

УДК 621.313.333

Ю. М. ВАСЬКОВСЬКИЙ, О. А. ГЕРАСКІН, Н. В. БЕЛЕНОК**ДІАГНОСТИКА КУТОВОГО ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ РОТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ СИЛ**

Методами математичного моделювання досліджено зміни величин і характеру електромагнітних віброзбуджуючих сил, які виникають при появі кутового ексцентриситету ротора асинхронного двигуна. Досліджено допустимі діапазони величин кутового ексцентриситету, при яких можлива подальша експлуатація машин без обмежень. Показано, що для забезпечення процесу вібраційної діагностики кутового ексцентриситету потрібно використання двох датчиків, які розташовані на протилежних торцях осердя статора двигуна в одній площині.

Ключові слова: асинхронний двигун, діагностика, ексцентриситет, спектр, вібрація, електростанція.

Методами математического моделирования исследованы изменения величин и характера электромагнитных вибровозбуждающих сил, возникающих при появлении углового эксцентриситета ротора асинхронного двигателя. Исследованы допустимые диапазоны величин углового эксцентриситета, при которых возможна дальнейшая эксплуатация машин без ограничений. Показано, что для обеспечения процесса вибрационной диагностики углового эксцентриситета требуется использование двух датчиков, расположенных на противоположных торцах сердечника статора двигателя в одной плоскости.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, диагностика, эксцентриситет, спектр, вибрация, электростанция.

Rotor angular eccentricity of induction motor is damage, which should be investigated in a three-dimensional setting, because the value of air gap varies along the length of induction motor, which requires significant computational power of computers. However, in order to simplify the analysis of vibroperturbing forces, it can be analyzed in two-dimensional planes staged as a set in which the rotor is shifted relative to the stator in the radial direction. Vibration sensors located on the surface of the stator, take off diagnostic information in only one of these planes. Sensor signals are located in one plane at different ends of the stator core. So enough to explore displacement of the rotor relative to the stator in a two-dimensional formulation of these two planes. Diagnostic signs of angular eccentricity appearance, which can be used in systems of vibrodiagnosis, were determined: a significant increase in noise and rotary teeth harmonics spectrum of vibroperturbing forces in one of the sensors, which is located in the zone of minimum air gap of induction motor; the absence rotational harmonics in vibroperturbing forces spectrum. Permissible range of angular eccentricity values at which there is possible further using of machines without restrictions were investigated. It is proved that the rotor angular eccentricity is dangerous kind of damage due to the appearance of longitudinal torque of force, which leads to accelerated wearing of motor bearings.

Keywords: induction motor, diagnostics, eccentricity, spectrum, vibration, power station.

Вступ. На теплових і атомних електростанціях у переважній більшості використовуються електроприводи на базі потужних асинхронних двигунів (АД) з короткозамкненим ротором для виконання відповідальних технологічних функцій. Одним з характерних ушкоджень потужних АД є кутовий ексцентриситет ротора (КуЕР). Кутовим ексцентриситетом називається нахил повздовжньої вісі ротора відносно повздовжньої вісі статора під певним кутom. Як відомо, величина повітряного проміжку АД у порівнянні з радіусом ротора є дуже малою, тому найменше порушення положення ротора відносно геометричного центра статора створює появу ексцентриситету. КуЕР є більш небезпечним для нормальної роботи АД видом ексцентриситету, ніж радіальний ексцентриситет і може виникнути в наступних випадках: АД є приводом механізму зі значною незрівноваженістю обертових мас (наприклад, кульових млинів на теплових електростанціях для подрібнення вугілля), неспіввісне встановлення підшипникових щитів в процесі ремонту АД, неоднакове зношування підшипників. Відомі порівняно прості методи виявлення КуЕР, наприклад, метод контролю зміни параметрів споживаного струму, акустичний метод, використання якого в машинному залі зі значним шумом є малоефективним, не забезпечують необхідну достовірність. Ці методи можуть дати достовірні результати тільки при значних ушкодженнях ротора АД, коли режим роботи АД наближається до аварійного і його потрібно терміново виводити в ремонт. Наявність навіть невеликого

значення кута нахилу вісі ротора відносно вісі статора АД може суттєво впливати на роботу АД і призводити до ряду негативних явищ: розподіл магнітного поля в повітряному проміжку АД стає несиметричним як в радіальному, так і в осьовому напрямках, виникає сила одностороннього магнітного тяжіння, яка збільшує перекіс ротора і спричиняє прискорене руйнування двигуна; збільшуються електричні втрати і зменшується ККД. Для запобігання цим негативним процесам актуальним є розробка та застосування більш чутливих методів діагностування КуЕР.

