

УДК 621.313.333

**ДЕКОМПОЗИЦІЯ СИГНАЛУ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ОБМОТОК СТАТОРА
ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ПОШКОДЖЕНЬ СТРИЖНІВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА****Ж. І. Ромашихіна, А. П. Калінов, І. А. Луценко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Надано розвиток методу діагностики пошкоджень стрижнів ротора асинхронних двигунів за аналізом сигналу електрорушійної сили, що наводиться в обмотках статора після відключення двигуна від мережі живлення. На основі розрахунку електромагнітного поля у повітряному проміжку асинхронного двигуна показано, що в сигналі електрорушійної сили фази обмотки статора відсутні інформаційні ознаки, які відповідають спотворенням електромагнітного поля від пошкоджень стрижнів ротора. Запропоновано використовувати декомпозицію сигналу електрорушійної сили фази обмотки статора на сигнали електрорушійних сил активних сторін котушки з використанням теорії Z -перетворення, що дозволяє виділити інформаційні ознаки пошкоджень стрижнів, які неможливо виявити у сигналі електрорушійної сили фази. Використання вейвлет-аналізу виділеного сигналу електрорушійної сили однієї активної сторони котушки дозволяє підвищити достовірність діагностики пошкоджень стрижнів ротора асинхронних двигунів. Використання декомпозиції діагностичного сигналу, який є сумою коефіцієнтів вейвлет-розкладу сигналу електрорушійної сили фази обмотки статора, дозволяє спростити процедуру виділення інформаційних ознак пошкоджень стрижнів ротора. Ефективність запропонованого методу діагностики підтверджена експериментально.

Ключові слова: асинхронний двигун, пошкодження стрижнів ротора, відключення двигуна від мережі живлення, електрорушійна сила, Z -перетворення.

**ДЕКОМПОЗИЦІЯ СИГНАЛА ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ОБМОТОК СТАТОРА
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ СТЕРЖНЕЙ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ****Ж. И. Ромашихина, А. П. Калинов, И. А. Луценко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Представлено развитие метода диагностики поврежденных стержней ротора асинхронных двигателей по анализу сигнала электродвижущей силы, которая наводится в обмотках статора после отключения двигателя от сети. На основании расчета электромагнитного поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя показано, что в сигнале электродвижущей силы фазы обмотки статора теряются информационные признаки, которые соответствуют искажениям электромагнитного поля от поврежденных стержней ротора. Предложено использовать декомпозицию сигнала электродвижущей силы фазы обмотки статора на сигналы электродвижущих сил активных сторон катушки с использованием теории Z -преобразования, что позволяет выделить информационные признаки поврежденных стержней, которые невозможно выявить в сигнале электродвижущей силы фазы. Использование вейвлет-анализа выделенного сигнала электродвижущей силы одной активной стороны катушки позволяет повысить достоверность диагностики поврежденных стержней ротора асинхронных двигателей. Использование декомпозиции диагностического сигнала, являющегося суммой коэффициентов вейвлет-разложения сигнала электродвижущей силы фазы обмотки статора, позволяет упростить процедуру выделения информационных признаков поврежденных стержней ротора. Эффективность предложенного метода диагностики подтверждена экспериментально.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, повреждения стержней ротора, отключение двигателя от питающей сети, электродвижущая сила, Z -преобразование.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На сьогодні у більшості електроприводів (ЕП) робочих механізмів використовуються асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором (КЗР). Умови технологічних процесів часто передбачають роботу АД при підвищеній температурі, вологості робочого середовища, комутаційних перенапругах, технологічних перевантаженнях тощо. Перелічені чинники зумовлюють передчасне старіння обладнання та знижують ресурс його роботи. Згідно зі статистичними даними, близько 7% відмов АД загальнопромислового використання відбуваються через пошкодження стрижнів ротора [1, 2]. Для АД з алюмінієвою обмоткою на роторі пошкодження стрижнів трапляються рідше, ніж в АД з мідною обмоткою ротора. При цьому для роторів зі зварною алюмінієвою обмоткою пошко-

дження стрижнів відбуваються частіше, ніж для литих роторів [3].

Пошкодження стрижнів короткозамкненої обмотки ротора призводять 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 послідовно у всіх фазах. Тому своєчасне виявлення місця та ступеня пошкоджень дозволить уникнути їх розвитку, зменшити час відновлення, скоротити витрати на обслуговування, уникнути простоїв обладнання, підвищити ефективність роботи двигунів і виробничих механізмів.

Існують різні методи діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД [4–11]. Однак аналіз існуючих

методів діагностики показав, що більшість із них вимагають виведення двигуна з робочого процесу і його розбирання [4, 5, 9–11]. Відомі методи діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД у робочому режимі, наприклад, методи спектрального аналізу струмів [9–11] не дають задовільних результатів при проведенні діагностики в режимі неробочого ходу [9–11] та не враховують вплив неякісності напруги мережі живлення на результати діагностики. Крім того, використання результатів перетворення Фур'є сигналів струмів не дозволяє однозначно визначити кількість та взаємне розташування пошкоджених стрижнів роторів АД.

У роботі [12] запропоновано метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора після відключення АД від мережі живлення. У цьому режимі в обмотках статора наводиться електрорушійна сила (ЕРС), яка обумовлена згасанням струмів в обмотках ротора, що продовжує обертатися. У такому режимі вплив параметрів живлення відсутній, результати діагностики практично не залежать від рівня навантаження у робочому режимі, а вимірювачем поля в повітряному проміжку є сама обмотка статора.

Однак при аналізі сигналу ЕРС фази обмотки необхідно враховувати, що на його формування можуть впливати такі конструктивні фактори, як число пар полюсів двигуна, схема з'єднання котушкових груп у фазі обмотки між собою (послідовне, паралельне, послідовно-паралельне з'єднання), тип обмотки статора. Так, при аналізі сигналу ЕРС фази статора можуть виникати труднощі, пов'язані із взаємним накладенням інформаційних ознак, що відповідають пошкодженням окремих стрижнів ротора. Це пов'язане з тим, що котушки обмотки статора АД розподілені по його внутрішній поверхні зі зсувом на кут, рівний $\gamma = 2\pi / Z_1$, де Z_1 – кількість пазів статора, і, відповідно, ЕРС фази обмотки статора є сумою ЕРС котушок цієї обмотки.

Метою роботи є підвищення достовірності діагностики пошкоджень стрижнів ротора АД шляхом виділення інформаційних ознак пошкоджень, присутніх у сигналі ЕРС однієї активної сторони котушки, з використанням теорії Z-перетворення.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для оцінки впливу вищеперелічених факторів на формування ЕРС фази обмотки статора та спотворення інформаційних ознак проводилося математичне моделювання ЕМП у поперечному перерізі непошкодженого АД та АД з пошкодженнями стрижнів ротора з використанням програми [13].

