



СПЕКТРАЛЬНО-СТРУМОВИЙ МЕТОД ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ПОДВІЙНОЮ БІЛЯЧОЮ КЛІТКОЮ НА ПРЕДМЕТ УШКОДЖЕНЬ ОБМОТКИ РОТОРА

Розроблено новий спектрально-струмовий метод виявлення деяких видів ушкоджень обмотки ротора асинхронного електродвигуна з подвійною білячою кліткою. Перевагою методу є простота та можливість його використання безпосередньо під час роботи двигуна, а також можливість проводити моніторинг стану двигуна.

Ключові слова: асинхронний двигун з подвійною білячою кліткою, діагностування обмотки ротора, спектрально-струмовий метод, ушкодження обмотки ротора асинхронного двигуна, коло-польова математична модель асинхронного двигуна.

Вступ. В даний час асинхронні електродвигуни є споживачами понад 70% всієї електроенергії в країні. Досвід експлуатації електродвигунів свідчить про велику кількість відмов, що трапляються у зв'язку з аварійними ситуаціями. Аварійність щорічно складає 25% і більше. Вихід з ладу електродвигуна завдає великої шкоди. В основному ці збитки пов'язані з простим технологічного обладнання або псування продукції внаслідок аварії двигунів. Додатково до збитків додається зниження електро- і пожежобезпеки, пов'язане з можливими короткими замиканнями які можуть бути присутніми в обмотці статора або ротора пошкодженого електродвигуна [1].

Актуальність проблеми. Сучасні системи і методи діагностики електродвигунів можна розділити на дві групи: 1) методи, що дозволяють виявити несправність електродвигуна в цілому; 2) методи, що виявляють і локалізують конкретну несправність або дефект в електродвигуні. Найпоширенішими методами діагностування є:

- вібраційний, за яким реєструють та аналізують сигнал, який створює вібрація двигуна;
- температурний, реєструє швидкість наростання значення температури, у критичних ситуаціях вимикає з роботи двигун, що дозволяє зберегти його від подальшого руйнування;
- електромагнітний, включає в себе етап розробки еталонної (можливо комп'ютерної) моделі двигуна, з'єднання з устаткуванням за допомогою великої кількості датчиків (струмів, напруг, датчик-Холла тощо). Отримані дані порівнюються з еталонними і визначається наявність несправності;
- спектрально-струмовий, протягом заданого інтервалу часу відбувається запис значень струмів, які споживає двигун. Отримані значення проходять обробку і аналіз, виокремлюються характерні частоти для даного електродвигуна та

здійснюється спектральний аналіз.

Згадані методи є універсальними і можуть використовуватись практично для всіх видів і типів електричних машин. Але з точки зору доцільності слід використовувати індивідуальний підхід. Так, практика експлуатації малопотужних двигунів показує, що у разі їх несправності швидше і дешевше замінити їх на нові і не проводити заходи з ремонту або моніторингу їх стану. Проте, до деяких типів машин, наприклад, асинхронних двигунів (АД) власних потреб електростанцій, варто застосувати заходи щодо своєчасного виявлення пошкоджень, бажано на стадії їх зародження, адже раптовий вихід з ладу таких двигунів може призвести до великих економічних втрат. Крім того, навіть в середині одного класу двигунів, наприклад, АД з короткозамкненою (КЗ) обмоткою ротора, статистика пошкоджень різна для АД зі звичайною КЗ обмоткою ротора і АД з подвійною білячою кліткою (ПБК) ротора. На цю різницю впливають як конструктивні відмінності, так і специфіка і умови роботи двигунів. Так, АД з ПБК ротора, як правило, експлуатуються в умовах частих пусків з великими значеннями пускових моментів і струмів в обмотках статора і ротора. Тому вибір методології діагностики АД зі звичайною КЗ обмоткою ротора і АД з подвійною білячою кліткою відрізняються.

Важливим аспектом вибору методу діагностування ушкоджень в АД є ступінь складності його технічної реалізації та питання про необхідність залучення висококваліфікованого персоналу та/або спеціалістів з ремонту і діагностики.

