

УДК 621.313.33

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗПОДІЛ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ СИЛ ПРИ ВИТКОВИХ ЗАМИКАННЯХ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**А.М. Мельник**^{*}, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

e-mail: ied10@ukr.net

ORCID ID:^{*} <http://orcid.org/0000-0002-7492-3110>

Розроблено польову математичну модель для аналізу розподілу віброзбуджуючих сил електромагнітного походження в асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором при наявності виткових замикань обмотки статора. Комп'ютерне моделювання виконано методом скінченних елементів. Дослідження проведено на прикладі серійного двигуна типу А62 потужністю 1,7 кВт. Показано, що при появі виткових замикань у спектрі сигналу з'являються додаткові гармоніки, кратні обертовій частоті. Порівняння результатів математичного моделювання з експериментальним показало розбіжність 5...10 %. Запропоновано діагностичні параметри, які характеризують відношення амплітуд спектрів розподілу ТМН залежно від кількості замкнених витків обмотки статора. Бібл. 8, рис. 7, таблиця.

Ключові слова: математичне моделювання, метод скінченних елементів, тензор магнітного натягу, виткові замикання, електромагнітні сили, вібрація.

Вступ. На сьогодні моніторинг технічного стану електричних машин є досить актуальною та перспективною задачею для інженерів та дослідників у багатьох галузях промисловості та наукових установах. Існує багато методів моніторингу технічного стану двигунів: вібраційний, тепловий, хімічний, акустичний, механічний, а також методи, що засновані на вимірюванні та аналізі крутного моменту, споживаної потужності, магнітного потоку в повітряному проміжку, параметрів електричної машини та ін. Ці методи зазвичай застосовуються для виявлення різних типів пошкодження конструкції двигунів. Усі дефекти, що виникають в асинхронних двигунах (АД), можна умовно розділити на два типи: електричні та механічні. Електричні спричинені дефектами ізоляції (пробій), обмотки ротора та замиканнями витків обмотки статора. До механічних належать такі дефекти, як ексцентриситет повітряного проміжку, дефекти підшипників, неспіввісність валу та ін.

Аналіз публікацій за останні роки показав, що існує багато методів щодо виявлення наявності виткових замикань в обмотці статора АД [6–8]. Так, у роботі [6] запропоновано метод діагностики АД за аналізом спектра миттєвої потужності трьох фаз. У роботі представлено математичну модель, яка дає змогу враховувати в комплексі взаємний вплив електромагнітних, електромеханічних та механічних процесів, що відбуваються в системі за наявності дефектів. Аналіз даних математичного моделювання дає можливість сформулювати ряд діагностичних показників, які відображають зміну характеристик сигналу споживаної потужності за наявності виткових замикань. Одним з таких показників є величина потужності відповідної гармонічної складової, наприклад 100 Гц.

У роботі [3] розроблено систему діагностування обривів та виткових замикань у статорних обмотках АД. Діагностування виконано шляхом контролю миттєвих значень фазних струмів обмоток статора, які система отримує з датчиків струму *LEM*. Як діагностичний показник запропоновано використовувати несиметрію величин струмів та кутів зсуву фаз між напругами та струмами фазних обмоток статора. З метою недопущення помилкових спрацьовувань при несиметрії мережі живлення, ознакою наявності пошкодження використано різницю потенціалів між нульовою точкою обмоток статора і штучно виділеною нейтраллю мережі живлення. В результаті встановлено залежності, що дають змогу визначити величини кутів зсуву фаз між струмами фазних обмоток від кількості замкнених витків і діючих величин струмів статорних обмоток при витковому замиканні в сталому режимі роботи двигуна для з'єднання статорних обмоток трикутником і зіркою з двома паралельними гілками в кожній фазній обмотці.