Аналіз основних досягнень. Діагностичні ознаки, які засвідчують наявність КуЕР, визначалися і досліджувалися різними методами. В порівнянні з відомим методом діагностики на основі аналізу спектрального складу споживаного струму [9, 10], методом діагностики на основі аналізу зміни миттєвої потужності [5], метод вібраційної діагностики [1–4] має перевагу, оскільки має більшу чутливість тому, що при прояві ушкодження АД виникаючі додаткові віброзбуджуючі сили пропорційні квадрату збурення магнітної індукції в повітряному проміжку машини. Метод вібраційної діагностики належить до методів неруйнівного контролю, що є його перевагою.

Ефективними методами досліджень діагностичних ознак при появі ушкоджень АД є методи математичного моделювання. Оскільки аналітичні методи потребують прийняття суттєвих спрощень в моделі АД і відрізняються значною складністю, то на даний час широкого розповсюдження набули польові методи аналізу, в

© Ю.М. Васьковский, О.А. Гераскин, Н.В. Беленок, 2016

основу яких покладено чисельне розв'язання рівнянь електромагнітного поля за допомогою методу скінченних елементів. Такий підхід використовується і в даній роботі.

В статті [3] авторами проводилися дослідження електромагнітних вібробуджуючих сил в АД при наявності радіального (статичного і динамічного) ексцентриситетів ротора з метою створення основ науково-методичного забезпечення для вібраційної діагностики зазначених ушкоджень. Дана стаття є продовженням досліджень вібробуджуючих сил в АД при появі ексцентриситету іншого типу – кутового ексцентриситету.

Теоретична і практична цінність отриманих результатів полягає в подальшому їх використанні в системах вібраційного контролю та діагностики технічного стану потужних АД для виявлення КуЕР на ранній стадії його розвитку.

Мета досліджень. Метою статті є дослідження методами математичного моделювання змін вібробуджуючих сил та визначення в них діагностичних ознак, які виникають внаслідок появи кутового ексцентриситету ротора АД.

Математична модель. Математична модель досліджуваного АД базується на диференціальному рівнянні в часткових похідних в роторній системі координат [1], що чисельно розв'язується методом скінченних елементів в програмі COMSOL Multiphysics:

$$\frac{\partial^2 \underline{A_z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{A_z}}{\partial y^2} - j\omega_1 \sigma \mu \gamma \underline{A_z} = -\mu \underline{J_{z\text{стор}}} ,$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота струму статора;

S – ковзання ротора;

μ – магнітна проникність;

γ – електропровідність;

$J_{z\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів.

Важливою складовою зазначеної математичної моделі є модель електромагнітних сил [1, 2], які визначаються за допомогою тензора магнітного натягу Максвелла, що характеризує густину електромагнітної сили, прикладеної до поверхні розточки статора. Сигнали п'єзоелектричних датчиків віброприскорення [1], які встановлюються на статорі машини і вимірюють її вібрації, пропорційні нормальній складовій тензора магнітного натягу.

КуЕР АД є ушкодженням, яке має досліджуватися в тривимірній постановці, оскільки величина повітряного проміжку є різною по довжині АД, що потребує значних розрахункових потужностей комп'ютерів. Однак з метою спрощення аналізу вібробуджуючих сил в АД, що має КуЕР, його можна аналізувати в двовимірній постановці як сукупність площин, в яких ротор зміщується відносно статора в радіальному напрямку. Датчик вібрації, розташований на поверхні статора, знімає діагностичну інформацію тільки в одній з таких площин. Інтерес представляють сигнали датчиків, які розташовані в одній площині на різних торцях осердя статора. Тому достатньо

дослідити зміщення ротора відносно статора в двовимірній постановці в цих двох площинах.

В подальшому без втрати загальності результатів будемо досліджувати випадок КуЕР, при якому вісь ротора нахилена до вісі статора симетрично по відношенню до центра АД, тобто в середині довжини машини вісь статора і ротор співпадають. Для подальшого аналізу введемо коефіцієнт КуЕР, який характеризує кут нахилу φ вісі ротора відносно вісі статора:

$$k_\varphi = \varphi / \varphi_{\text{кр}},$$

де φ – поточне значення кута нахилу вісі ротора відносно повздовжньої вісі статора;

$\varphi_{\text{кр}}$ – критичне (максимально можливе) значення кута нахилу вісі ротора.