Більшість з вище перелічених методів для здійснення заходів щодо діагностування ушкоджень вимагають встановлення додаткового обладнання в активній зоні двигуна, що можливе тільки при його знятті з експлуатації і подальшому розборі. Такі незручності та вірогідні похибки

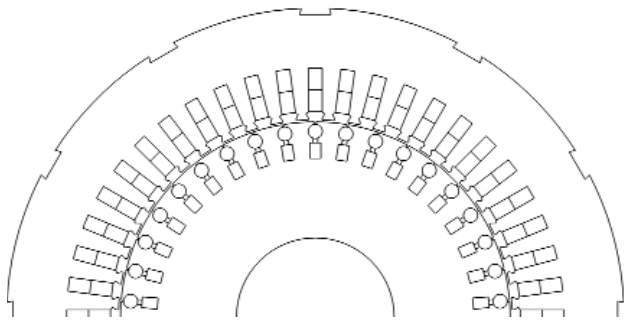


Рис. 1. Активна зона АД з ПБК потужністю 55 кВт (поперечний переріз)

у виявленні пошкоджень, не кажучи про необхідність залучення спеціально підготовленого персоналу, значно ускладнюють використання зазначених методів на практиці.

Отже, розробка простого та надійного методу діагностичного контролю, моніторингу й попередження аварій для таких двигунів як АД з ПБК є актуальним питанням.

В цьому сенсі звертає на себе увагу досить перспективний спектрально-струмовий метод діагностування та моніторингу поточного стану електродвигунів. Він дозволяє використовувати досить поширені на даний час цифрові технології, не потребує встановлення додаткових датчиків в робочій зоні машини, та легко може бути адаптований до середньо кваліфікованого працівника.

Мета роботи. Розробка надійного та точного спектрально-струмового методу діагностики АД з ПБК ротора, який можливо застосовувати без зняття обладнання з експлуатації та під час безпосередньої роботи (моніторингу).

Матеріали і методи. Досліджувався трифазний АД з ПБК ротора з наступними даними: потужність на валу 55 кВт, фазна напруга 220 В, кількість полюсів 4, кількість пазів на статорі 48, кількість пазів на роторі 38. Фрагмент поперечного перерізу об'єкту дослідження представлений

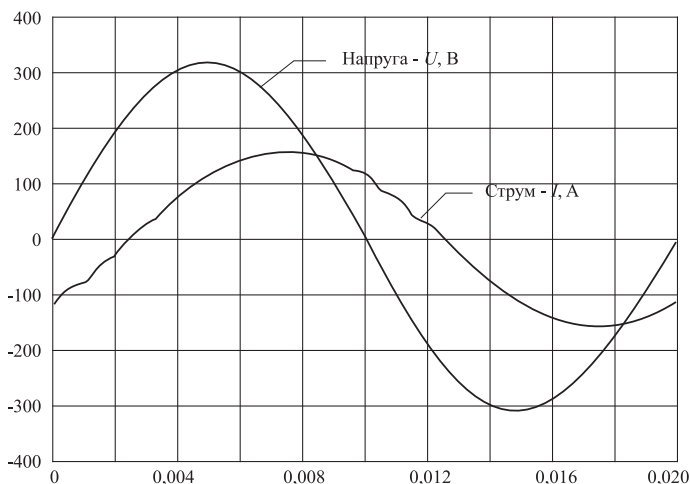


Рис. 2. Часові залежності напруги та струму фази обмотки статора при обриві 3 стержнів робочої обмотки ротора

на рис.1. На роторі розміщено дві електрично не пов'язані між собою обмотки: пускова (з круглим поперечним перерізом стержнів) виготовлена з латуні, та робоча (з прямокутним поперечним перерізом стержнів) виготовлена з міді.

Для досягнення поставленої мети була розроблена коло-польова математична модель в програмному комплексі COMSOL Multiphysics. Модель враховує реальні фізичні властивості матеріалів, фізичне обертання ротора, містить рівняння електромагнітного поля та рівняння трьох окремих електричних кіл: 1) кола обмотки статора; 2) кола робочої обмотки ротора; 3) кола пускової обмотки ротора.

При моделюванні були застосовані такі методи як: метод скінченних елементів, методи чисельного розв'язання диференціальних рівнянь, спектральний аналіз.