У роботі [5] показано можливість виявлення пошкодження обмотки статора АД шляхом контролю амплітуди струму двигуна з використанням методу нечіткої логіки. Цей метод реалізовано у програмному середовищі *Matlab/Simulink*, яке виводить на монітор поточний стан обмотки статора у режимі реального часу та дає можливість прийняти рішення щодо наявності пошкоджень витків обмотки статора. Такий метод нечіткої логіки може ідентифікувати появу пошкодження з високою точністю, але потребує досить глибоких знань програмного забезпечення для його реалізації.

Упродовж останніх років найпоширенішим методом, який застосовується для виявлення дефектів електричних машин, є метод вібраційної діагностики. Однак, як бачимо з останніх досліджень науковців, цей метод достатньою мірою не реалізовано для ідентифікації виткових замикань. Тому цю статтю присвячено математичному моделюванню електромагнітних віброзбуджуючих сил при наявності виткових замикань обмотки статора АД на основі методу вібродіагностики та дослідженню розподілу віброзбуджуючих сил і вібрацій на корпусі машини.

Математична модель. Математична модель передбачає розв'язання рівняння електромагнітного поля в активній зоні АД і визначення віброзбуджуючих сил у виділеній точці статора, де розміщується умовний давач вібрації. Розглядатимемо сталі процеси, припускаючи, що всі польові функції змінюються у часі за гармонічним законом. У загальному випадку основне рівняння електромагнітного поля відносно комплексної амплітуди єдиної осьової складової векторного магнітного потенціалу \dot{A}_z в довільній системі координат має такий вигляд [1]:

$$\dot{A}_z - j\omega\mu\gamma\dot{A}_z + \mu\gamma\omega_R \left(R \times \text{rot} \dot{A}_z \right) = -\mu \dot{J}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

де $\dot{J}_{\text{стор}}$ – густина сторонніх струмів (у даному випадку це щільність струмів у пазах статора, яка задається відповідно до схеми обмотки статора); ω – кутова частота зміни у часі векторного магнітного потенціалу; ω_R – кутова швидкість обертання ротора; μ – магнітна проникність; γ – електропровідність; R – радіус-вектор довільної точки ротора. Кутова частота зміни у часі магнітного потенціалу і кутова частота обертання ротора залежать від вибору системи координат, в якій виконується розв'язок. Для розв'язку цієї задачі використаємо роторну систему координат, а рівняння (1) матиме вигляд:

$$\Delta \dot{A}_z - j\omega_1\mu\gamma_s \dot{A}_z = -\mu \dot{J}_{\text{стор}}, \quad (2)$$

де ω_1 – кутова частота обертання поля статора; s – ковзання ротора АД.

Джерелами поля є густина сторонніх струмів трьох фаз обмотки статора АД:

$$\begin{aligned} \dot{J}_{A\text{стор}} &= I_m u_{\Pi} / S_{\Pi}; & \dot{J}_{B\text{стор}} &= I_m u_{\Pi} [\cos(-2\pi/3) - j\sin(-2\pi/3)] / S_{\Pi}; \\ \dot{J}_{C\text{стор}} &= I_m u_{\Pi} [\cos(-4\pi/3) - j\sin(-4\pi/3)] / S_{\Pi}, \end{aligned} \quad (3)$$

де I_m – амплітуда струму в фазі обмотки статора; u_{Π} – число послідовно з'єднаних провідників у пазу статора; S_{Π} – площа перетину паза статора. Рівняння (2) доповнюється однорідними граничними умовами першого роду на лінії зовнішньої поверхні ярма статора, що обмежує розрахункову область:

$$\dot{A}_z \Big|_G = 0. \quad (4)$$

Величина μ в кожній точці розрахункової області, де знаходяться феромагнітні матеріали, визначається за відповідними кривими намагнічування. Складові вектора магнітної індукції в декартовій системі координат визначаються за співвідношеннями

$$\dot{B}_x = \partial \dot{A}_z / \partial y; \quad \dot{B}_y = \partial \dot{A}_z / \partial x. \quad (5)$$