Величина φ розраховується за формулою:

$$\varphi = \arcsin((\delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}})/l),$$

де $\delta_{\text{max}} = \delta_n + \Delta\delta$, $\delta_{\text{min}} = \delta_n - \Delta\delta$ – максимальна і мінімальна величини повітряного проміжку АД;

δ_n – номінальний повітряний проміжок в неушкодженому АД;

$\Delta\delta$ – величина зміщення повітряного проміжку на торцях статора в ушкодженому АД;

l – аксіальна довжина статора.

Величина $\varphi_{\text{кр}}$ розраховується за формулою:

$$\varphi_{\text{кр}} = \arcsin(2\delta_n/l).$$

Значення кута φ в АД є дуже малим і зазвичай вимірюється в кутових хвилинах. Наприклад, для двигуна типу АТД, який розглядається надалі, допустимим кутом нахилу є $\varphi_{\text{кр}} = 10,88$ хв., при якому ротор торкається статора на обох торцях АД, що є аварійним режимом. Коефіцієнт КуЕР k_φ змінюється в межах від 0 (відсутність КуЕР) до 1 (ротор торкається статора). На практиці зручно вимірювати величини δ_{max} і δ_{min} на торцях АД і, знаючи ці значення, розраховувати k_φ . Числові значення величин, що характеризують КуЕР для АТД наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Числові значення величин, що характеризують КуЕР

k_φ	0	0,47	0,91
φ , хв.	0	5,14	9,88
δ_{max} , мм	6	7,3	8,5
δ_{min} , мм	6	4,7	3,5
$\Delta\delta$, мм	0	1,3	2,5

При дослідженнях вібробуджуючих сил виконується їх спектральний аналіз. Для знаходження діагностичних ознак, які з'являються в спектрах вібробуджуючих сил АД при появі ушкоджень, необхідно досліджувати зміну амплітуд певних гармонік в порівнянні з неушкодженим АД. Зокрема, потрібно аналізувати зміни наступних складових в спектрі вібробуджуючих сил.

1. Величину постійної складової спектру T_{a_0} .

2. Амплітуду обертової складової спектру $\bar{T}_{a_{ob}}$, яка має частоту $f_{a_{ob}}$, що визначається за формулою:

$$f_{a_{ob}} = f_L \cdot (1-s)/p.$$

Для досліджуваного далі АД $f_{a_{ob}} = 50$ Гц $(1 - 0,005)/1 = 49,75$ Гц.

3. Амплітуду складової спектру подвійної частоти $T_{a_{100}}$, яка має частоту 100 Гц.

4. Амплітуду зубцевої гармоніки статора $T_{a_{z1}}$, що має частоту f_{z1} , яка визначається за формулою: $f_{z1} = f_1 \cdot z_1/p$. Для досліджуваного АД: $f_{z1} = 50$ Гц $54/1 = 2700$ Гц (рис.1).

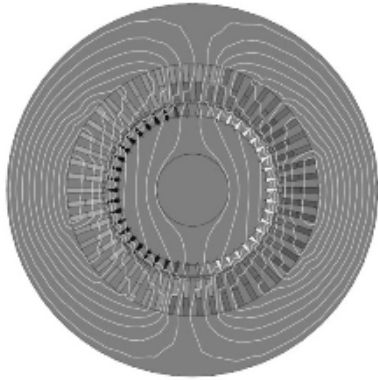


Рис. 1 – Активна зона досліджуваного АД

5. Амплітуду зубцевої гармоніки ротора $T_{a_{z2}}$, що має частоту f_{z2} , яка визначається за формулою:

$$f_{z2} = f_1 \cdot z_2/p.$$

Для досліджуваного АД: $f_{z2} = 50$ Гц $46/1 = 2300$ Гц.

6. Середньоквадратичне значення $T_{a_{SKZ}}$, що визначається за формулою:

$$T_{a_{SKZ}} = \sqrt{(T_{a1}^2 + T_{a2}^2 + T_{a3}^2 + \dots + T_{an}^2)/n}.$$

7. Середньоквадратичне значення шумових гармонік спектру $T_{a_{SKZ_{sh}}}$. Шумовими гармоніками називаються гармоніки, що менші по амплітуді певного встановленого рівня (наприклад 10–15% від амплітуди гармоніки $T_{a_{100}}$) і не є кратними основній $T_{a_{100}}$ і зубцевим гармонікам $T_{a_{z1}}$, $T_{a_{z2}}$.