Дослідження проводилось для наступних видів ушкоджень обмотки ротора:

- 1) без ушкоджень (базовий варіант);
- 2) обрив 1 стержня робочої обмотки ротора;
- 3) обрив 2 стержнів (розташованих поруч) робочої обмотки ротора;
- 4) обрив 3 стержнів (розташованих поруч) робочої обмотки ротора;
- 5) обрив 2 стержнів (розташованих під кутом 90° один до одного) робочої обмотки ротора;
- 6) обрив 2 стержнів (розташованих під кутом 180° один до одного) робочої обмотки ротора;
- 7) розрив короткозамкненого кільця робочої обмотки ротора;
- 8) пункти 2–7 аналогічно тільки для пускової обмотки ротора.

В ході моделювання визначалась часова залежність струму обмотки статора, яка потім підлягала спектральному аналізу для виявлення діагностичних ознак.

Отже, задача полягала не тільки у виявленні діагностичних ознак, які давали б відповідь на питання: "чи є ушкодження в обмотці ротора?", а у виявленні таких діагностичних ознак, які одразу давали б відповідь на декілька питань: а) "чи є ушкодження в обмотці ротора?"; б) "ушкодження якої саме обмотки ротора: робочої чи пускової?"; в) "де саме є ушкодження в стержнях або в КЗ кільці?"; г) "наскільки розвинене наявне ушкодження (скільки стержнів ушкоджено і де вони розташовані)?".

Результати досліджень та обговорення. На основі розробленої моделі проводились чисельні експерименти в різних режимах роботи АД з ПБК ротора. В ході моделювання обмотка стато-



ра "живилась" від джерела з трифазною, симетричною та синусоїдальною напругою. Струми в кожній фазі обмотки статора, а також в стержнях і КЗ кільцях обмоток ротора розраховувались автоматично в кожний момент часу. Режим роботи задавався шляхом зміни величини ковзання ротора. Для прикладу, на Рис. 2 представлена часова залежність напруги і струму фази обмотки статора двигуна, який працює в номінальному режимі (номінальне значення моменту на валу) при обриві трьох стержнів робочої обмотки ротора.

За взаємним розташуванням залежностей напруги та струму можна визначити кут зсуву φ і, відповідно, коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. В Табл. 1 представлені значення $\cos \varphi$ визначені в результаті моделювання об'єкта дослідження, який працює в номінальному режимі та має вищезгадані ушкодження обмотки ротора.

Як видно з наведених даних $\cos \varphi$ очікувано знижується при появі різного роду ушкоджень. Також зрозумілим є те, що зниження цього параметра є більш суттєвим при обривах стержнів робочої обмотки ротора, адже в номінальному режимі роботи пускова обмотка практично не задіяна.

Для визначення діагностичних ознак ушкоджень обмоток ротора, був проведений спектральний аналіз часових залежностей струму для неушкодженого двигуна та для всіх вищезгаданих типів ушкоджень. На Рис. 3 представлені спектри вищих гармонік (починаючи з третьої) фазного струму обмотки статора для різних ушкоджень робочої обмотки ротора.

Аналогічні спектри були отримані і для ушкоджень пускової обмотки ротора об'єкту дослідження (Рис. 4).

Провівши детальний аналіз одержаних спектрів було визначено, що найбільш чутливими до ушкоджень, які розглядаються є лише три гармоніки з номерами 15, 17 і 21. До того ж, амплітуда цих гармонік є достатньо великою для надійної фіксації відповідними вимірювальними приладами.

Порівнюючи покази амплітуд гармонік з номерами 15, 17, 21 електродвигуна з наявністю ушкоджень зі значеннями двигуна без ушкоджень ("Норма"), можна спостерігати певну залежність. Для зручності введемо величину відносного відхилення Δ , яка вимірюється у відсотках

$$\Delta = (X_{\text{гармоніки}} - X_{\text{норма}}) / X_{\text{норма}} \cdot 100 (\%),$$

Таблиця 1. Значення $\cos \varphi$ АД з ПБК, який працює в номінальному режимі при різних ушкодженнях обмотки ротора

