

УДК 621.313.333

М.В. Загірняк, Ж.І. Ромашихіна, А.П. Калінов

ДІАГНОСТИКА ПОШКОДЖЕНЬ СТРИЖНІВ РОТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗА АНАЛІЗОМ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ В ОБМОТКАХ СТАТОРА

Розроблено метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора асинхронних двигунів на основі вейвлет-аналізу електрорушійної сили, яка наводиться в обмотках статора в режимі самовибігу двигуна. Розроблено метод декомпозиції сигналу електрорушійної сили фази обмотки статора асинхронного двигуна на сигнали електрорушійних сил активних сторін котушок обмотки з використанням теорії Z-перетворення. Ефективність запропонованого методу діагностики підтверджена експериментально.

Разработан метод диагностики поврежденной стержней ротора асинхронных двигателей на основе вейвлет-анализа электродвижущей силы, наводящейся в обмотках статора в режиме самовыбега двигателя. Разработан метод декомпозиции сигнала электродвижущей силы фазы обмотки статора асинхронного двигателя на сигналы электродвижущих сил активных сторон катушек обмотки с использованием теории Z-преобразования. Эффективность предложенного метода диагностики подтверждена экспериментально.

ВСТУП

Асинхронні двигуни (АД) є важливим елементом більшості електроприводів промислових механізмів. Виявлення несправностей АД на ранніх стадіях має вирішальне значення для підвищення надійності роботи виробничих механізмів і мінімізації подальшого виникнення несправностей двигунів. У сучасній промисловості широко використовуються АД з короткозамкненим ротором (КЗР). Часто експлуатація АД супроводжується важкими умовами роботи, що спричиняє виникнення різноманітних за характером пошкоджень. Аналіз статистичних даних показав, що близько 7 % відмов АД відбуваються через пошкодження стрижнів ротора [1]. Пошкодження стрижнів короткозамкненої обмотки ротора приводять до викривлення електромагнітного поля (ЕМП) у повітряному проміжку АД, зростання втрат в обмотках статора і ротора, підвищеної вібрації двигуна, зменшення частоти обертання під навантаженням, виникнення пульсацій струму статора у всіх фазах. Свочасне виявлення пошкоджень дозволить уникнути їх подальшого розвитку, зменшити час відновлення, скоротити витрати на обслуговування, уникнути простоїв обладнання, підвищити ефективність роботи двигунів та виробничих механізмів. Отже, діагностика пошкоджень стрижнів ротора АД є актуальною науково-практичною задачею.

Інформація про викривлення поля внаслідок наявності пошкоджень присутня у тому чи іншому вигляді у різних сигналах: струмах, активній споживаній потужності, електрорушійній силі (ЕРС). На сьогоднішній день відомі різні методи діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД [1-14]. Широкого використання у сфері діагностики набули методи спектрального аналізу сигналів струмів статора (MCSA) [1, 4, 12, 13]. Діагностика пошкоджень стрижнів ротора АД проводиться за наявністю двох симетричних відносно частоти мережі живлення піків у спектрі струму. При цьому вказаний метод не дає задовільних результатів при проведенні діагностики в режимі неробочого ходу та не враховує вплив неякісності напруги мережі живлення на результати діагностики. Крім того, використання результатів перетворення Фур'є сигналів струмів не дозволяє однозначно визначити ступінь пошкодження, кількість та взаємне розташування пошкоджених стрижнів ротора АД.

Крім методів спектрального аналізу струмів статора АД, широкого застосування набули методи вібродіагностики пошкоджень стрижнів ротора, метод аналізу споживаної потужності, методи тепловізійного контролю. Також у сфері діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД дедалі частіше набувають розвитку методи з використанням вейвлет-перетворення [9, 15].

У роботі [16] виконано аналіз існуючих методів діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД та запропоновано їх класифікацію за рядом ознак: за режимами роботи АД, за фізичними величинами, які використовуються при діагностиці, за методами обробки інформації та прийняття рішення стосовно наявного пошкодження.

У роботі [2] показано, що аналіз сигналу ЕРС має певні переваги: відсутність впливу якості напруги живлення та рівня навантаження.

Мета даної роботи полягає у представленні результатів та основних етапів досліджень щодо розробки методу діагностики пошкоджень стрижнів ротора асинхронних двигунів шляхом аналізу сигналу електрорушійної сили в обмотках статора в режимі самовибігу двигуна з використанням вейвлет-перетворення та декомпозиції на базі Z-перетворення.

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМУ ВИПРОБУВАННЯ ТА ДІАГНОСТИЧНОГО СИГНАЛУ

Одним із важливих етапів розробки методу діагностики є вибір режиму випробування, оскільки від цього залежить ефективність діагностики. Для вибору режиму випробування проведено аналіз можливих режимів роботи АД.

Усталені режими роботи.

Режим неробочого ходу. При проведенні діагностики у режимі неробочого ходу двигун, як правило, необхідно вилучати з технологічного процесу.

Режим роботи під навантаженням. На результати діагностики суттєво впливає як рівень навантаження двигуна (його зміна у часі або коливання), так і неякісність напруги мережі живлення.

Режим короткого замикання. При проведенні досліджень у режимі короткого замикання виникають обмеження, обумовлені тим, що за результатами іден-

© М.В. Загірняк, Ж.І. Ромашихіна, А.П. Калінов

тифікації параметрів АД можна визначити лише еквівалентний опір ротора. Отже, в такому режимі результати діагностики мають низьку достовірність.

Динамічні режими роботи.

Пускові режими. Проведення діагностики у пускових режимах обмежене через складність аналізу результатів діагностики. Крім того, ускладнено аналіз результатів діагностики через вплив зміни електромагнітних параметрів АД під час пуску.

Режим самовибігу. Проведення діагностики у режимі самовибігу двигуна, на відміну від вищенаведених режимів роботи АД, має ряд переваг:

а) дозволяє проводити діагностику без вилучення двигуна з технологічного процесу та його розбирання;

б) виключає вплив неякісності напруги мережі живлення та роботу технологічного механізму на результати діагностики;

в) результати практично не залежать від попереднього режиму роботи двигуна, що дозволяє проводити діагностику як при планово-ремонтних зупинках АД, так і по завершенню технологічного процесу;

г) вимірюванню підлягає напруга в обмотках статора. Датчиком магнітного потоку при вимірюванні є сама обмотка статора, при цьому вимірювання магнітного потоку є більш інформативним, ніж вимірювання струму. При діагностиці у режимі самовибігу магнітний потік вимірюється без використання додатково датчиків потоку чи датчиків Холла;

д) реалізація методу не вимагає додаткових джерел тестових впливів.

Таким чином, проведений аналіз режимів випробування АД дозволив визначити, що найбільш ефективним для діагностики пошкоджень стрижнів ротора є режим самовибігу двигуна.