Результати моделювання. Для моделювання та дослідження діагностичних ознак КуЕР був вибраний потужний трифазний АД типу АД потужністю 5000 кВт, що має наступні параметри: номінальна напруга – 6 кВ; струм статора 545 А; коефіцієнт корисної дії 94,8%; коефіцієнт потужності 0,89; номінальна частота обертання 2985 об/хв; число пар полюсів – 1; повітряний проміжок $\delta_n = 6$ мм; аксіальна довжина статора $l = 1740$ мм; діаметр розточки статора 675 мм. На рис. 1 показано розподіл векторного магнітного потенціалу та густини струмів в обмотках статора і ротора в поперечному перетині АД.

В процесі чисельних досліджень було проведено ряд розрахунків електромагнітних вібробуджуючих сил (тензора магнітного натягу) АД впродовж періоду часу одного повного оберту ротора при варіюванні коефіцієнта k_ϕ . Розрахунки проводилися в двох точках на поверхні статора: в зонах мінімального і максимального повітряних проміжків. На рис. 2 показано часові розподіли вібробуджуючих сил в неушкоджену АД, $k_\phi = 0$ (рис. 2, а, з) та АД, що мають КуЕР з величинами $k_\phi = 0,47$ (рис. 2, б, д) і $k_\phi = 0,91$ (рис. 2, в, є).