Щільність віброзбуджуючих сил пропорційна тензору магнітного натягу (ТМН), який має фізичну розмірність тиску (Н/м²). Модулі нормальної та тангенціальної складових ТМН виражаються як

$$T_n = \left| \frac{1}{2\mu} \left(\dot{B}_n^2 - \dot{B}_\tau^2 \right) \right|; \quad T_\tau = \left| \frac{1}{\mu} \left(\dot{B}_n \cdot \dot{B}_\tau \right) \right|, \quad (6)$$

де \dot{B}_n, \dot{B}_τ – відповідно нормальна (направлена вздовж вектора нормалі до поверхні в заданій точці) і тангенціальна (направлена вздовж дотичної до поверхні в заданій точці) проекції вектора магнітної індукції. Нормальна і тангенціальна складові магнітної індукції визначаються через проекції вектора індукції в декартовій системі координат за виразами

$$\dot{B}_n = \dot{B}_y \cos\alpha + \dot{B}_x \sin\alpha = \left(y \dot{B}_y + x \dot{B}_x \right) / R_\delta; \quad \dot{B}_\tau = \dot{B}_x \cos\alpha - \dot{B}_y \sin\alpha = \left(y \dot{B}_x - x \dot{B}_y \right) / R_\delta, \quad (7)$$

де x, y – проекції радіус-вектора на осі системи координат; R_δ – радіус розточки статора. Надалі розглядаються радіальні вібрації вздовж розточки статора та на виділених точках, які виникають за рахунок дії нормальної складової тензора магнітного натягу.

Математична модель (1)...(7) чисельно реалізована методом скінченних елементів за допомогою програмного середовища *Comsol Multiphysics* [4]. Інтервал часу T , на якому здійснюється аналіз сигналу, відповідає одному періоду, тобто одному повному обороту ротора дванадцятиполюсного АД. При номінальному ковзанні, що дорівнює $s = 0,04$, розрахунковий інтервал складає $T = (0 \dots 0,125)$ с. Кількість розрахункових кроків становить 250, тобто один крок за часом дорівнює $5 \cdot 10^{-4}$ с, а ротор за цей час обертався відносно статора на кут майже $1,5^\circ$, що є достатнім для дотримання умов точності.

Експериментальний стенд. У лабораторії відділу моделювання машин змінного струму Інституту електродинаміки НАН України на випробувальному стенді проведено експериментальні дослідження вібрацій на корпусі статора АД. На рис. 1 зображено випробувальний стенд, який складається з двошвидкісного АД з короткозамкненим (КЗ) ротором типу А62-12/8/6/4, давач вібрацій типу 1-ПА9. Давач має робочий діапазон частот $5 \dots 2500$ Гц та перетворює механічні коливання корпусу давача в електричний сигнал, пропорційний його прискоренню. Принцип дії базується на п'єзоелектричному ефекті. Вимірювальний давач встановлюється на корпусі статора електричної машини на вертикальній поперечній осі АД і за його допомогою вимірюється радіально направлена вібрація. Сигнал з давача фіксується за допомогою цифрового осцилографа типу *RIGOL – DS5000* з подальшою обробкою отриманих даних, що передаються через мережевий кабель на персональний комп'ютер. Додатково АД оснащено вивідним блоком тумблерів, за допомогою яких можливо штучно змоделювати замикання витків обмотки статора.

Результати математичного моделювання та експерименту. Дослідження проводились на прикладі АД з КЗ ротором типу А62-12/8/6/4 з такими даними: номінальна потужність $P_n = 1,7$ кВт, номінальний струм статора $I_n = 6,2$ А, номінальна швидкість обертання $n = 480$ об/хв, коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,63$, коефіцієнт потужності $\cos\phi = 0,66$, число пар полюсів $p = 6$, число пазів статора $z_1 = 54$, число стержнів ротора $z_2 = 44$, $w_\phi = 702$ – число провідників у фазі, $u_n = 78$ – число провідників у пазу.