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 вказаних параметрів у режимі самовибігу АД.

Як зазначалося вище, інформацію про викривлення магнітного поля унаслідок пошкодження ротора містить ЕРС статора. Форма сигналу ЕРС в провідниках обмотки відображає характер розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку АД. Як відомо, наявність пазів на статорі і роторі АД призводить до появи зубцевих просторових гармонік магнітного поля [17]. Зубцеві пульсації також присутні в сигналі ЕРС обмотки статора та дають можливість співставлення ліній магнітного поля з геометричним розташуванням зубців. У свою чергу, пошкодження стрижнів ротора обумовлюють спотворення магнітного поля в повітряному проміжку АД. Тому можна зробити припущення про те, що сигнал ЕРС обмотки статора містить інформацію як про нерівномірність магнітного поля, обумовлену зубчатістю статора і ротора, так і про спотворення поля, викликані наявністю пошкоджень стрижнів ротора. Для підтвердження цієї гіпотези проводилися експериментальні дослідження для АД з пошкодженнями стрижнів ротора, в пазах статора якого в межах полюсної поділки була укладена

вимірювальна обмотка. Результати експериментів у режимі самовибігу двигуна показали, що в сигналі ЕРС, яка наводиться у вимірювальній обмотці, присутні характерні спотворення, які відповідають пошкодженим стрижням ротора (рис. 1,б), та які відсутні в сигналі ЕРС непошкодженого АД (рис. 1,а). Отже, ЕРС в обмотках статора доцільно використовувати в якості діагностичного сигналу.

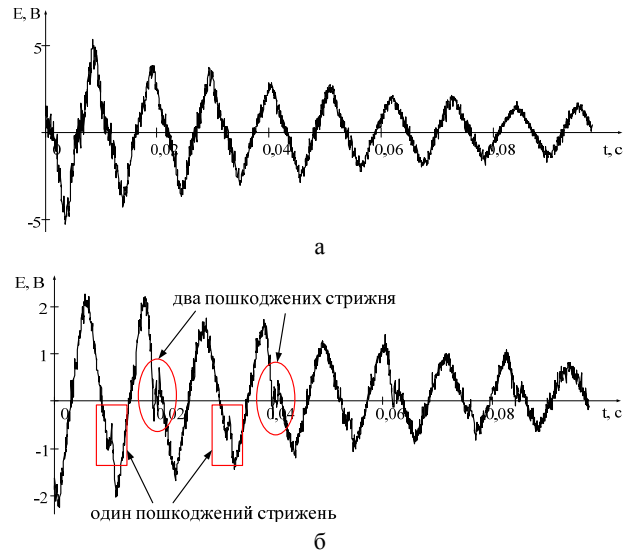


Рис. 1. ЕРС у вимірювальній обмотці непошкодженого АД (а) та АД з пошкодженням трьох стрижнів ротора (б) у режимі самовибігу двигуна

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ

Для дослідження методу діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД за аналізом ЕРС в обмотках статора застосовувався ряд математичних моделей: колові математичні моделі АД та математична модель з використанням методу кінцевих елементів (МКЕ). Зв'язок між математичними моделями, вхідні дані для моделювання та вихідні параметри наведені у вигляді структурної схеми на рис. 2.



Рис. 2. Зв'язок між математичними моделями при дослідженні методу діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД

Для визначення початкових значень струмів у стрижнях ротора в момент відключення двигуна від мережі живлення розроблена математична модель АД

у трифазній системі координат шляхом представлення ротора у вигляді системи короткозамкнених стрижнів, кількість яких можна задавати при дослідженнях. Перевагою математичної моделі є можливість дослідження різних режимів роботи АД з будь-яким числом пошкоджених стрижнів ротора.

За результатами моделювання для досліджуваного АД типу АІР80В4У2 ($P_n=1,5$ кВт, $n_n=1395$ об/хв, $\eta=77\%$, $\cos\phi=0,81$) наведено перехідні процеси струмів у кількох стрижнях ротора АД:

- при пуску без навантаження та самовибігу двигуна (рис. 3,а);
- при пуску без навантаження, накиді навантаження ($t=0,3$ с) та самовибігу двигуна ($t=0,5$ с) (рис. 3,б).

Аналіз результатів моделювання показав, що у момент відключення як навантаженого, так і ненавантаженого АД від мережі живлення спостерігається значний стрибок струмів у стрижнях ротора. У подальшому струми у стрижнях ротора змінюються за експоненціальним законом. Наведена математична модель АД у трифазній системі координат дозволяє отримати розподіл миттєвих значень струмів у стрижнях ротора у режимі самовибігу АД. Але математична модель не дозволяє розглядати окремо, як елементи обмоток, стрижень та частину короткозамкненого кільця, та не враховує кількість пар полюсів статора.

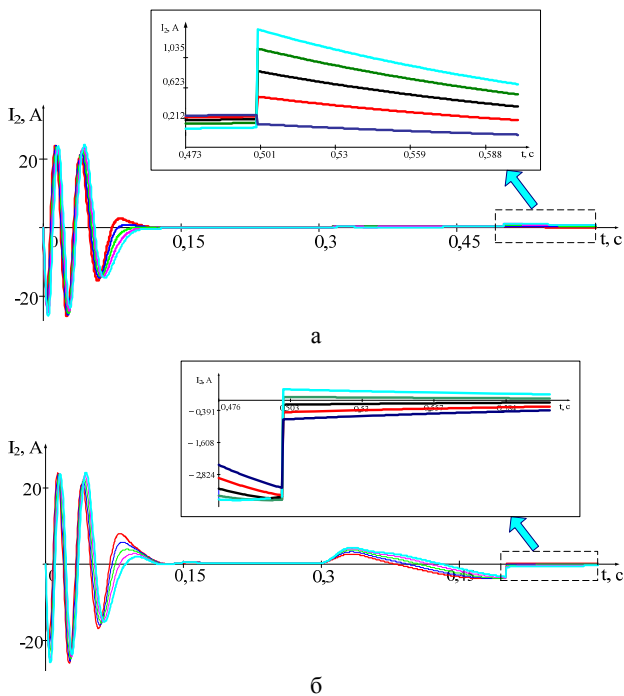


Рис. 3. Перехідні процеси струмів у стрижнях ротора АД: при пуску без навантаження та самовибігу двигуна (а); при накиді навантаження ($t=0,3$ с) та самовибігу двигуна ($t=0,5$ с) (б)

Для уточнення початкових значень струмів у стрижнях ротора у момент відключення двигуна від мережі з урахуванням опорів стрижнів Z_{cti} та короткозамкнених кілець Z_{ki} розроблена колова модель АД, в якій кількість електричних кіл ротора відповідає кількості стрижнів. Заступна схема ротора досліджуваного АД наведена на рис. 4.