При проведенні моделювання враховувалися конструктивні особливості обмотки досліджуваного АД ($P = 1,5$ кВт, $n = 1395$ об/хв, $\eta = 0,77$, $\cos \varphi = 0,81$): тип обмотки – одношарова петльова; число полюсів $2p = 4$; число пазів статора $Z_1 = 36$; число пазів на полюс і фази $q = 3$; 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 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.

Розглянемо формування ЕРС фази обмотки статора АД.

ЕРС котушки визначається виразом [14]

$$E_c = \omega_c E_t, \quad (1)$$

де ω_c – число витків котушки; E_t – ЕРС витка обмотки.

Котушкова група містить низку котушок з однаковим числом витків, які розташовані в сусідніх пазах. Котушки з'єднані послідовно й відносяться до однієї фази обмотки (рис. 1,а). Котушки зсунуті на електричний кут γ , відповідно ЕРС цих котушок зсунуті на такий же кут (рис. 1,б). ЕРС E_q котушкової групи дорівнює геометричній сумі ЕРС окремих котушок цієї групи (рис. 1,в).

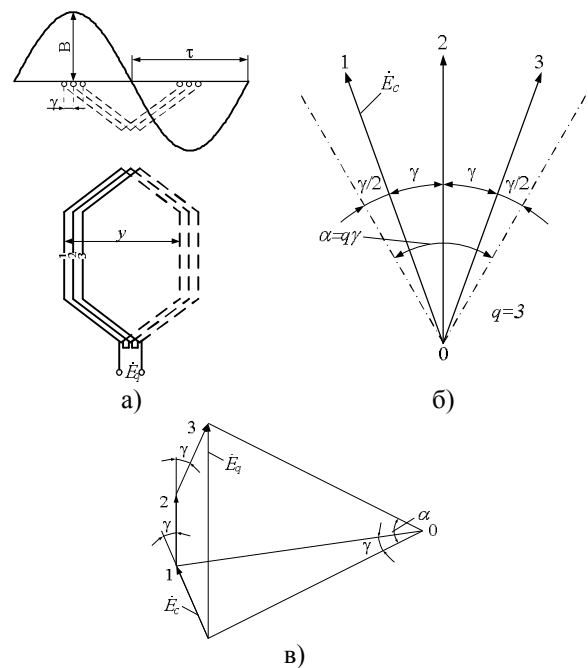


Рисунок 1 – Котушкова група в магнітному полі (а), ЕРС котушок (б) і векторна діаграма визначення ЕРС котушкової групи (в) обмотки статора АД

Позначення, прийняті на рис. 1: B – амплітуда магнітної індукції основної гармоніки поля в повітряному проміжку; τ – полюсна поділлка; α – кут фазної зони.

У загальному випадку ЕРС фази обмотки статора дорівнює геометричній сумі ЕРС усіх котушкових груп, що утворюють цю фазу.

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

$$\dot{E}_{ph} = \sum_{i=1}^6 \dot{E}_{ci}, \quad (2)$$

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

Оскільки ЕРС котушок зсунуті одна відносно одної, то, як зазначалося вище, інформаційні ознаки,

які присутні у сигналах ЕРС кожної окремої котушки та обумовлені наявністю пошкоджень стрижнів ротора, при додаванні ЕРС накладаються одна на одну.

Для аналізу інформативності сигналів ЕРС, які наводяться в одній активній стороні котушки, котушці, котушкочовій групі та фазі обмотки статора, запропонована математична модель плоскопаралельного (двовимірного) електромагнітного поля в поперечному перерізі АД з використанням методу кінцевих елементів (МКЕ) [12].

Розрахунок ЕМП АД було проведено для двох повних обертів ротора з кроком повороту на один електричний градус в автоматизованому режимі з використанням LUA-скрипта. Набір команд, якими

визначається LUA-скрипт, може бути змінений відповідно до задач, поставлених при розрахунку. Отримана модель може бути використана для дослідження АД будь-якої потужності та різних динамічних режимів роботи, які визначаються тільки початковими значеннями струмів у пазах статора і ротора. При цьому враховується зниження частоти обертання ротора після відключення двигуна від мережі.

У результаті розрахунку ЕМП визначалися миттєві значення векторного магнітного потенціалу (ВМП), потокозчеплення та ЕРС однієї активної сторони котушки, котушки, котушкочовій групі та фазі обмотки статора. Отримані в результаті розрахунку поля сигнали ЕРС наведено на рис. 2.

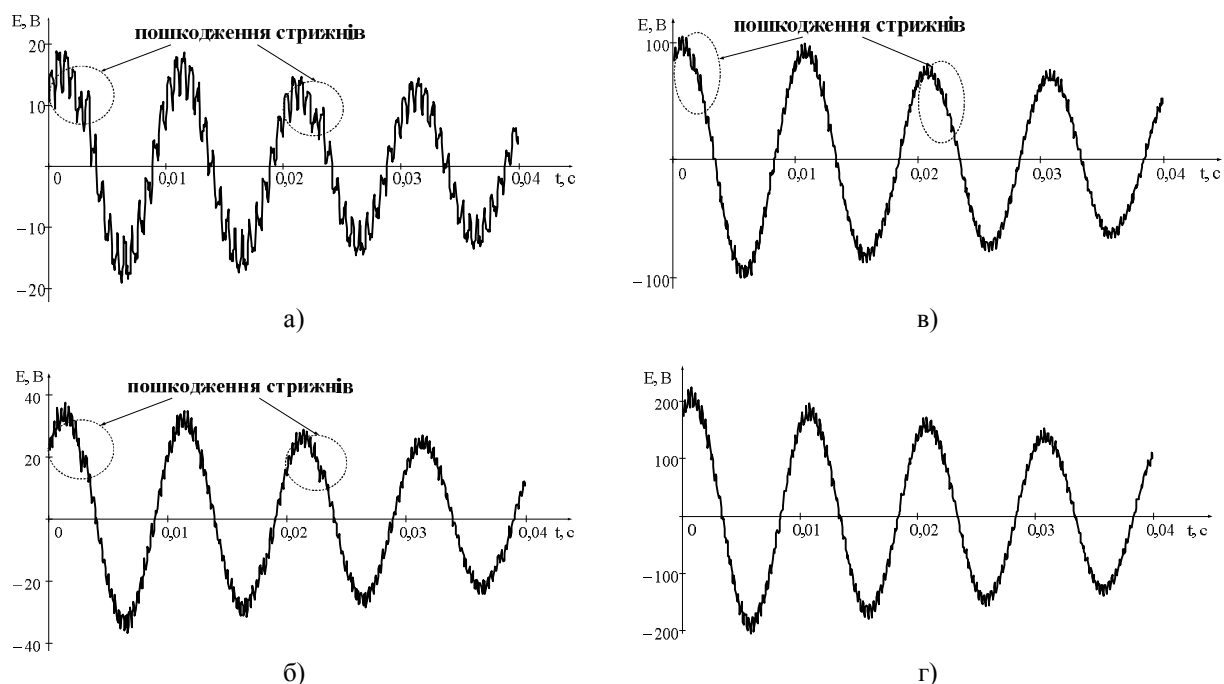


Рисунок 2 – Сигнали ЕРС, відповідно, однієї активної сторони котушки (а), котушки (б), котушкочовій групі (в) та фазі (г) обмотки статора АД з пошкодженнями стрижнів ротора