У результаті математичного моделювання отримано розподіл електромагнітного поля в активній зоні АД (рис. 2), де показано миттєвий розподіл електромагнітних сил, що діють вздовж розточки статора (стрілками), магнітної індукції (затемненим кольором) і векторного магнітного потенціалу (лініями) в момент часу $t = 0,125$ с (a – неушкоджена



Рис. 1

обмотка двигуна, б – ушкоджена фаза У обмотки статора двигуна в межах полюсної поділки). З рис. 2 б видно суттєве спотворення електромагнітного поля при виникненні замикання в обмотці статора. Для детального аналізу віброзбуджуючих сил доцільно застосовувати спектральний аналіз. Для цього розкладемо в ряд Фур'є нормальну складову тензора, розраховану за виразом (6). На рис. 3 зображено спектрограми ТМН при бездефектному (а) та дефектному (б) станах обмотки статора, які отримані в результаті розкладання в спектр за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

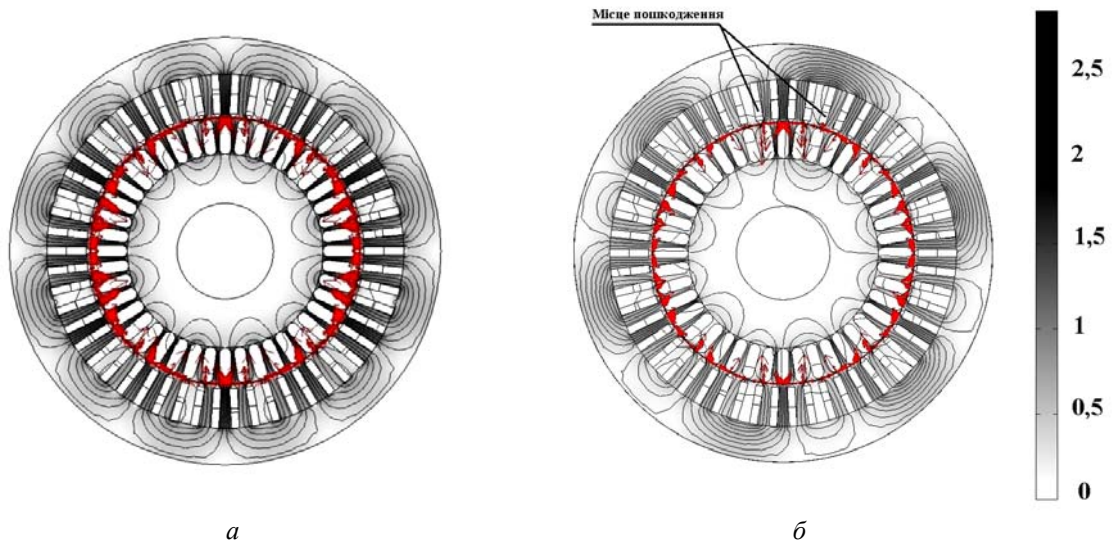


Рис. 2

Зі спектрограм видно, що залежно від кількості замкнених витків обмотки статора в спектрі віброзбуджуючих сил спостерігається збільшення 100 Гц гармоніки у 1,3...1,8 разу та кратних їй гармонік 200 Гц у 1,2...1,39 разу та відповідно 300 Гц у 1,08...1,13 разу. Окрім цього у спектрі з'являються додаткові гармоніки, кратні обертовій частоті $f_{об}$, яка складає: $f_{об} = f_1/p = 50/6 = 8,33$ Гц, де f_1 – частота мережі. Так, при замиканні витків перша обертова та кратні їй 3-, 5-, 7-, 9- та 11-а гармоніки складають 11...27 % від основної гармоніки електромагнітних коливань частоти 100 Гц. У зв'язку з викладеним введемо такі діагностичні параметри: 1) $k_{Tn_w} = (T_{n_nepar}/T_{n100}) \cdot 100\%$ – параметр, який показує у відсотковому співвідношенні скільки становить амплітуда спектра ТМН непарних гармонік T_{n_nepar} до амплітуди спектра ТМН основної гармоніки T_{n100} частоти 100 Гц; 2) $k_{Tn_осн} = T_{nw}/T_{n0}$ – який характеризує відношення амплітуди спектра ТМН при наявності замкнених витків T_{nw} до амплітуди спектра ТМН при їх відсутності T_{n0} для першої, другої та третьої гармонік основної частоти електромагнітних сил.