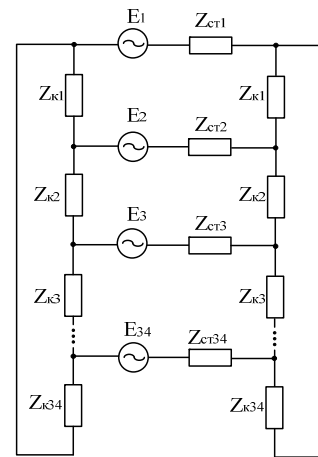


Рис. 4. Заступна схема ротора АД

Пошкодження стрижня ротора задавалось як повне порушення електричного контакту з короткозамкненим кільцем ротора. При цьому розподіл миттєвих значень струмів у стрижнях непошкодженого ротора має вигляд синусоїди. При наявності пошкодження струм у пошкодженому стрижні дорівнює нулю, а в інших стрижнях ротора відбувається такий перерозподіл струмів, який забезпечує виконання першого закону Кірхгофа (рис. 5).

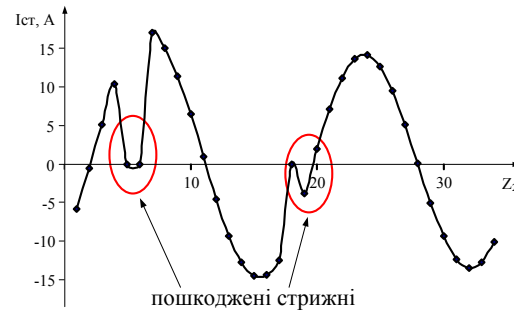


Рис. 5. Розподіл струмів у стрижнях ротора АД

Розроблена колова математична модель дозволила отримати значення струмів у стрижнях ротора АД у момент відключення двигуна від мережі живлення з різним числом пошкоджених стрижнів та з урахуванням геометричного розташування пошкодження. Отримані значення струмів у стрижнях ротора в момент відключення двигуна від мережі живлення використовувалися для розрахунку ЕМП АД.

Для розрахунку ЕРС в обмотках статора розроблена математична модель двовимірного ЕМП у поперечному перерізі АД, яка базується на МКЕ. Розроблена математична модель АД дозволила виконати розрахунок ЕМП у поперечному перерізі АД в режимі самовибігу двигуна.

Математична модель враховує геометрію двигуна, магнітні та електричні властивості його активних матеріалів. Розрахунок ЕМП АД проводився для двох повних обертів ротора із кроком повороту в один електричний градус. При цьому враховано зниження частоти обертання ротора в режимі самовибігу двигуна.

При моделюванні враховувалися конструктивні особливості досліджуваного АД: кожна фаза розподіленої обмотки складається з двох котушкових груп, кожна з яких, у свою чергу, містить по три котушки.

Котушка фази обмотки утворена групою послідовно з'єднаних витків, укладених в одні й ті ж пази. З урахуванням цього в роботі було розглянуто формування ЕРС однієї активної сторони котушки, котушки, котушкової групи і фази обмотки статора досліджуваного АД.

Розрахунок ЕМП у поперечному перерізі АД проведено в автоматизованому режимі з використанням мови програмування LUA. Для цього розроблено програмний модуль за допомогою LUA-скрипта. Отримана модель може бути використана для розрахунку ЕМП АД будь-якої потужності та різних динамічних режимів роботи. Послідовність дій при розрахунку ЕМП у поперечному перерізі АД в режимі самовибігу двигуна наведено на рис. 6.



Рис. 6. Послідовність дій при розрахунку ЕМП у поперечному перерізі АД

У результаті розрахунку ЕМП в режимі самовибігу двигуна фіксувалися миттєві значення векторного магнітного потенціалу на кожному кроці обертання ротора та отримувалася розподіл ліній магнітного потоку (рис. 7) у момент відключення АД від мережі живлення для непошкодженого двигуна і з пошкодженнями стрижнів ротора (на рис. 7,б пошкоджені стрижні позначені чорним кольором). Вибір номерів і розташування пошкоджених стрижнів здійснювався у прив'язці до фізичного досліджуваного АД зі штучно внесеними пошкодженнями ротора.

Результати аналізу показали, що у непошкодженому АД спостерігається симетричний розподіл ліній ЕМП. При наявності пошкоджених стрижнів ротора змінюється інтенсивність розподілу ліній магнітного поля. Відповідно магнітне поле АД стає несиметричним.

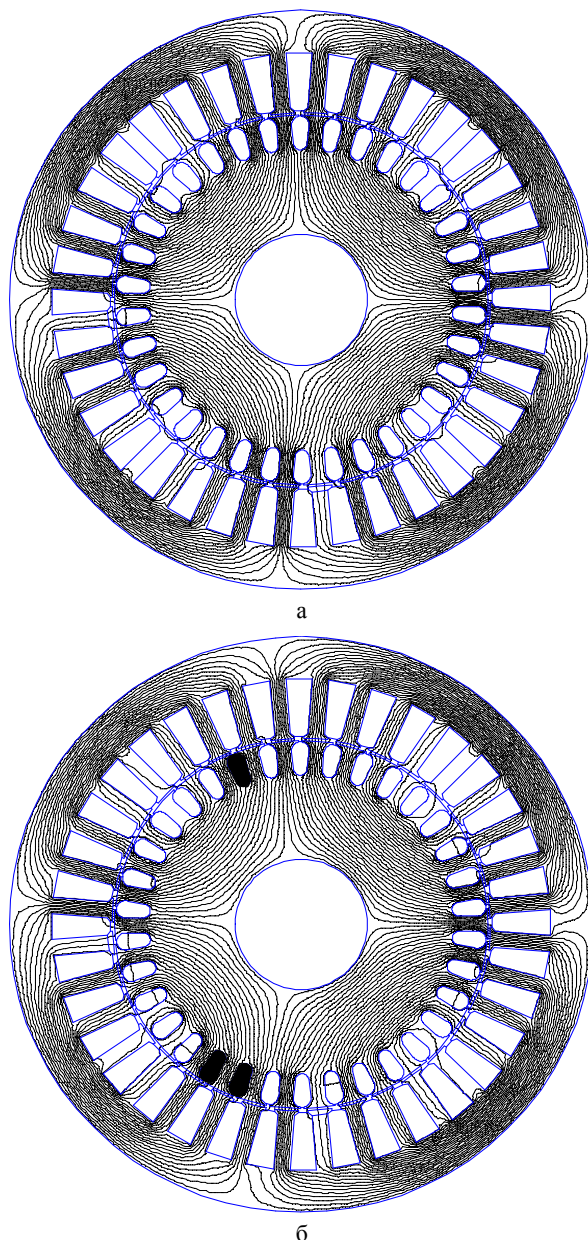


Рис. 7. Лінії магнітного потоку непошкодженого (а) і АД з пошкодженням стрижнів ротора (б)

За результатами розрахунку ЕМП [18] виконувалася розрахунок ЕРС в елементах обмотки статора. Отримані в результаті розрахунку ЕРС однієї активної сторони котушки, котушки, котушкової групи та фази обмотки статора АД з пошкодженням стрижнів ротора наведені на рис. 8.