Аналіз отриманих результатів показав, що в сигналі ЕРС однієї активної сторони котушки присутні як зубцеві пульсації, так і спотворення форми сигналу, викликані наявністю пошкоджень стрижнів ротора. Візуальний аналіз показує, що в сигналі ЕРС котушки (рис. 2,б) інформаційні ознаки, які проявляються у вигляді спотворень форми сигналу, стають важко помітними, а в сигналах ЕРС котушкочовій групі й фазі обмотки (рис. 2,в,г) – практично відсутні.

Таким чином, сигнал ЕРС фази обмотки статора не містить в явному вигляді ознак, характерних при пошкодженні стрижнів ротора, на відміну від сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки. Для підтвердження цього було проведено аналіз отриманих сигналів для АД з пошкодженнями стрижнів ротора з використанням неперервного вейвлет-перетворення (НВП) (рис. 3).

Аналіз отриманих результатів показав, що на

вейвлет-спектрі сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки (рис. 3,а) в області високих частот спостерігаються зубцеві гармоніки, кількість яких відповідає числу стрижнів ротора.

Також аналіз вейвлет-спектру (рис. 3,а) показує, що характерні ділянки, виділені пунктиром, відповідають місцезнаходженню пошкоджених стрижнів.

Однак при аналізі сигналів ЕРС котушки, котушкочовій групі та фази обмотки виникають ускладнення. Так, на вейвлет-спектрі ЕРС котушки (рис. 3,б) спостерігається «дублювання» ділянок, які відповідають місцезнаходженню пошкоджених стрижнів. Це пояснюється додаванням ЕРС двох активних сторін котушки, які зсунуті в просторі на кут, рівний $\pi/2$ (для досліджуваного АД). Тому на вейвлет-спектрі ділянки з вейвлет-коефіцієнтами, що характеризують пошкодження, також зсунуті на цей просторовий кут. Аналіз вейвлет-спектрів сиг-

налів ЕРС котушкової групи (рис. 3,в) і фази обмотки в цілому (рис. 3,г) показав, що внаслідок додавання сигналів ЕРС відбувається накладення характерних ділянок на вейвлет-спектрах, що ускладнює достовірне визначення місцезросташування пошкоджених стрижнів ротора.

Тому в роботі запропоновано виконувати аналіз сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки статора, виділеного із сумарного сигналу ЕРС фази обмотки.

Блок-схему декомпозиції сигналу ЕРС фази об-

мотки статора досліджуваного АД типу АИР80В4У2 з урахуванням конструктивних особливостей (фаза обмотки складається з двох котушкових груп, кожна з яких, у свою чергу, містить по три котушки) наведено на рис. 4. 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.

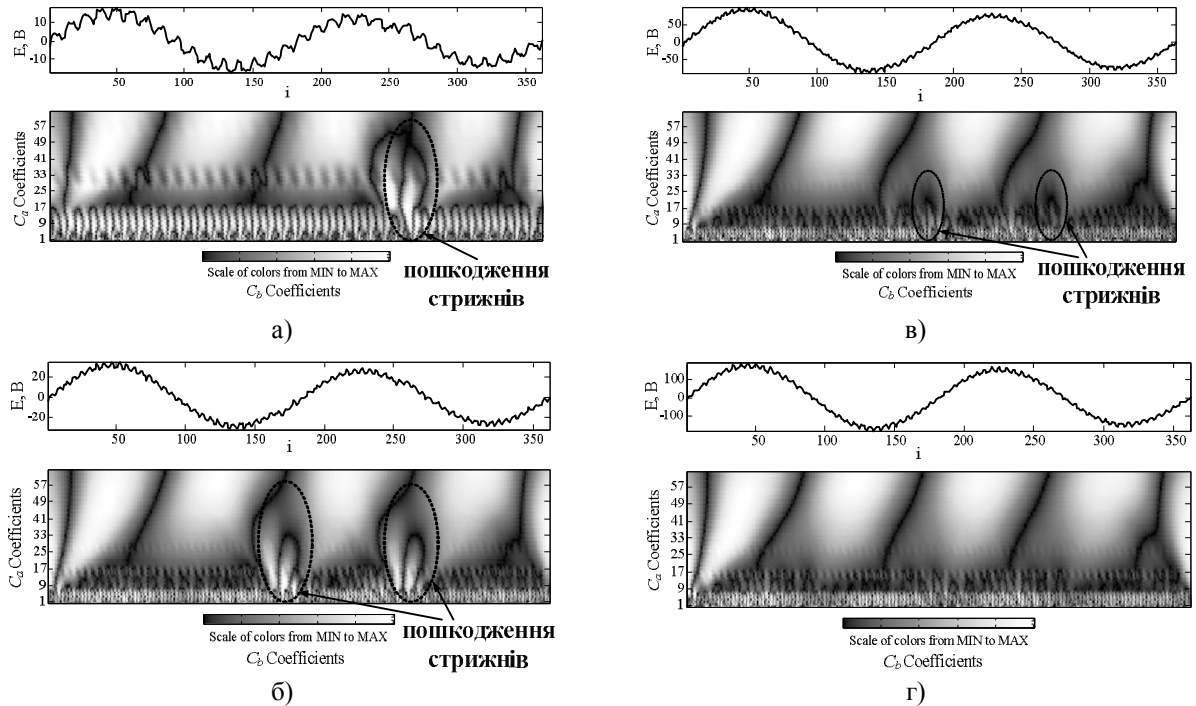


Рисунок 3 – Сигнали ЕРС однієї активної сторони котушки (а), котушки (б), котушкової групи (в) та фази (г) обмотки статора АД з пошкодженнями стрижнів ротора та їх вейвлет-спектри відповідно