Тип ушкодження обмотки ротора	$\cos \varphi$	
	Місце ушкодження	
	Пускова обмотка ротора	Робоча обмотка ротора
Немає ушкодження (Норма)	0,742	
Обрив 1 стержня	0,741	0,736
Обрив 2 стержнів (розташованих поруч)	0,741	0,734
Обрив 3 стержнів (розташованих поруч)	0,736	0,715
Обрив 2 стержнів (розташованих під 90° один до одного)	0,739	0,730
Обрив 2 стержнів (розташованих під 180° один до одного)	0,740	0,731
Обрив КЗ кільця	0,735	0,758

де $X_{\text{гармоніки}}$ – значення амплітуди досліджуваної гармоніки двигуна з наявністю ушкодження; $X_{\text{норма}}$ – значення амплітуди тієї ж гармоніки двигуна без ушкоджень.

На Рис. 5 представлена залежність комбінації відносного відхилення Δ для трьох гармонік (№15, 17, 21) і для різних ушкоджень обмоток ротора.

Як бачимо з діаграми, комбінація значень Δ для кожного з видів ушкоджень є унікальною. Тобто, розрахувавши параметр Δ для 15, 17 і 21 гармоніки, можна визначити, яке саме пошкод-

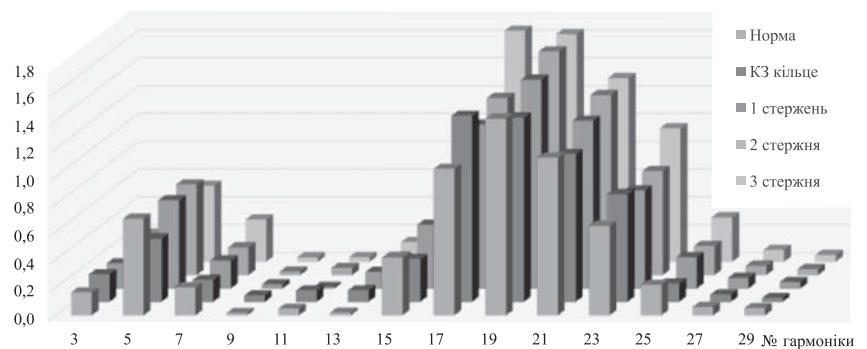


Рис. 3. Спектр вищих гармонік струму обмотки статора для різних ушкоджень робочої обмотки ротора

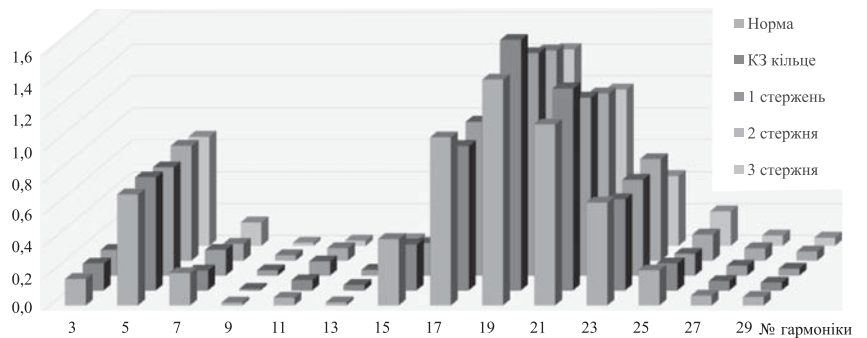


Рис. 4. Спектр вищих гармонік струму обмотки статора для різних ушкоджень пускової обмотки ротора