Аналіз отриманих результатів показав, що в ЕРС однієї активної сторони котушки присутні як зубцеві пульсації, так і спотворення форми сигналу, викликані наявністю пошкоджень стрижнів ротора.

Візуальний аналіз отриманих сигналів показав, що в ЕРС котушки (рис. 8,б) інформаційні ознаки, які проявляються у вигляді спотворень форми сигналу, стають важко помітними, а в сигналах ЕРС котушкової групи і фази обмотки (рис. 8,в,г) – практично відсутні.

Для підтвердження універсальності розробленої математичної моделі дослідження проводилися для двохполюсного АД потужністю 1,5 кВт та для однополюсного АД потужністю 75 кВт (рис. 9).

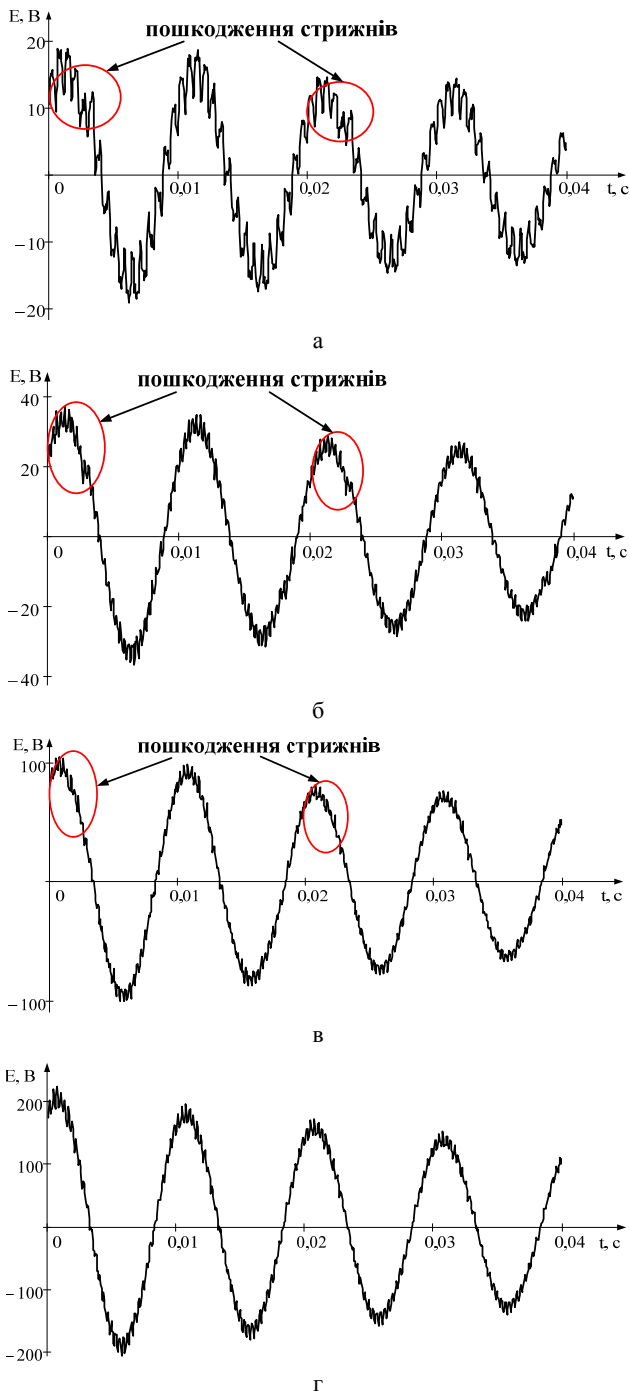


Рис. 8. ЕРС відповідно однієї активної сторони котушки (а), котушки (б), котушкової групи (в) та фази (г) обмотки статора двохполюсного АД з пошкодженням стрижнів ротора

Дослідження проводилися з урахуванням різного числа пошкоджених стрижнів та їх взаємного розташування. Аналіз результатів моделювання однополюсного АД (рис. 9) також показав, що в сигналі ЕРС присутні інформаційні ознаки пошкоджень стрижнів ротора.

Таким чином, розроблені математичні моделі дозволили дослідити спотворення форми сигналу ЕРС обмоток статора АД для розробки методу діагностики пошкоджень стрижнів ротора.

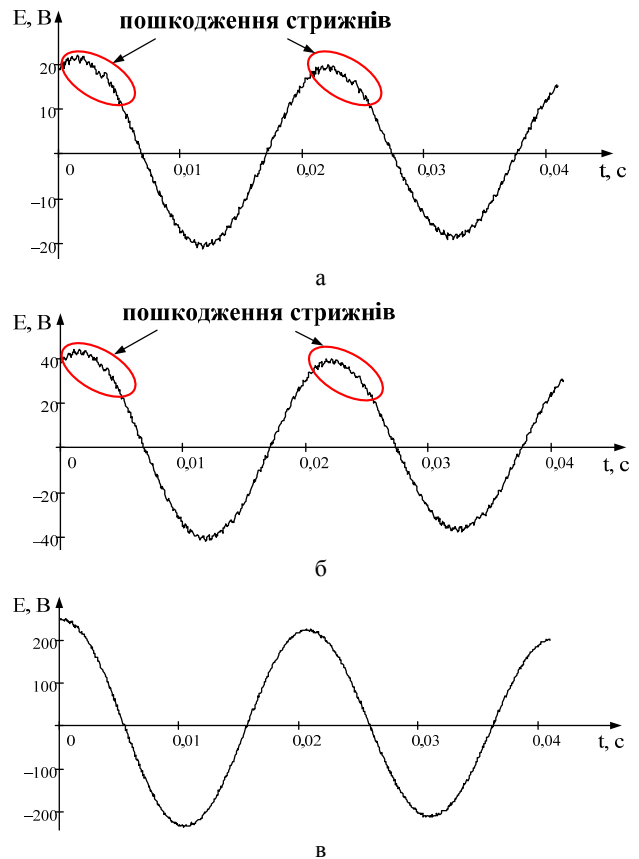


Рис. 9. ЕРС відповідно однієї активної сторони котушки (а), котушки (б) та фази (в) обмотки статора однополюсного АД з пошкодженням стрижнів ротора

РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ПОШКОДЖЕНЬ СТРИЖНІВ РОТОРА АД ЗА АНАЛІЗОМ ЕРС В ОБМОТКАХ СТАТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Одним із найбільш поширених методів визначення пошкоджень є спектральний аналіз сигналів з використанням перетворення Фур'є. Як зазначалося вище, 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 період загасання сигналу. Використання перетворення Фур'є для аналізу нестационарних сигналів можливе лише на ділянках, на яких не змінюється період сигналу. У ході досліджень [18] доведено, що використання методів спектрального аналізу не дозволяє однозначно визначити кількість та взаємне розташування пошкоджених стрижнів ротора. Наведених недоліків дозволяє уникнути використання вейвлет-перетворення (ВП), що, на відміну від перетворення Фур'є, дає можливість проводити аналіз сигналів як у частотній, так і в часовій областях.