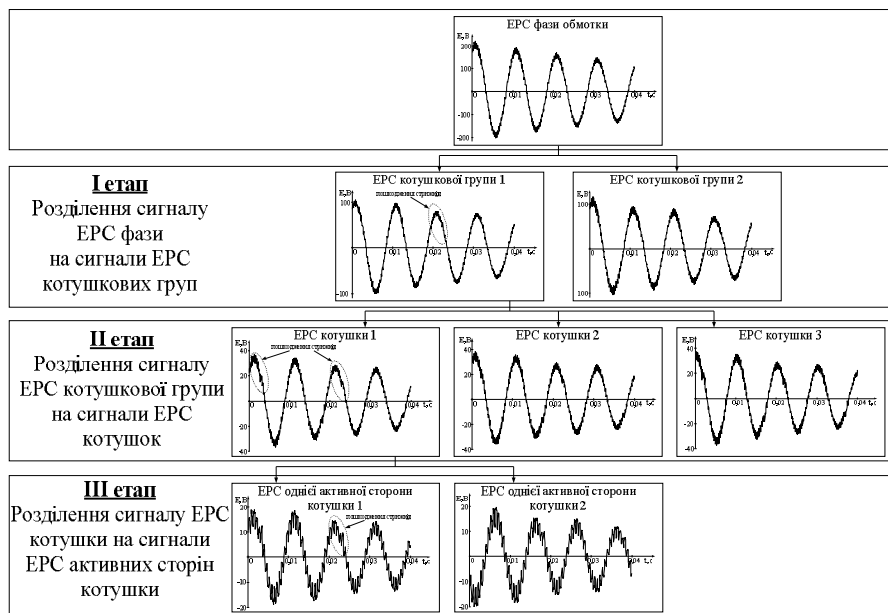


Рисунок 4 – Блок-схема декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки статора АД

У подальшому для спрощення пояснень щодо способу отримання сигналів ЕРС в елементах обмотки статора АД введемо наступні позначення:

– вихідний сигнал – сигнал ЕРС одного з елементів обмотки статора, розрахований за результатами моделювання електромагнітного поля у поперечному перерізі АД;

– виділений сигнал – сигнал ЕРС одного з елементів обмотки статора, отриманий шляхом декомпозиції сумарного сигналу на сигнали його складових.

Виділення сигналу ЕРС елементів обмотки статора виконується з використанням теорії зворотного Z-перетворення [15].

Структурну схему математичної моделі виділення сигналу ЕРС котушки із сигналу ЕРС котушкової групи наведено на рис. 5.

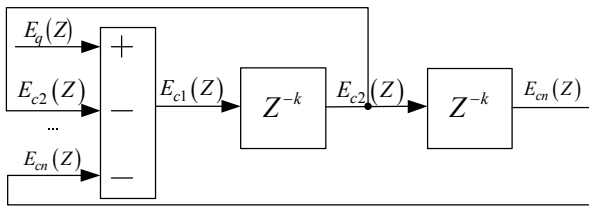


Рисунок 5 – Структурна схема математичної моделі виділення сигналу ЕРС котушки із сумарного сигналу ЕРС котушкової групи

Позначення, прийняті на рис. 5: $E_{c1}(Z)$, $E_{c2}(Z)$, $E_{c3}(Z)$ – Z-образи дискретних сигналів ЕРС котушок; n – число котушок, які утворюють котушкову групу (для досліджуваного АД котушкова група містить три котушки); $E_q(Z)$ – Z-образ дискретного сигналу ЕРС котушкової групи.

Порівняння двох сигналів ЕРС котушкової групи обмотки статора (вихідного та виділеного) для АД з пошкодженням одного стрижня ротора наведено на рис. 6.

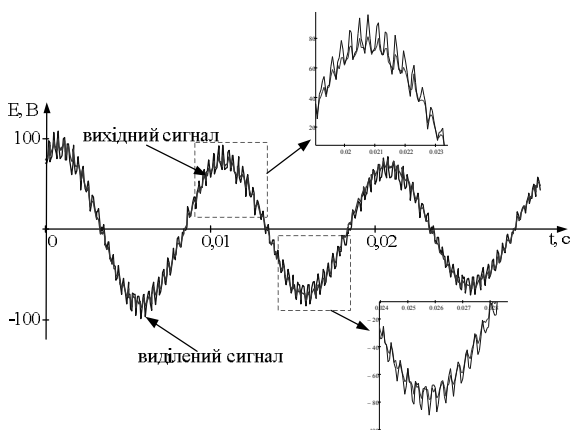


Рисунок 6 – Порівняння вихідного та виділеного сигналів ЕРС котушкової групи обмотки статора АД з пошкодженням одного стрижня ротора

Для аналізу інформаційних ознак пошкоджень виконано вейвлет-перетворення вихідного та виді-

леного сигналів ЕРС котушкової групи (рис. 7).

Результати аналізу показали, що на вейвлет-спектрі виділеного сигналу ЕРС (рис. 7,б) спостерігаються ділянки з накладенням інформаційних ознак пошкоджень, які характерні й для вихідного сигналу ЕРС (рис. 7,а).

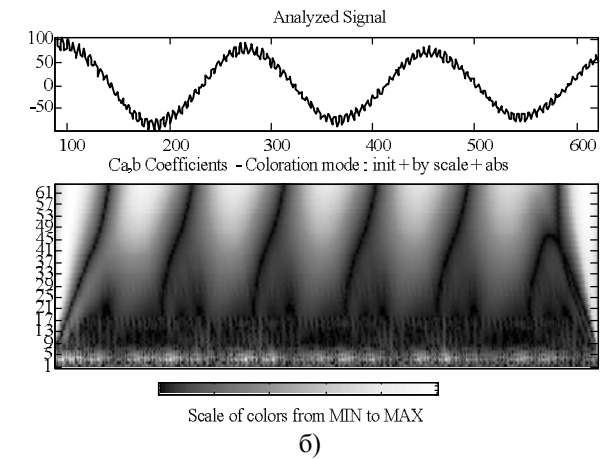
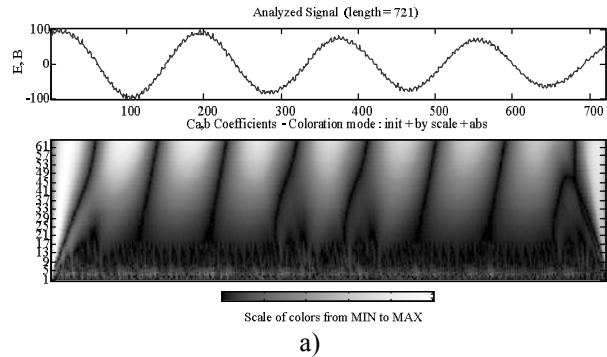


Рисунок 7 – Вихідний (а) та виділений (б) сигнали ЕРС котушкової групи та їх вейвлет-спектри

Аналогічно, знаючи кути зсуву між котушками, виконується виділення сигналу ЕРС котушки. Порівняння вихідного та виділеного сигналів ЕРС котушки обмотки статора АД з пошкодженням одного стрижня ротора показано на рис. 8.