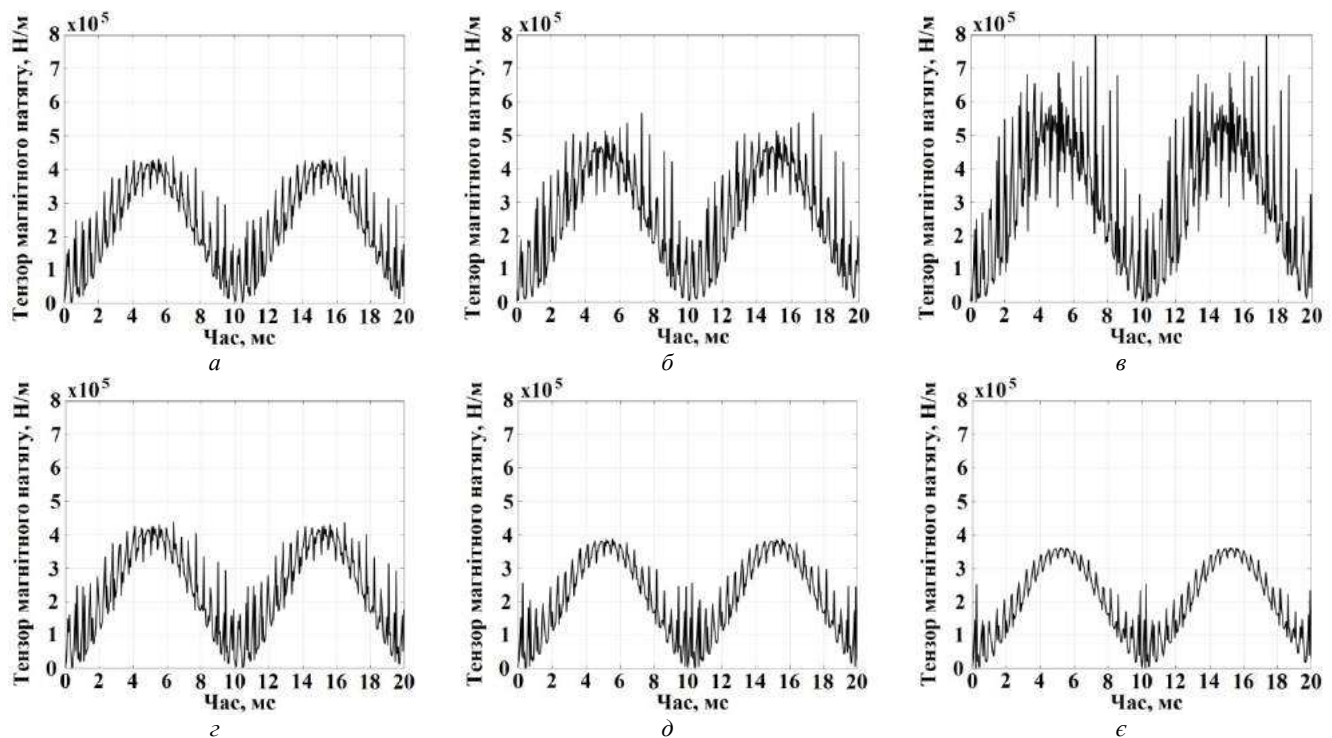


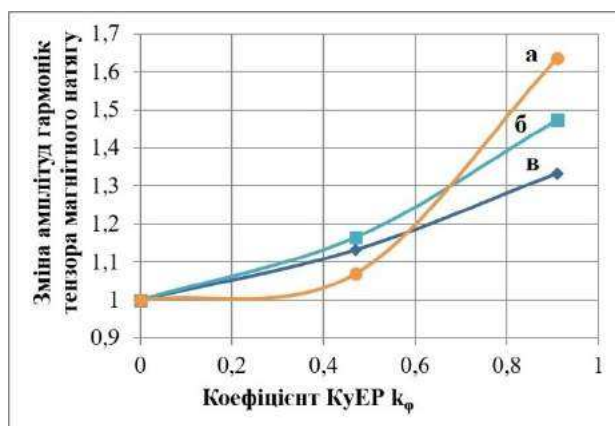
Рис. 2 – Розподіл вібробуджуючих сил в точках з мінімальним (а–в) і з максимальним (з–є) повітряними проміжками при різних величинах k_ϕ : а, з) неушкоджений АД, $k_\phi = 0$; б, д) $k_\phi = 0,47$; в, є) $k_\phi = 0,91$

З аналізу розподілів тензора магнітного натягу (рис. 2), видно що в зоні максимального повітряного проміжку в точці умовного розташування датчика вібрації (на поверхні зубця статора) в часовому розподілі сигналу датчика спостерігається менша частка зубцевих гармонік (рис. 2, *з-е*), а в зоні мінімального повітряного проміжку в розподілі сигналу спостерігаються суттєві збільшення зубцевих гармонік (рис. 2, *а-в*), що відображається в спектральному складі тензора магнітного натягу. Тензор магнітного натягу через врахування довжини АД має розмірність Н/м. Величини досліджуваних складових спектрів нешкоджененого АД і АД, що має КуЕР, наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Числові значення досліджуваних величин

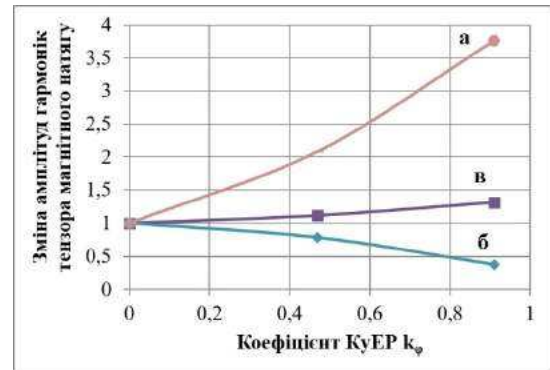
Позначення величини	Значення складових тензора магнітного натягу при КуЕР, Н/м		
	нешкодженій АД, $k_\phi = 0$	$k_\phi = 0,47$	$k_\phi = 0,91$
$T a_0$	237224	268363	316100
$T a_{ob}$	1315	1458	2131
$T a_{100}$	162281	181273	213763
$T a_{z1}$	2962	2319	1117
$T a_{z2}$	13970	29126	52542
$T a_{SKZ}$	9745	11349	14353
$T a_{SKZ sh}$	3986	4262	6515

На рисунках 3–4 представлено отримані результати у вигляді графіків, що характеризують зміну амплітуд гармонік вібробуджуючих сил в залежності від коефіцієнту КуЕР k_ϕ , зокрема, представлено зміни в спектральному складі сигналу датчика вібрації, який розташований над точкою з мінімальним повітряним проміжком.

Рис. 3 – Зміна величин амплітуд гармонік вібробуджуючих сил: а – $T_{a_SKZ_sh}$; б – T_{a_SKZ} ; в – T_{a_0}

З рис. 4 видно, що амплітуди зубцевих гармонік змінюються різнонапрямлено: при величині $k_\phi = 0,91$ амплітуда зубцевої гармоніки ротора збільшилася на 267%, а амплітуда зубцевої гармоніки статора зменшилася на 62%.

Постійна складова спектру (рис. 3, в) і амплітуда гармоніки подвійної частоти 100 Гц (рис. 4, в) зростають зі збільшенням величини КуЕР. При величині $k_\phi = 0,91$ ці значення становлять відповідно 33% і 31%.

