на формування ЕРС в обмотках статора можуть впливати такі конструктивні чинники, як: число пар полюсів двигуна, схема з'єднання котушкових груп у фазі обмотки та тип обмотки статора, що спричиняє взаємне накладання інформаційних ознак пошкоджень стрижнів ротора у сигналі ЕРС.

ЛІТЕРАТУРА

1. Энергетический метод идентификации параметров асинхронных двигателей / М.В. Загорняк, Д.И. Родькин, Ю.В. Ромашихин, А.П. Черный. – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2013. – 164 с.
2. Метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора / А.П. Калінов, Ж.І. Ухань, І.В. Урдин // Вісник КДПУ. Наукові праці КДПУ. – Вип. 4/(57), част. 1. – Кременчук, 2009. – С. 98–101.
3. K. Drobnic, M. Nemes, R. Fiser, V. Ambrozic

«Simple detection of broken rotor bars using field-oriented control», Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, LS1b.5-1–LS1b.5-7.

4. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.

5. Faiz J., Ebrahimi B.M., «A New Pattern for Detecting Broken Rotor Bars in Induction Motors During Start-Up», IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 12, 2008, pp. 4673–4683.

6. Vaimann T., Kallaste A., «Detection of Broken Rotor Bars in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Using Fast Fourier Transform», 10th International Symposium «Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering», Pärnu, Estonia, 2011, pp. 52–56.

7. Застосування вейвлет-аналізу для діагностики обривів стрижнів роторів асинхронних двигунів / Ж.І. Ромашихіна, О.М. Андрусенко, А.П. Оксанич, В.Р. Петренко // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. Наукові праці КрНУ. – Кременчук, 2012. – Вип. 2 (73). – С. 24–28.

8. Декомпозиція сигналу електрорушійної сили обмоток статора для діагностики пошкоджень стрижнів ротора асинхронного двигуна / Ж. І. Ромашихіна, А.П. Калінов, І.А. Луценко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 4/2013 (22). – С. 27–36.

9. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. Жилейкина Я.М., Осипик Ю.И., Макарова Е.А., Васильева Л.Г. – М.: Мир, 2005. – 671 с.

10. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets / I. Daubechies. – Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. – 254 p.

THE METHODOLOGY OF RESEARCH THE ROTOR BROKEN BARS INFLUENCE WHILE DIAGNOSTICS INDUCTION MOTORS

Zh. Romashykhina, A. Kalinov

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: romashykhina.zhanna@gmail.com

Purpose. The technique of research of induction motors (IM) rotor broken bars influence with using of the electromotive force (EMF) analysis in the stator windings in the self-running-out has been presented. It has been shown that EMF signal in the stator windings is a derivative of IM electromagnetic field signals and contains tooth kink. It enables to compare IM electromagnetic field lines with geometric location of the rotor teeth. **Methodology.** The performed analyses of the methods for electromagnetic field calculation allowed substantiate the numerical methods use. It has been found out that in order to determine EMF signals in IM stator windings in the self-running-out condition it is necessary to calculate electromagnetic field in IM cross-section using the finite element method. **Practical value.** A comparative analysis of the methods for processing the diagnostics signals made it possible to determine the disadvantages of Fourier transform for diagnostics of IM rotor broken bars. **Originality.** It has been proved that the use of spectral analysis methods does not allow unambiguous determination of the number and relative position of the rotor broken bars. It has been found out that it is expedient to use wavelet-transform as a method for processing the EMF signal in IM stator windings. **Conclusions.** The performed analysis of wavelet-bases, taking into account their typical features in the time and frequency domains, made it possible to find out that it is expedient to use orthogonal wavelets with a compact support for the analysis of EMF signals in IM stator windings. Analysis of design features of various IM windings revealed that EMF generation in windings can be influenced by such factors as: number of pairs of the motor poles, the circuit of coil group connection in the winding phase and the type of the stator winding. These factors contribute to mutual superimposition of information signs of the rotor broken bars in EMF signal.

Key words: induction motor, wavelet-transform, electromotive force, finite element method, broken rotor bars.

REFERENCES

1. Zagirnyak, M.V., Rodkin, D.I., Romashykhin, Iu.V. and Chorny, O.P. *Energeticheskiy metod identifikatsii parametrov asinkhronnykh dvigateley* [Energy method identification of induction motors], ChP. Shcherbatykh A.V., Kremenchug, 2013, 164 p.
2. Kalinov, A.P., Uchan, Zh.I., Urdin, I.V. (2009), "Method of diagnostics of rotor bars damages" *Visnyk KDU. Research papers KDU*, vol. 4, no. 57, pp. 98-101.
3. Drobnic, K., Nemeč, M., Fiser, R., Ambrozic, V. "Simple detection of broken rotor bars using field-oriented control", Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012 15th International, LS1b.5-1–LS1b.5-7.
4. Vas'kovskyy, Yu. M. (2007), *Pol'ovyy analiz elektrychnykh mashyn* [Field analysis of electrical machines], K: NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine.
5. Faiz, J., Ebrahimi, B. M., "A New Pattern for Detecting Broken Rotor Bars in Induction Motors During Start-Up", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 12, 2008, pp. 4673-4683.
6. Vaimann, T., Kallaste, A., "Detection of Broken Rotor Bars in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor Using Fast Fourier Transform", 10th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering“, Pärnu, Estonia, 2011, pp. 52-56.
7. Romashykhina, Zh.I., Andrusenko, O.M., Oksanych, A.P., Petrenko, V.P. (2012), "Application by Wavelet Analysis for diagnostics of precipices of rotor bars of engine motors", *Visnyk KNU*, vol. 2, no. 73, pp. 24-28.
8. Romashykhina, Zh.I., Kalinov, A. P., Lucenko, I.A. "A decoupling of of electromotive force signal of stator bars for rotor bars damages diagnostics of engine motors" (2013), *Elektromehanichni i energosberegauchi systemy*, vol. 4, no. 22, pp. 27-36.
9. Malla, S. (2005), *Vyvlyety v obrabotke signalov* [Wavelets in signal processing], Translated by Zhileykina, Ya.M., Osipik, Yu.I., Makarova, E.A., Vasileva, L.G., Mir, Moscow, Russia.
10. Daubechies, I. *Ten Lectures on Wavelets* (1992), Society for Industrial and Applied Mathematics, 254 p.

Стаття надійшла 03.10.2016.