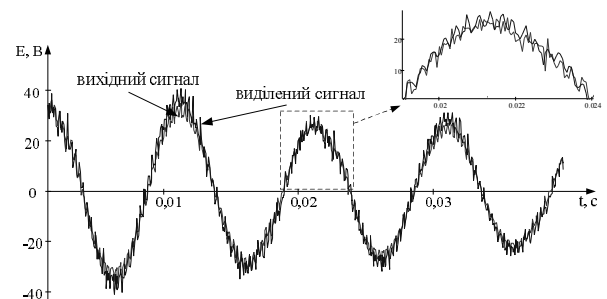


Рисунок 8 – Порівняння вихідного та виділеного сигналів ЕРС котушки обмотки статора АД з пошкодженням одного стрижня ротора

Для виявлення локальних особливостей вихідного та виділеного сигналів ЕРС котушки виконано їх НВП (рис. 9). Аналіз отриманих результатів показав, що на вейвлет-спектрі виділеного сигналу ЕРС котушки (рис. 9,б) зберігаються інформаційні ознаки пошкоджень у вигляді характерних ділянок із вейвлет-коефіцієнтами, які присутні на вейвлет-спектрі вихідного сигналу ЕРС (рис. 9,а). У той же час на вейвлет-спектрі виділеного сигналу ЕРС котушки (рис. 9,а) спостерігається «дублювання» вказаних ділянок, яке характерне й для сигналу ЕРС котушки, отриманого за результатами розрахунку ЕМП АД (рис. 2,б).

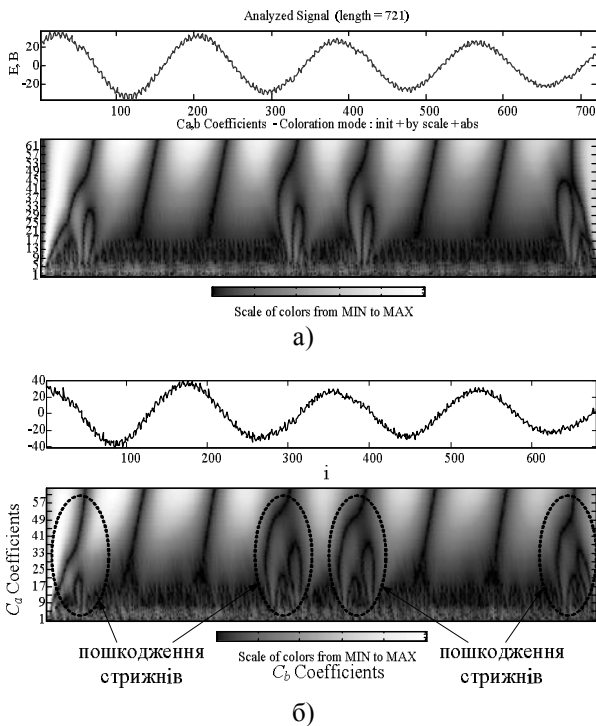


Рисунок 9 – Виділений сигнал ЕРС котушки та його вейвлет-спектр

Отже, одержані результати вейвлет-перетворення (рис. 9,б) співпадають з результатами вейвлет-розкладу для вихідного сигналу ЕРС котушки обмотки статора (рис. 9,а).

Таким чином, на етапі виділення сигналу ЕРС котушки обмотки статора можна зробити висновок, що використання методу декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки на сигнали ЕРС її елементів дозволяє виділити інформаційні ознаки пошкоджень стрижнів ротора.

Завершальним етапом декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки статора є виділення сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки із сигналу ЕРС котушки. Результати порівняння вихідного та виділеного сигналів ЕРС однієї активної сторони котушки наведено на рис. 10. Результати вейвлет-перетворення вихідного та виділеного сигналів ЕРС однієї активної сторони котушки зображено на рис. 11.

Аналіз результатів декомпозиції та вейвлет-перетворення сигналів показав, що інформаційні ознаки вихідного сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки зберігаються у виділеному сигналі ЕРС.

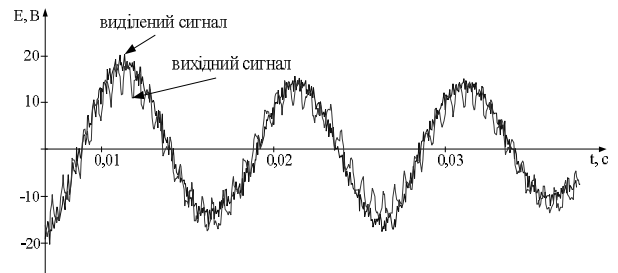


Рисунок 10 – Порівняння вихідного та виділеного сигналів ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки статора АД з пошкодженням одного стрижня ротора

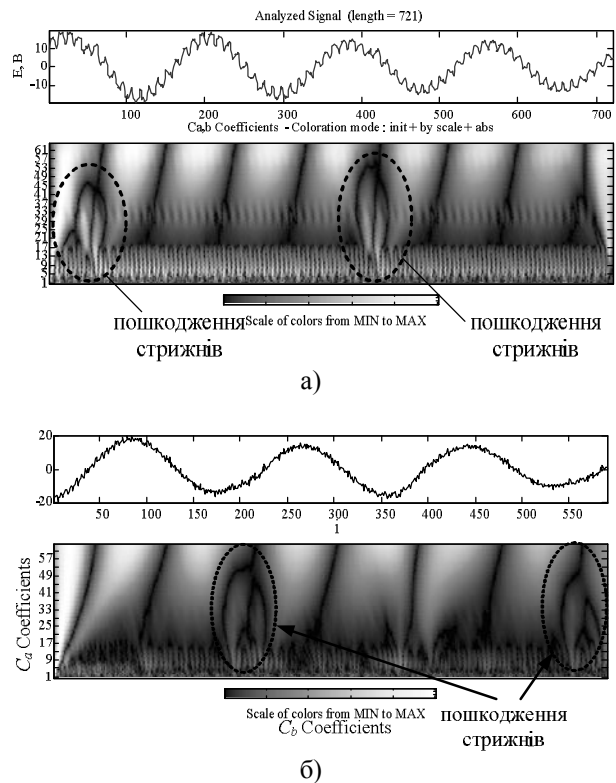


Рисунок 11 – Виділений сигнал ЕРС однієї активної сторони котушки та його вейвлет-спектр

При цьому високочастотна складова сигналу відтворюється не повністю, однак зберігаються інформаційні ознаки пошкоджень, які проявляються у спотворенні форми сигналу ЕРС. Крім того, як видно з отриманого вейвлет-спектру (рис. 11,б), спотворення сигналу ЕРС, які відповідають місцезростанню пошкодженого стрижня, відображаються на вейвлет-спектрі у вигляді характерних ділянок із 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. При цьому приймається, що пошкоджені стрижні ротора зсунуті один відносно одного. Значення кутів між двома пошкодженими стрижнями вибрано довільно ($\gamma = 31,8^\circ$, $\gamma = 84,7^\circ$, $\gamma = 169,4^\circ$) для того, щоб дослідити можливості запропонованого методу декомпозиції.