Рис. 4 – Зміна величин амплітуд гармонік вібробуджуючих сил: а – T_{a_z2} ; б – T_{a_z1} ; в – T_{a_100}

Зі збільшенням величини КуЕР зростає середньоквадратичне значення спектру в першу чергу завдяки зростанню постійної складової (рис. 3, в) і амплітуди гармоніки подвійної частоти (рис. 4, в). При $k_\phi = 0,91$ це значення збільшується на 47%. Зі збільшенням величини КуЕР зростає середньоквадратичне значення шумових гармонік в спектрі (рис. 3, а) завдяки зростанню шумових гармонік (рис. 2, б, в). При величині $k_\phi = 0,91$ це значення збільшується на 63 %.

Діагностичною ознакою наявності КуЕР в АД є відсутність в спектрі обертової гармоніки.

За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки. Якщо коефіцієнт k_ϕ має значення в діапазоні 0,05...0,15, то наявний КуЕР не є небезпечним і можлива подальша експлуатація зазначеного АД. Якщо ж коефіцієнт k_ϕ є більшим за 0,15, то АД необхідно виводити в ремонт.

За результатами спектрального аналізу вібробуджуючих сил можна також визначати наявну величину кута нахилу вісі ротора.

Особливості процесу вібраційної діагностики при наявності КуЕР АД. Суттєвою особливістю методу вібраційної діагностики КуЕР АД є необхідність використання щонайменше двох датчиків вібрації, які розташовані на протилежних торцях осердя статора АД (рис. 5). При цьому слід одночасно знімати вібраційні сигнали з датчиків, визначати і фіксувати значення змін діагностичних ознак. Якщо в конкретний момент часу в одному датчику фіксується значення складових в спектрі вібробуджуючих сил такими, що відповідають розташуванню мінімального повітряного проміжку під датчиком, а в іншому датчику сигнали відповідають розташуванню максимального повітряного проміжку під датчиком, тобто сигнали в двох датчиках є протилежними в сенсі числових значень кількісних діагностичних ознак, то це вказує на наявність КуЕР в АД. Рівень розвитку КуЕР визначається рівнем зміни значень складових в спектрі вібробуджуючих сил. Оскільки досліджується статичний КуЕР (зміщена вісь ротора не обертається), а не динамічний КуЕР (зміщена вісь ротора обертається), то можливий випадок, при якому під обома встановленими на торцях датчиками буде однакова величина повітряного проміжку. Це буде

проявлятися в однаковому спектральному складі гармонік вібробуджуючих сил. Для остаточного визначення наявності статичного КуЕР в АД необхідно повернути обидва датчики в одній площині на кут 90° і зробити нові вимірювання. Точно визначити місце розташування найменшого повітряного проміжку в АД при статичному КуЕР можна завдяки виконанню ряду вимірів сигналів при поступовому зміщенні датчика вібрації уздовж зовнішньої торцевої поверхні осердя статора АД. Ця інформація може бути корисною, наприклад, для вирівнювання вісей підшипників в процесі ремонтних робіт АД.

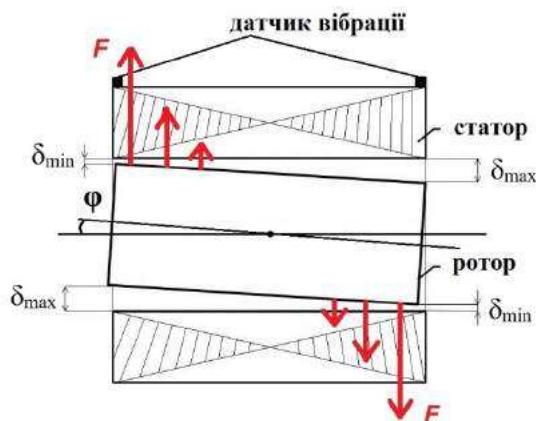


Рис. 5 – Розташування датчиків вібрації АД для дослідження КуЕР і пара сил, що діє на ротор

КуЕР є більш шкідливим і небезпечним ушкодженням ротора АД в порівнянні з радіальними видами ексцентриситету. Це пояснюється появою пари сил одностороннього магнітного тяжіння (рис. 5), яка створює шкідливий повздовжній момент сили, який призводить до прискореного зношування підшипників двигуна. Величина цього моменту може бути визначена за допомогою розробленої математичної моделі.