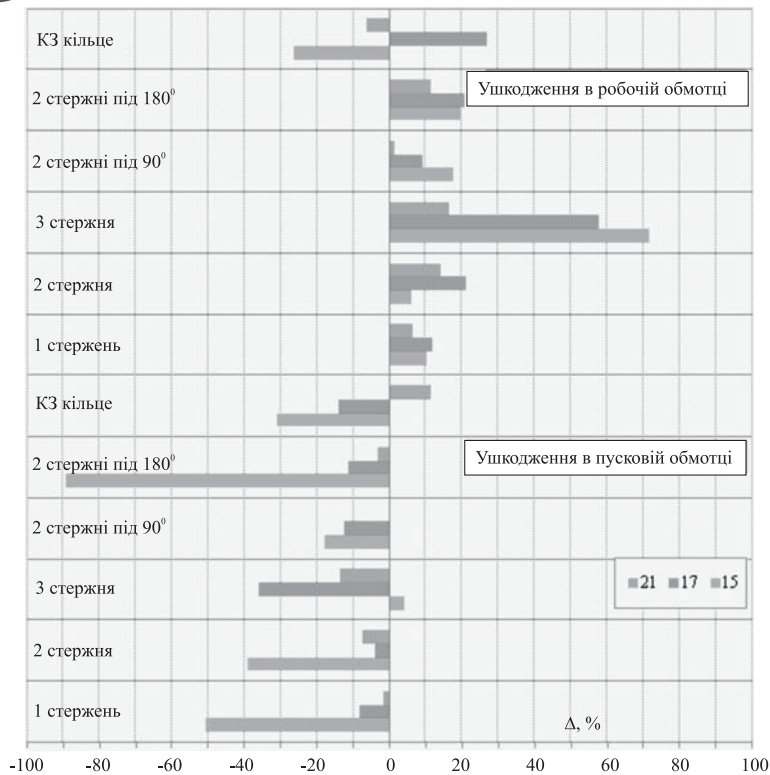


Рис. 5. Комбінації значень відносного відхилення Δ 15, 17 і 21 гармоніки для різних видів ушкоджень обмоток ротора АД з ПБК

ження має АД. Крім того, можна чітко побачити відмінність ушкоджень робочої і пускової обмоток ротора. Так, при ушкодженнях робочої обмотки значення амплітуд зазначених гармонік збільшуються (Δ додатне), а при ушкодженнях в пусковій обмотці — зменшуються (Δ від'ємне).

Таким чином, при практичній реалізації даного методу достатньо за допомогою, наприклад, цифрового осцилографа з функцією спектрального аналізу, визначити амплітуди всього трьох гармонік (№ 15, 17 і 21) і порівняти ці значення з аналогічними величинами для неушкодженого двигуна (можуть бути зазначені в паспорті або розраховані заздалегідь). З даною операцією цілком може впоратись навіть не дуже кваліфікований персонал.

Звичайно, вищенаведені дослідження справедливі для конкретного АД, який був об'єктом дослідження в даній роботі. Проте аналогічний підхід можна застосувати і для всіх інших АД як зі звичайною КЗ обмоткою ротора та і з подвійною білячою кліткою.

Висновки. Не зважаючи на різноманіття методів діагностики стану електродвигунів, розробка нових більш досконалих методів залишається актуальною задачею, особливо для такого класу електродвигунів як АД з ПБК.

Існуючі методи діагностування ушкоджень обмоток роторів АД в основному розроблялися і добре себе зарекомендували для АД зі звичайною конструкцією КЗ обмотки ротора, а при діагностуванні АД з ПБК вони можуть давати суттєві похибки, або взагалі бути непридатними.

Запропонований спектрально-струмовий метод діагностування ушкоджень обмоток ротора АД з ПБК є досить простим з точки зору практичної реалізації, надійним та здатен визначати як тип пошкодження так і ступінь його розвитку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Копылов И.П., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов. / Под ред. И.П. Копылова. 3-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. шк., 2002. — 767 с.
2. Гуторова М.С. Діагностування асинхронних двигунів на основі аналізу електромагнітних характеристик. — К.: Дипсервіс. 2015. — 156 с.
3. Петухов В.С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения / В. С. Петухов // Новости электротехники. — 2008. — № 1(31). — С. 62—65.
4. Васьковский Ю.Н. Диагностика комбинированных дефектов ротора асинхронного двигателя индукционным методом / Ю.Н. Васьковский, М.А. Коваленко // Электротехника і електромеханіка. — 2013. — № 3. — С. 21 — 24.
5. Васьковский Ю.М. Дослідження методами теорії поля характеристик асинхронних двигунів при несиметрії параметрів ротора / Ю.М.Васьковський, Ю.А.Гайденко // Електротехніка і електромеханіка. — 2007. — № 3. — С.19 — 22.
6. Титко О.І. Моделювання та ідентифікація дефектів короткозамкнутої обмотки ротора асинхронних електродвигунів / Титко О.І., Гуторова М.С. // Гідроенергетика України. — 2014. — № 4. — С. 8—12.