Результати виділення сигналів ЕРС активних сторін котушок та їх вейвлет-спектрів при взаємному розташуванні пошкоджених стрижнів ротора на величину зазначених кутів наведено на рис. 12.

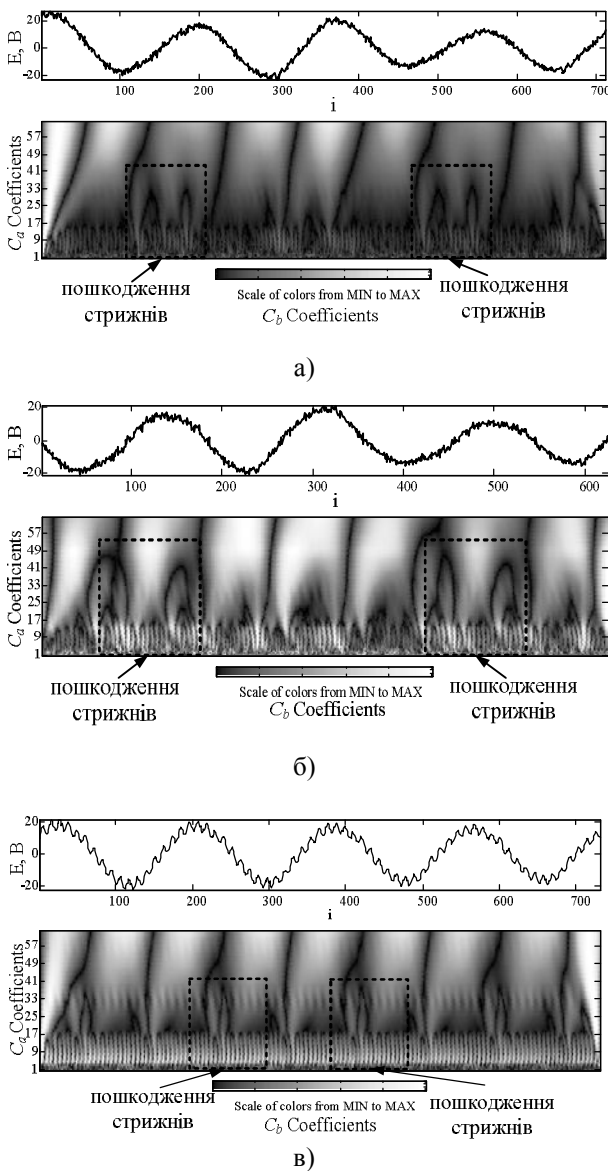


Рисунок 12 – Виділені сигнали ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки статора АД із пошкодженням двох стрижнів ротора, які зсунуті на величину кута $\gamma = 31,8^\circ$ (а), $\gamma = 84,7^\circ$ (б), $\gamma = 169,4^\circ$ (в) та їх вейвлет-спектри відповідно

Таким чином, використання методу декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки на сигнали ЕРС активних сторін котушки дозволяє виділити інформаційні ознаки пошкоджень стрижнів, які неможливо виявити в сигналі ЕРС фази.

Спростити процедуру виділення інформаційних ознак пошкоджень можна за допомогою декомпозиції діагностичного сигналу, який є сумою коефіцієнтів вейвлет-розкладу сигналів ЕРС для області середніх частот [16]:

$$\hat{\phi}_\Sigma = \sum_{\xi=a_n}^{\xi=a_v} \hat{\phi}_\xi, \quad (3)$$

де $\hat{\phi}$ – масштабуюча функція; $\xi \in a$; a_n та a_v – значення масштабів нижньої та верхньої границь області середніх частот, відповідно.

Отримані з використанням зворотного Z-перетворення значення виділеного діагностичного сигналу $\hat{\phi}'_\Sigma$ ЕРС котушки наведено на рис. 13.

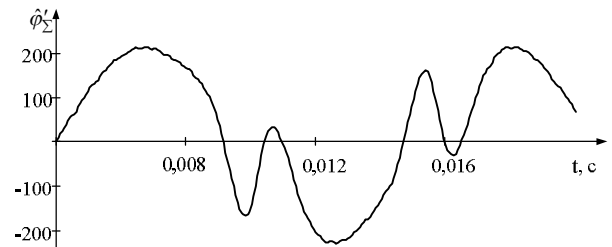


Рисунок 13 – Сума коефіцієнтів вейвлет-розкладу ЕРС котушки

Аналіз отриманих результатів показав, що діагностичний сигнал $\hat{\phi}'_\Sigma$ (рис. 13) містить інформаційні ознаки пошкоджень, а саме сплески сигналу, які «дублюються» через додавання сигналів активних сторін котушки. Розкладання отриманого сигналу $\hat{\phi}'_\Sigma$ котушки на сигнали активних сторін котушки дозволяє розділити інформаційні ознаки пошкоджень. Порівняння вихідного та виділеного діагностичних сигналів $\hat{\phi}'_\Sigma$ ЕРС активної сторони котушки наведено на рис. 14.

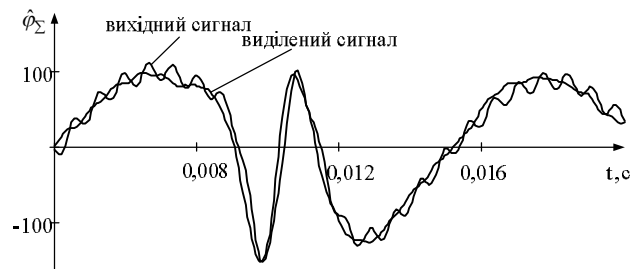


Рисунок 14 – Порівняння вихідного $\hat{\phi}'_\Sigma$ та виділеного $\hat{\phi}'_\Sigma$ діагностичних сигналів ЕРС активної сторони котушки

Для виділення збурення, яке відповідає пошкодженню стрижнів, із виділеного діагностичного сигналу $\hat{\phi}'_{\Sigma}$ (рис. 14) було видалено складову, яка характеризується загасаючою синусоїдою (рис. 15). Проведені дослідження для різної кількості пошкоджених стрижнів показали, що величина амплітуди сплеску отриманого сигналу відображає ступінь пошкодження ротора.