У роботі [19] виконувалися дослідження по вибору функції вейвлет-базису (ВБ). Як відомо, при вейвлет-перетворенні сигналу відбувається масштабування вейвлету в певне постійне число разів і його зміщення у часі на фіксовану відстань, яка залежить від масштабу. Дослідження показали, що для аналізу сигналів ЕРС в обмотках статора АД доцільно використовувати ортогональні вейвлети

з компактним носієм, наприклад, вейвлети Симлета та Койфлетса.

З використанням відповідних вейвлет-базисів було виконано неперервне вейвлет-перетворення (НВП) сигналів ЕРС для АД з пошкодженням стрижнів ротора (рис. 10).

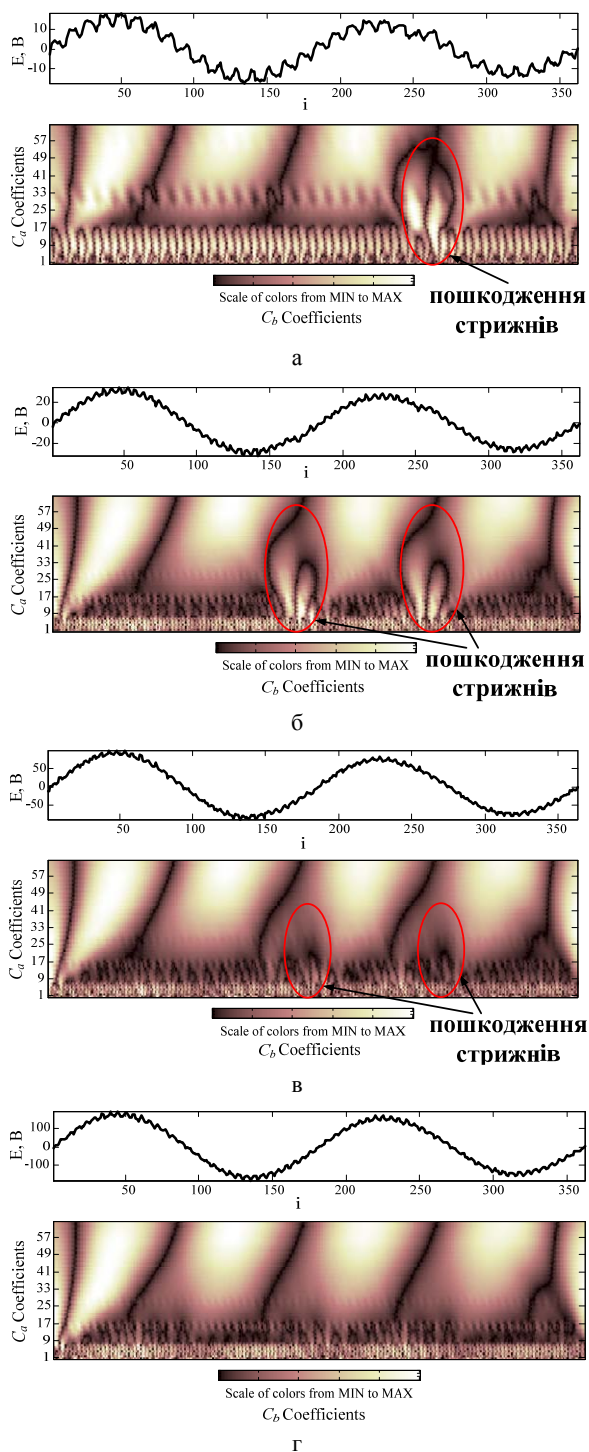


Рис. 10. Сигнали та вейвлет-спектри ЕРС однієї активної сторони котушки (а), котушки (б), котушкової групи (в) та фази (г) обмотки статора АД з пошкодженням стрижнів ротора

Аналіз результатів показав, що на вейвлет-спектрі сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки (рис. 10,а) в області високих та середніх частот спостерігаються зубцеві гармоніки, кількість яких відпо-

відає числу стрижнів ротора. Також аналіз вейвлет-спектру на рис. 10,а показав, що характерні ділянки, виділені пунктиром, відповідають місцезнаходженню пошкоджених стрижнів.

Для кількісної оцінки впливу пошкоджень стрижнів ротора запропоновано використовувати аналіз значень коефіцієнтів вейвлет-розкладу на спектрах з характерними ділянками, які відповідають місцезнаходженню пошкоджених стрижнів. Для цього при аналізі умовно відсікаються високочастотна область спектру, на якій проявляються зубцеві частоти, та низькочастотна область. Характерні ділянки зі сплесками вейвлет-коефіцієнтів знаходяться в області середніх частот, на яких проявляються пошкодження стрижнів. Тому запропоновано використовувати коефіцієнт, який визначає середнє значення суми коефіцієнтів вейвлет-розкладу для області середніх частот [18]:

$$K_{\Sigma a} = -\frac{\sum_{i=a}^A k_a}{n}, \quad (1)$$

де k_a – значення коефіцієнтів вейвлет-розкладу, a і A – початкове і кінцеве значення масштабів вейвлет-спектру відповідно, n – число коефіцієнтів вейвлет-розкладу.

Відповідно побудовані коефіцієнти вейвлет-розкладу $K_{\Sigma a}$ для непошкодженого АД та АД з пошкодженням стрижнів ротора. Розраховано різницю отриманого коефіцієнту та апроксимовано загасаючою синусоїдою для АД з різним числом пошкоджених стрижнів (рис. 11).

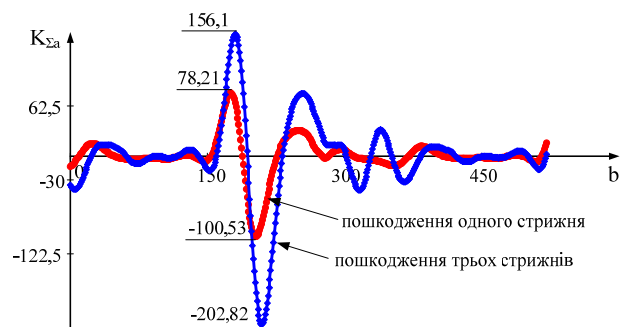


Рис. 11. Різниця коефіцієнтів вейвлет-розкладу для області середніх частот

Результати аналізу показали, що величина амплітуди сплеску отриманого коефіцієнту $K_{\Sigma a}$ відображає ступінь пошкодження ротора. Так, в місці знаходження двох пошкоджених стрижнів поруч величина коефіцієнту $K_{\Sigma a}$ зростає у два рази (з 78,21 до 156,1 та з -100,53 до -202,82) у порівнянні із випадком пошкодження одного стрижня.