Висновки. 1. Методами математичного моделювання досліджено зміну електромагнітних вібробуджуючих сил та відповідних складових їх спектрів, які виникають при появі КуЕР АД.

2. Встановлено, що у разі, якщо за результатами поточних вимірювань нерівномірність повітряного проміжку АД, яка викликана появою КуЕР, визначається діапазоном числових значень коефіцієнта k_ϕ в межах 0,05...0,15, то можлива подальша експлуатація АД без суттєвих обмежень. При $k_\phi=0,15...0,5$ двигун потребує виводу в поточний ремонт, а при $k_\phi > 0,5$ буде спостерігатися значне збільшення вібрацій і АД потребує термінового виводу в ремонт для усунення КуЕР.

3. Встановлено, що діагностичними ознаками, які свідчать про наявність статичного КуЕР в АД, є: а) суттєве збільшення шумових і роторних зубцевих гармонік спектру вібробуджуючих сил в одному з датчиків, який розташований в зоні мінімального повітряного проміжку АД; б) відсутність в спектрі вібробуджуючих сил оборотної гармоніки;

4. При появі КуЕР створюється пара сил, що

утворює момент сили, який діє в напрямку збільшення величини КуЕР;

5. Для проведення вібраційної діагностики КуЕР АД необхідно використання двох датчиків, розташованих в одній площині на протилежних торцях осердя статора АД.

Список літератури

1. Васковський Ю. Н. Анализ сигналов датчиков вибрации в короткозамкнутых асинхронных двигателях на основе математических моделей вибровозмущающих электромагнитных сил / Ю. Н. Васковський, А. А. Гераскин // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – Вип. 5. – С. 12–16.
2. Васковський Ю. Н. Математическое моделирование электромагнитных полей в короткозамкнутом асинхронном двигателе с поврежденной обмоткой ротора / Ю. Н. Васковський, А. А. Гераскин // Технічна електродинаміка. – 2010. – Вип. 2. – С. 56–61.
3. Васковський Ю. Н. Вибродіагностика ексцентриситета ротора асинхронних машин на основе анализа вибровозмущающих сил / Ю. Н. Васковський, А. А. Гераскин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – Вип. 38 (1081). – С. 52–62.
4. Калінов А. П. Оцінювання впливу неякості напруги живлення на віброхарактеристики асинхронних двигунів / А. П. Калінов, Д. Г. Мамчур, О. В. Браташ, О. І. Простак // Вісник КДПУ. – 2009. – Вип. 4/2009(57). – С. 78–81.
5. Мамчур Д. Г. Діагностика асинхронних двигунів на основі показників якості перетворення енергії : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.01. «Електричні машини і апарати» / Д. Г. Мамчур. – Кременчук, 2010. – 20 с.
6. Nandi S. Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages Energy Conversion, / S. Nandi, A. Shehad., and Toliyat H.A. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. vol. 16, no. 3, pp. 253–260.
7. Keller S. Large low-speed hydro-generators – unbalanced magnetic pulls and additional damper losses in eccentricity conditions / S. Keller, M.T. Xuan, and J.J. Simond // Electrical Power Application. – 2007, vol. 1(5), pp. 657–664.
8. Wallin M. Damper winding influence on unbalanced magnetic pull in salient pole generators with rotor eccentricity / M. Wallin, J. Bladh, and U. Lundin // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013, vol. 9(49), pp. 5158–5165.
9. Szabo L. Virtual Instruments for detecting rotor faults in induction motors / L. Szabo, J.B. Dobai, and K.A. Biro // Advances in Electrical and Electronic Engineering. – 2011, vol. 3, no 2, pp. 119–122.
10. Zhen D. Fault diagnosis of motor drives using stator current signal analysis based on dynamic time warping / D. Zhen, T. Wang, F. Gu, and A.D. Ball // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2013, vol. 34, no 1, pp. 191–202.