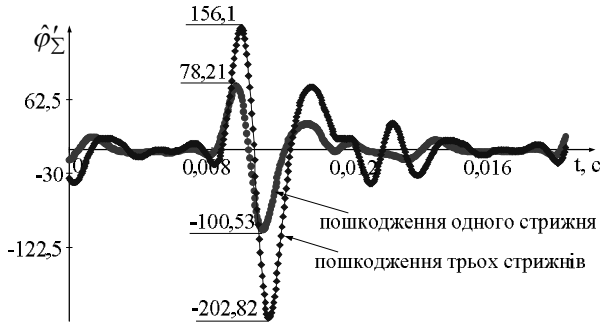


Рисунок 15 – Діагностичні сигнали $\hat{\phi}'_{\Sigma}$ активної сторони котушки для різної кількості пошкоджених стрижнів ротора

Таким чином, використання декомпозиції сигналу, який визначається як сума коефіцієнтів вейвлет-розкладу для області середніх частот, дозволяє розділити інформаційні ознаки пошкоджень та підвищити достовірність діагностики пошкоджень стрижнів ротора.

Для експериментальної перевірки розробленого методу декомпозиції були проведені експериментальні дослідження з використанням комп'ютеризованого вимірювального комплексу [12]. З використанням блоку датчиків напруги проводилися вимірювання миттєвих значень ЕРС у фазах статора. Експериментальний сигнал ЕРС фази обмотки статора АД із пошкодженням стрижнів ротора та його вейвлет-спектр наведено на рис. 16.

Візуальний аналіз експериментального сигналу ЕРС фази обмотки статора АД (рис. 16,а) показав, що в сигналі відсутні інформаційні ознаки пошкоджень стрижнів. Вейвлет-аналіз експериментального сигналу ЕРС фази обмотки статора (рис. 16,б) показав, що на вейвлет-спектрі відсутні характерні ділянки, які відповідають місцезоташуванню пошкоджених стрижнів ротора. Цим підтверджується правильність висновків щодо взаємного накладення інформаційних ознак пошкоджень стрижнів у сигналі ЕРС.

Тому, відповідно до запропонованого методу декомпозиції сигналу ЕРС фази обмотки статора на сигнали ЕРС активних сторін котушок (рис. 4), з експериментального сигналу ЕРС фази обмотки був виділений сигнал ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки статора.

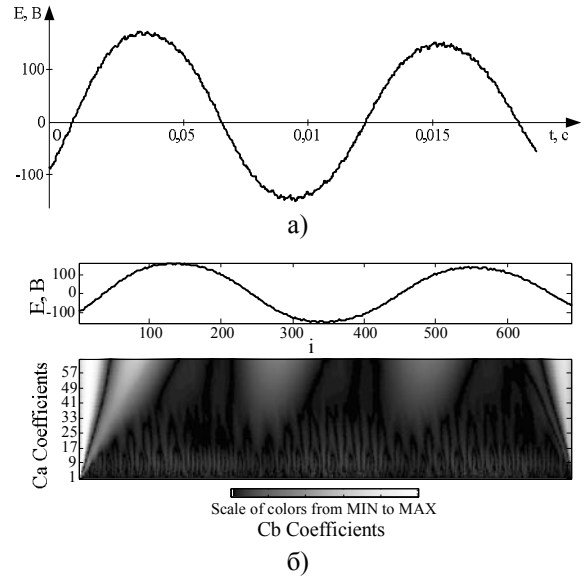


Рисунок 16 – Експериментальний сигнал ЕРС фази обмотки статора АД з пошкодженням стрижнів ротора (а) та його вейвлет-спектр (б)

Виділений сигнал ЕРС однієї активної сторони котушки обмотки статора та його вейвлет-спектр зображено на рис. 17.

Отримані результати показали, що за аналізом сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки, виділеного із сигналу ЕРС фази обмотки статора, визначається місцезоташування пошкоджених стрижнів ротора (рис. 17,б).

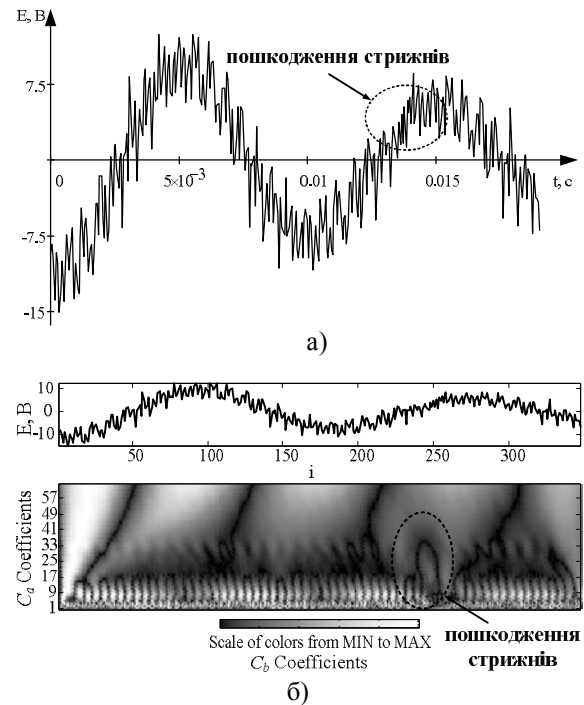


Рисунок 17 – Виділений з експериментального сигналу ЕРС фази обмотки статора сигнал ЕРС однієї активної сторони котушки (а) та його вейвлет-спектр (б)

Таким чином, результати експериментальних досліджень співпадають з результатами, отриманими в результаті моделювання. Деякі відмінності виділеного сигналу ЕРС однієї активної сторони котушки, отриманого на основі експериментальних досліджень, від результатів моделювання пояснюються багаторазовими перетвореннями дискретних сигналів.

ВИСНОВКИ. 1. Аналіз вейвлет-спектрів сигналів ЕРС в обмотках статора, отриманих у результаті розрахунку електромагнітного поля з різним числом пошкоджених стрижнів ротора, показав, що характерні ділянки на вейвлет-спектрах відповідають місцезнаходженню пошкоджених стрижнів.

2. Аналіз конструктивних особливостей АД та результатів моделювання показав, що на формування сигналу ЕРС в обмотках статора можуть впливати такі конструктивні фактори, 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 в сигналі ЕРС.

3. 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.

4. Використання декомпозиції діагностичного сигналу, який є сумою коефіцієнтів вейвлет-розкладу сигналу ЕРС фази обмотки статора, дозволяє спростити процедуру виділення інформаційних ознак пошкоджень стрижнів ротора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
2. Cleber Gustavo Dias, Ivan Eduardo Chabu. Analysis of Broken Rotor Bars in Large Induction Motors // Exacta, Sgo Paulo. – 2006. – Iss. 4. – № 2. – PP. 407–415.
3. Ширнин И.Г., Ткачук А.Н. Короткозамкнутые обмотки роторов двигателей подземных машин // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації: науковий журнал. – Луганськ, 2000. – Вип. 2/2000 (9). – С. 97–104.
4. Гашимов М.А., Гаджиев Г.А. Диагностирование эксцентриситета и обрыва стержней ротора в асинхронных электродвигателях без их отключения // Электротехника. – 1998. – № 10. – С. 46–51.
5. Мамчур Д.Г. Диагностика асинхронных двигателей на основе показателей качества перетворения энергии:

гії: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.01 / Мамчур Д.Г. – Кременчук, 2010. – 20 с.