Отже, у результаті проведених досліджень на основі вейвлет-аналізу сигналів ЕРС в обмотках статора у режимі самовибігу АД розроблено метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД, який дозволяє визначати кількість та взаємне розташування пошкоджених стрижнів ротора.

Однак у ході досліджень з'ясовано, що при аналізі сигналів ЕРС котушки, котушкової групи та фази обмотки виникають ускладнення. Так, на вейвлет-спектрі ЕРС котушки (рис. 10,б) спостерігається

"дублювання" ділянок, які відповідають місцезнахоженню пошкоджених стрижнів. Це пояснюється додаванням ЕРС двох активних сторін котушки, які зсунуті в просторі на кут, рівний $\pi/2$ (для АД з двома парами полюсів). Тому на вейвлет-спектрі ділянки з вейвлет-коефіцієнтами, які характеризують пошкодження, також зсунуті на цей просторовий кут. Аналіз вейвлет-спектрів сигналів ЕРС котушкової групи (рис. 10,в) і фази обмотки в цілому (рис. 10,г) показав, що внаслідок додавання сигналів ЕРС відбувається накладення інформаційних ознак пошкоджень. Таким чином, при визначенні ЕРС фази обмотки статора АД інформаційні ознаки накладаються одна на одну і ускладнюють достовірне визначення взаємного розташування пошкоджених стрижнів ротора. Тому запропоновано виконувати аналіз сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки статора, виділеного із сумарного сигналу ЕРС фази обмотки з використанням теорії Z-перетворення [20]. При цьому сигнал ЕРС фази обмотки статора спочатку розділяється на сигнали ЕРС котушкових груп цієї обмотки. Далі сигнал ЕРС однієї з котушкових груп при відомих кутах зсуву між котушками в пазах статора розділяється на сигнали ЕРС котушок, який, у свою чергу, розділяється на сигнали ЕРС двох активних сторін котушки. В якості вихідного сигналу для моделювання використовувався сигнал ЕРС фази обмотки статора, отриманий в результаті розрахунку ЕМП АД з пошкодженням стрижнів ротора (рис. 8,г).

Аналіз сигналів ЕРС (рис. 12) показав, що отриманий в результаті виділення із сумарного сигналу ЕРС фази обмотки статора сигнал ЕРС однієї активної сторони котушки відповідає аналогічному сигналу ЕРС, отриманому в результаті розрахунку ЕМП.

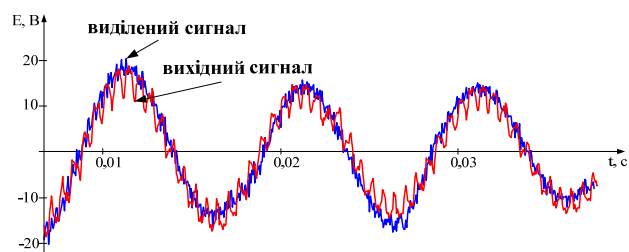


Рис. 12. Порівняння вихідного та виділеного сигналів ЕРС однієї активної сторони котушки

Результати порівняння вейвлет-спектрів (рис. 13) показали, що спотворення сигналу ЕРС, які відповідають місцезнахоженню пошкоджених стрижнів, відображаються на вейвлет-спектрі у вигляді характерних ділянок з вейвлет-коефіцієнтами.

Для підтвердження ефективності методу декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки статора на сигнали ЕРС активних сторін котушки проводилися дослідження для АД з пошкодженням двох стрижнів ротора, які зсунуті один відносно одного на різні величини кута. Результати дослідження показали, що використання методу декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки на сигнали ЕРС активних сторін котушки дозволяє виділити інформаційні ознаки пошкоджень стрижнів, які неможливо виявити у сигналі ЕРС фази.

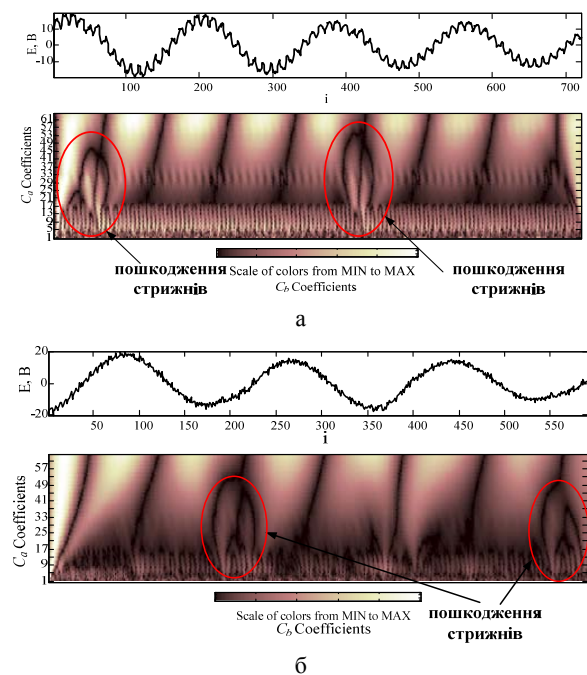


Рис. 13. Вихідний (а) та виділений в результаті декомпозиції (б) сигнали ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки статора АД та їх вейвлет-спектри

Таким чином, розроблено метод декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки статора АД на сигнали ЕРС активних сторін котушок обмотки з використанням теорії Z-перетворення, який за рахунок виділення інформаційних ознак, присутніх у сигналі ЕРС однієї активної сторони котушки, дозволяє підвищити достовірність діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНОГО МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ

Для експериментальної перевірки розробленого методу діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД використовувався комп'ютеризований лабораторний стенд (рис. 14), який містить досліджуваний АД типу АІР80В4У2, блок датчиків напруги для вимірювання миттєвих значень напруги у фазах АД, аналогово-цифровий перетворювач та персональний комп'ютер.