References (transliterated)

1. Vaskovskiy Yu.N., Geraskin A.A. Analiz signalov datchikov vibratsii v korotkozamknutykh asinhronnykh dvigatelyah na osnove matematicheskikh modeley vibrovosmushchayushchikh elektromagnitnykh sil [Analysis of signals of vibration sensors in the squirrel cage induction motors on the basis of mathematical models of vibrating electromagnetic perturbing forces]. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrical and electromechanical]. Kharkiv, 2010, issue 5, pp. 12–16.
2. Vaskovskiy Yu.N., Geraskin A.A. Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh poley v korotkozamknutom asinhronnom dvigatele s povrezhdennoy obmotkoy rотора [Mathematical modeling of electromagnetic fields in the squirrel cage induction motor with damaged rotor winding]. *Tekhnichna elektrodinamika* [Technical electrodynamics]. Kyev, 2010, issue 2, pp. 56–61.
3. Vaskovskiy Yu.N., Geraskin A.A. Vibrodiagnostika ekscentrisiteta rотора asinhronnykh mashin na osnove analiza vibrovosmushchayushchikh sil [Vibration diagnostics of rotor eccentricity of induction machines based on vibration analysis

- perturbing forces]. *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI»*. Zbirnik naukovih prats. Seriya: Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorennia energiyi [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific papers. Series: Electrical machines and electro-mechanical energy conversion]. Kharkiv, 2014. issue 38 (1081), pp. 52–62.
4. Kalinov A.P., Mamchur D.G., Bratash O.V., Prostack O.I. Otsynuyannya vplivu neyaklnosti naprugi zhivlennya na vibroharakteristiki asinhronnih dviguniv [Assessing the impact of low-quality supply voltage on the vibration characteristics of induction motors]. *Visnik KDPU* [Bulletin of the KSPU]. Kremenchuk, 2009, issue 4/2009(57), pp. 78–81.
 5. Mamchur D.G. Diagnostika asinhronnih dviguniv na osnovi pokaznikov yakosti peretvorennia energiyi: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk: spets. 05.09.01. "Elektrichni mashini i aparati" [Diagnosis of induction motors on the basis of indicators of the quality of energy conversion. Abstract of a thesis candidate eng.sci.diss. (Ph. D.) 05.09.01. "Electrical machinery and apparatus"]. Kremenchuk, 2010. 20 p.
 6. Nandi S., Shehad A., and Toliyat H.A. Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages Energy. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2001, vol. 16, no. 3, pp. 253–260.
 7. Keller S., Xuan M.T., and Simond J.J. Large low-speed hydro-generators – unbalanced magnetic pulls and additional damper losses in eccentricity conditions. *Electrical Power Application*. 2007, vol. 1(5), pp. 657–664.
 8. Wallin M., Bladh J., and Lundin U. Damper winding influence on unbalanced magnetic pull in salient pole generators with rotor eccentricity. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2013, vol. 9(49), pp. 5158–5165.
 9. Szabo L., Dobai J.B., and Biro K.A. Virtual Instruments for detecting rotor faults in induction motors. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 119–122.
 10. Zhen D., Wang T., Gu F., and Ball A.D. Fault diagnosis of motor drives using stator current signal analysis based on dynamic time warping. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013, vol. 34, no. 1, pp. 191–202.

Надіслано (received) 03.04.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Діагностика кутового ексцентриситету ротора асинхронних двигунів на основі аналізу вібробуджуючих сил / Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін, Н.В. Беленок // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 30–35. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Діагностика углового ексцентриситета ротора асинхронных двигателей на основе анализа вибробуджующих сил / Ю.Н. Васьковский, А.А. Гераскин, Н.В. Беленок // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 30–35. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2409-9295.

Induction motors angular rotor eccentricity diagnosis by analyzing vibroperturbing forces / Yu.N. Vaskovskiy, A.A. Geraskin, N. V. Belenok // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 11 (1183). – P. 30–35. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Васьковський Юрій Миколайович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Васьковский Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электромеханики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»; тел.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Vaskovskiy Yuriy Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Kiyv Polytechnic Institute", tel.: (050) 10-220-10; e-mail: vun157@gmail.com.

Гераскін Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, асистент кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; тел.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

Гераськин Александр Анатольевич – кандидат технических наук, ассистент кафедры электромеханики, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»; тел.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

Geraskin Alexandr Anatolievich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Lecturer at the Department of Electromechanics, National Technical University of Ukraine "Kiyv Polytechnic Institute", tel.: (099) 364-75-94; e-mail: nirbikalpasamadhi@ukr.net.

Беленок Надія Володимирівна – старший викладач кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»; e-mail: nv_kpi@ukr.net.

Беленок Надежда Владимировна – старший преподаватель кафедры теоретической электротехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»; e-mail: nv_kpi@ukr.net

Belenok Nadiya Volodimirivna – Senior Lecturer at the Department of Theoretical electrical Engineering, National Technical University of Ukraine "Kiyv Polytechnic Institute"; e-mail: nv_kpi@ukr.net.