6. Полковниченко Д.В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С. 59–62.

7. А.с. СССР № 800906. Брюханов Г.А., Князев С.А. Способ определения поврежденного стержней беличьей клетки роторов асинхронных электродвигателей; опубл. в Бюл. – № 4. – 1981.

8. Arezki Menacer, Mohamed-Saïd Naït-Saïd, A. Hamid Benakcha, Saïd Drid. Stator Current Analysis Of Incipient Fault Into Asynchronous Motor Rotor Bars Using Fourier Fast Transform // Journal of Electrical Engineering. – 2004. – Iss. 55. – № 5–6. – PP. 122–130.

9. Benbouzid M.E.H., Vieira M., Theys C. Induction motor's faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques // IEEE Transactions on power electronics. – 1999. – № 1. – PP. 14–22.

10. Mehala Neelam, Dahiya Ratna. Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis // International journal of systems applications, engineering & development. – 2007. – № 1. – PP. 29–35.

11. Pereira Luís Alberto, Gazzana Daniel da Silva. Rotor Broken Bar Detection and Diagnosis in Induction Motors Using Stator Current Signature Analysis and Fuzzy Logic // The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea, 2004. – PP. 3019–3024.

12. 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. – Iss. 6. – № 1. – PP. 115–125.

13. Finite Element Method Magnetics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.femm.info/wiki/HomePage.

14. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

15. Ch. L. Phillips, J. M. Parr, E. Ann Riskin. Signals, Systems, and Transforms // Prentice Hall. – 2008. – 774 p.

16. Загирняк М.В., Ромашихина Ж.И., Калинов А.П. Диагностика поврежденной стержней ротора в асинхронном двигателе на основании анализа его магнитного поля // Вісник Національного технічного університету "ХПІ": збір. наук. праць. Серія Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 38–48.

THE DECOMPOSITION OF SIGNAL OF ELECTROMOTIVE FORCE OF THE STATOR WINDINGS FOR DIAGNOSTICS OF BROKEN ROTOR BARS OF INDUCTION MOTORS

Zh. Romashykhina, A. Kalinov, I. Lutsenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: scenter@kdu.edu.ua

Development of induction motor broken rotor bars diagnostics method basing on the analysis of the electromotive force induced in stator windings after disconnecting the motor from the network is presented. Basing on the calculation of the magnetic field in an induction motor air gap, it is shown that informational features corresponding to magnetic

field distortions caused by broken rotor bars are lost in the signal of the stator phase electromotive force. It was proposed to use a decomposition of electromotive force of the stator winding phase by electromotive force signals of coil active sides using z-transform theory, which allows extracting features of rotor bars damages, which is impossible to detect analyzing phase electromotive signal. Wavelet analysis of the extracted electromotive force of one active coil side allows increasing the reliability of induction motor rotor bars fault detection. Using decomposition of the diagnostic signal, which is the sum of wavelet expansion of the stator phase electromotive force, makes it possible to simplify extraction of the rotor bars faults features. The effectiveness of the proposed diagnostic method is confirmed by experiments.

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

REFERENCES

- Gemke, R.G. (1989), *Neispravnosti elektricheskikh mashin* [Faults of electrical machines], Energoatomizdat, Leningrad, Russia. (in Russian)
- Dias, Cleber Gustavo and Chabu, Ivan Eduardo (2006), "Analysis of Broken Rotor Bars in Large Induction Motors", *Exacta, Sao Paulo*, Vol. 4, no. 2, pp. 407–415.
- Shirmin, I.G. and Tkachuk, A.N. (2000), "Squirrel windings engine rotors of underground machines", *Pratsi Luganskogo viddilennya Mizhnarodnoi Akademii informatizatsii: Naukoviy zhurnal*, Vol. 2, no. 9, pp. 97–104. (in Russian)
- Gashimov, M.A. and Gadzhiev, G.A. (1998), "Diagnosis eccentricity and breakage of rotor bars in induction motors without disabling", *Elektrotehnika*, Vol. 10, pp. 46–51. (in Russian)
- Mamchur, D.G. (2010), "Diagnosis of induction motors on the basis parameters of quality power conversion", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.09.01, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk, Ukraine. (in Ukrainian)
- Polkovnichenko, D.V. (2006), "Post repair assessment of technical state a cage motors", *Elektrotehnika i elektromehaniika*, Vol. 1, pp. 59–62. (in Russian)
- Brjuhanov, G.A. and Knjazev, S.A. (1981), "A method of determining of broken rotor bars of squirrel cage of induction motor", *C.A. № 800906 (USSR)*, Vol. 4. (in Russian)
- Arezki Menacer, Mohamed-Saïd Naït-Saïd, A Hamid Benakcha and Saïd Drid, (2004), "Stator Current Analysis Of Incipient Fault Into Asynchronous Motor Rotor Bars Using Fourier Fast Transform", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 55, no. 5–6, pp. 122–130.
- Benbouzid, M.E.H., Vieira, M. and Theys, C. (1999), Induction motor's faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques, *IEEE Transactions on power electronics*, no. 1, pp. 14–22.
- Mehala, Neelam and Ratna, Dahiya, (2007), "Motor current signature analysis and its applications in induction motor fault diagnosis", *International journal of systems applications, engineering & development*, Vol. 1, pp. 29–35.
- Pereira, Luís Alberto and Gazzana, Daniel da Silva, (2004), "Rotor Broken Bar Detection and Diagnosis in Induction Motors Using Stator Current Signature Analysis and Fuzzy Logic", *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea, November 2–6, 2004, pp. 3019–3024.
- Zagirnyak, M., Romashihina, Zh. and Kalinov, A., (2013), "Diagnostic of broken rotor bars in induction motor on the basis of its magnetic field analysis", *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 6, no. 1, pp. 115–125.
- Finite Element Method Magnetics, Available at: [//www.femm.info/wiki/HomePage](http://www.femm.info/wiki/HomePage).
- Ivanov-Smolenskiy, A.V. (1980), *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines], Uchebnik dlya vuzov, Energiya, Moscow, Russia. (in Russian)
- Phillips, Ch.L., Parr, J.M. and Riskin, Ann, (2008), "Signals, Systems, and Transforms, Prentice Hall", 774 p.
- Zagirnyak, M., Romashihina, Zh. and Kalinov, A. (2012), "Diagnostic of damage rotor bars in induction motor based on an analysis of its magnetic field", *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu "HPI". Zbirnik naukovih prats. Serija «Problemy udoskonalennja elektrichnih mashin i apparativ. Teorija i praktika*, Vol. 49, no. 955, pp. 38–48. (in Russian)

Стаття надійшла 13.11.2013.