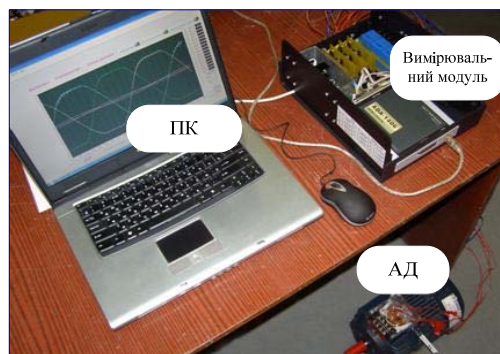


Рис. 14. Зовнішній вигляд вимірювального комплексу

При проведенні експерименту використовувалися три однакових ротори, які можуть бути замінені один одним. Імітацію пошкоджень стрижнів створено шляхом висвердлювання отворів на одному із роторів в місцях кріплення стрижнів до короткозамкнених кілець (рис. 15).

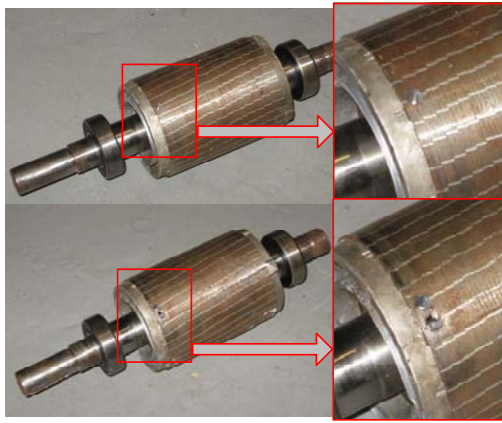


Рис. 15. Розташування пошкоджених стрижнів на роторі

Аналіз експериментального сигналу ЕРС фази обмотки статора показав, що на вейвлет-спектрі відсутні характерні ділянки, які відповідають місцезнаходженню пошкоджених стрижнів ротора. Тому з експериментального сигналу ЕРС фази обмотки був виділений сигнал ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки статора та виконано його вейвлет-перетворення (рис. 16).

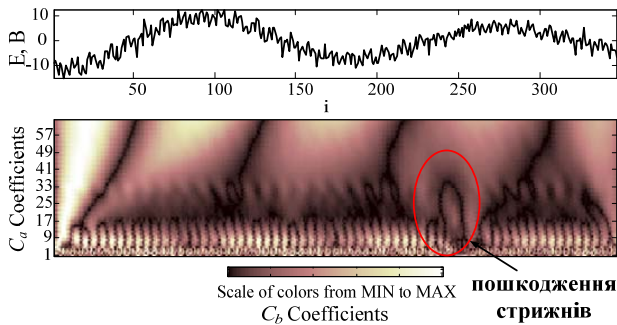


Рис. 16. Вейвлет-спектр сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки, виділеного із експериментального сигналу ЕРС фази обмотки статора

Отримані результати показали, що за вейвлет-аналізом виділеного сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки можна визначити взаємне розташування пошкоджених стрижнів ротора.

Таким чином, результати експериментальних досліджень (рис. 16) відповідають результатам, отриманим в результаті моделювання (рис. 13,а). Деякі відмінності виділеного сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки, отриманого в результаті експериментальних досліджень та моделювання, пов'язані з багатозначними перетвореннями дискретних сигналів.

ВИСНОВКИ

У результаті виконаних досліджень вирішено актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності діагностики пошкоджень стрижнів ротора асинхронних двигунів шляхом вейвлет-аналізу сигналу електрорушійної сили в обмотках статора в режимі самовибігу двигуна.

Розроблені колові математичні моделі АД дозволили отримати розподіл миттєвих значень струмів у стрижнях ротора у режимі самовибігу для двигунів з різним числом пошкоджених стрижнів та з урахуванням геометричного розташування пошкодження.

Запропонована методика розрахунку ЕМП у поперечному перерізі АД з використанням колових моделей та моделі на основі МКЕ дозволила оцінити вплив пошкоджень стрижнів ротора на сигнал ЕРС в обмотках статора в режимі самовибігу двигуна.

Розроблений метод декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки статора АД на сигнали ЕРС активних сторін котушок з використанням теорії Z-перетворення дозволив підвищити достовірність діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД за рахунок виділення інформаційних ознак, присутніх у сигналі ЕРС однієї активної сторони котушки.

Запропонований метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД у режимі самовибігу двигуна на основі вейвлет-аналізу сигналу ЕРС в обмотках статора дозволив визначити кількість та взаємне розташування пошкоджених стрижнів ротора.

Ефективність запропонованого методу діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД підтверджена експериментальним шляхом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин. – М.: Высш. шк., 1988. – 232 с.
2. Yazidi A., Henaou H., Capolino G-A. Broken rotor bars fault detection in squirrel cage induction machines. International conference "Electric machines and drives". 2005, IEEE, pp. 741-747.
3. Nemeč M., Drobnič K., Nedeljković D., Fišer R., Ambrožič V. Detection of broken bars in induction motor through the analysis of supply voltage modulation. IEEE transactions on industrial electronics, 2010, no.8, pp. 2879-2888.
4. Imeryuz M., Mergen A.F., Ustun O. A method to analyze asynchronous machines with broken rotor bars. International symposium on power electronics, Electrical drives, Automation and motion. 2010, pp. 269-272.
5. Cabanas F., Pedrayes Glez F., González Ruiz M., Melero M.G., Orcajo G.A., Cano J.M., Rojas C.H. A new on-line method for the early detection of broken rotor bars in asynchronous motors working under arbitrary load conditions, IEEE, 2005, pp. 662-669.
6. Douglas H., Pillay P., Ziarani A.K. Broken rotor bar detection in induction machines with transient operating speeds. IEEE transactions on energy conversion, 2005, no 1, pp. 135-141.
7. Drobnič K., Nemeč M., Fišer R., Ambrožič V. Simplified detection of broken rotor bars in induction motors controlled in field reference frame. Control engineering practice, 2012, vol.20, pp. 761-769.
8. Faiz J., Ebrahimi B.M. A new pattern for detecting broken rotor bars in induction motors during start-up. IEEE Transactions on magnetics, 2008, vol.44, no.12, pp. 4673-4683.
9. Neelam M., Ratna D. Rotor faults detection in induction motor by wavelet analysis. International journal of engineering science and technology, 2009, vol.1(3), pp. 90-99.
10. 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.
11. Zagimyak M., Mamchur D., Kalinov A. Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals. Przegląd elektrotechniczny (Electrical review), 2012, no.12b, pp. 221-224.
12. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – №1(31). – С. 50-52.

13. Aküner C., Temiz I. Symmetrically broken rotor bars effect on the stator current of squirrel-cage induction motor. *Przegląd elektrotechniczny* (Electrical review), 2011, no.3, pp. 313-314.
14. Сивокобыленко В.Ф., Полковниченко Д.В., Кукуй К.А. Диагностика асинхронного электропривода по данным измерений рабочего режима // *Вісник НТУ "ХПІ"*. – 2003. – №10. – С. 502-505.
15. Zagirnyak M., Romashihina Zh., Kalinov A. Diagnostic of broken rotor bars in induction motor on the basis of its magnetic field analysis. *Acta Technica Jaurinensis*, 2013, vol.6, no.1, pp. 115-125.
16. Ухань Ж.І., Калінов А.П. Класифікація методів діагностики пошкоджень обмоток ротора асинхронних двигунів // *Вісник КДУ ім. М. Остроградського*. – 2010. – №3(62). – Ч.2. – С. 138-144.
17. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х томах. Том 1: Учебник для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2004. – 656 с.
18. Загірняк М.В., Ромашихіна Ж.І., Калінов А.П. Диагностика поврежденной стержней ротора в асинхронном двигателе на основании анализа его магнитного поля // *Вісник НТУ "ХПІ"*. – 2012. – №49(955). – С. 38-48.
19. Ромашихіна Ж.І., Андрусенко О.М., Оксанич А.П., Петренко В.Р. Застосування вейвлет-аналізу для діагностики обривів стрижнів роторів асинхронних двигунів // *Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*. – 2012. – №2(73). – С. 24-28.
20. Ромашихіна Ж.І., Калінов А.П., Луценко І.А. Декомпозиція сигналу електрорушійної сили обмоток статора для діагностики пошкоджень стрижнів ротора асинхронного двигуна // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2013. – №4(22). – С. 27-36.

REFERENCES: 1. Kotelenc N.F., Kuznecov N.L. *Ispytaniya i nadezhnost' elektricheskikh mashin* [Reliability and testing of electrical machines]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1988. 232 p. 2. Yazidi A., Henaio H., Capolino G-A. Broken rotor bars fault detection in squirrel cage induction machines. *Int. Conf. "Electric machines and drives"*, IEEE, 2005, pp. 741-747. 3. Nemes M., Drobnič K., Nedeljković D., Fišer R., Ambrožič V. Detection of broken bars in induction motor through the analysis of supply voltage modulation. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2010, no.8, pp. 2879-2888. 4. Imeryuz M., Mergen A.F., Ustun O. A method to analyze asynchronous machines with broken rotor bars. *Int. Symposium on power electronics, electrical drives, automation and motion*, 2010, pp. 269-272. 5. Cabanas F., Pedrayes Glez F., González Ruiz M., Melero M.G., Orcajo G.A., Cano J.M., Rojas C.H. A new on-line method for the early detection of broken rotor bars in asynchronous motors working under arbitrary load conditions. *IEEE*, 2005, pp. 662-669. 6. Douglas H., Pillay P., Ziarani A.K. Broken rotor bar detection in induction machines with transient operating speeds. *IEEE transactions on energy conversion*, 2005, no.1, pp. 135-141. 7. Drobnič K., Nemes M., Fišer R., Ambrožič V. Simplified detection of broken rotor bars in induction motors controlled in field reference frame. *Control engineering practice*, 2012, vol.20, pp. 761-769. 8. Faiz J., Ebrahimi B.M. A new pattern for detecting broken rotor bars in induction motors during start-up. *IEEE transactions on magnetics*, 2008, vol.44, no.12, pp. 4673-4683. 9. Neelam M., Ratna D. Rotor faults detection in induction motor by wavelet analysis. *International journal of engineering science and technology*, 2009, vol.1(3), pp. 90-99. 10. Vaimann T., Kallaste A. Detection of broken rotor bars in three-phase squirrel-cage induction motor using fast Fourier transform. *10th Int. symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering"*, Pärnu, Estonia, 2011, pp. 52-56.

11. Zagirnyak M., Mamchur D., Kalinov A. Comparison of induction motor diagnostic methods based on spectra analysis of current and instantaneous power signals. *Przegląd Elektrotechniczny – Electrical Review*, 2012, no.12b, pp. 221-224. 12. Petuhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostics of the state motors. The method of spectral analysis of current consumption. *Novosti elektrotehniki – Electrical engineering news*, 2005, no.31, pp. 50-52. 13. Aküner C., Temiz I. Symmetrically broken rotor bars effect on the stator current of squirrel-cage induction motor. *Przegląd Elektrotechniczny – Electrical Review*, 2011, no.3, pp. 313-314. 14. Sivokobylenko V.F., Polkovnichenko D.V., Kukuj K.A. Diagnostics of engine motors from data of operating condition measuring. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2003, no.10, pp. 502-505. 15. Zagirnyak M., Romashihina Zh., Kalinov A. Diagnostic of broken rotor bars in induction motor on the basis of its magnetic field analysis. *Acta Technica Jaurinensis*, 2013, vol.6, no.1, pp. 115-125. 16. Uhan' Zh.I., Kalinov A.P. Classification of the methods of the rotor damages diagnostics of inductions motors. *Visnyk KDU im. M. Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2010, no.3(62), ch.2, pp. 138-144. 17. Ivanov-Smolenskij A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, MEI Publ., 2004. 656 p. 18. Zagirnyak M.V., Romashykhina Zh.I., Kalinov A.P. Diagnostic of broken rotor bars in induction motor on the basis of its magnetic field analysis. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2012, no.49(955), pp. 38-48. 19. Romashykhina Zh.I., Andrusenko O.M., Oksanych A.P., Petrenko V.R. Using of wavelet-analysis for diagnostics of the rotor bars damages of induction motors. *Visnyk KrNU im. M. Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 2012, no.2(73), pp. 24-28. 20. Romashykhina Zh.I., Kalinov A.P., Lucenko I.A. The decomposition of signal of electromotive force of the stator windings for diagnostics of broken rotor bars of induction motors. *Electromechanichni i energozberigayuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2013, no.4(22), pp. 27-36.

Поступила (received) 22.09.2014

*Загірняк Михайло Васильович¹, д.т.н., проф.,
Ромашихіна Жанна Іванівна¹, здобувач,*

Калінов Андрій Петрович¹, к.т.н., доц.,

*¹Кременчуцький національний університет
ім. Михайла Остроградського,*

39600, Полтавська обл., Кременчук, вул. Першотравнева, 20,

тел/phone +38 098 2645258,

e-mail: mzagirn@kdu.edu.ua, romashihina_zhanna@mail.ru,

andrii.kalinov@gmail.com

M.V. Zagirnyak¹, Zh.I. Romashykhina¹, A.P. Kalinov¹

*¹Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University
20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine*

The diagnostics of induction motors rotor bar breaks based on the analysis of electromotive force in the stator windings.

A method for diagnostics of the induction motor rotor bar breaks, based on the wavelet-analysis of the electromotive force induced in the stator windings in the rundown mode is developed. A method for decomposition of the electromotive force of the stator winding phase to the electromotive force signals of the active sides of winding coils using Z-transformation theory is developed. The effectiveness of the proposed diagnostic method was experimentally confirmed.

Key words – induction motor, broken rotor bars, disconnecting the motor from the network electromotive force, Z-transformation.