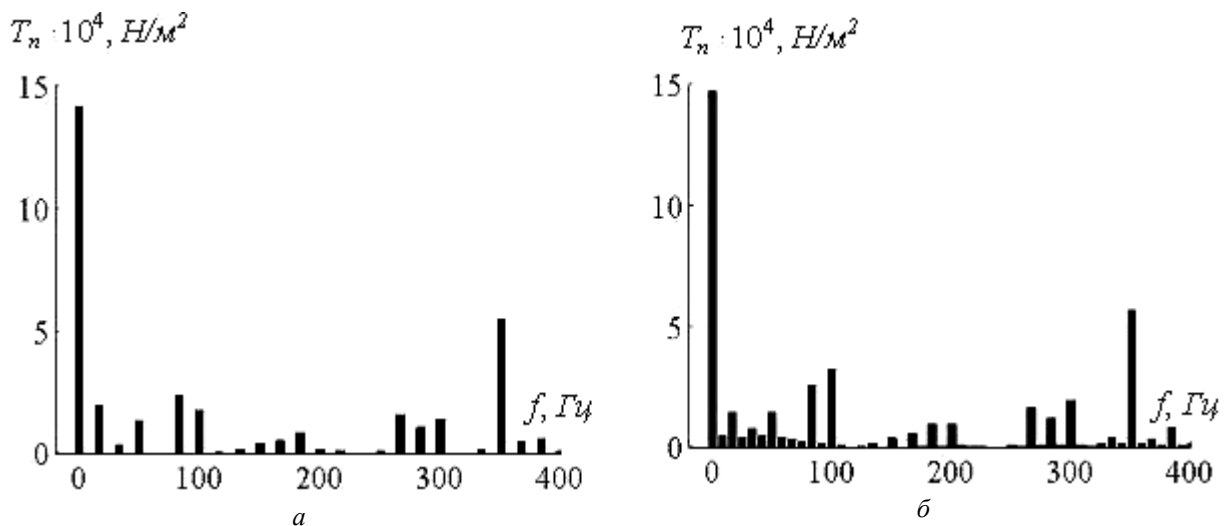


Рис. 3

№ гармоніки	$k_{Tn w}$						$k_{Tn осн}$		
	1	3	5	7	9	11	12	24	36
Немає	0,77	0,17	0,58	0,64	0,37	0,63	-		
Ушкоджено 9 витків	11,36	10,97	10,17	10,34	6,82	5,18	1,25	1,17	1,08
Ушкоджено 22 витки	27,56	25,74	28,92	26,08	15,91	11,31	1,82	1,39	1,13

Для детальнішого аналізу відповідних гармонік надалі перейдемо від ТМН до віброшвидкості, оскільки тензор натягу та віброприскорення лінійно пов'язані між собою [1]. Середньоквадратичне значення віброшвидкості визначається за формулою:

$$v = \frac{1}{m_e \sqrt{2\pi f_1}} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{|T_{ni}|}{i} \right)^2}, \quad (8)$$

де m_e – приведена маса статора на одиницю поверхні розточки статора і для такого двигуна складає $m_e = 1,038 \cdot 10^7$ кг/м². На рис. 4 показані спектрограми віброшвидкості, що отримані в результаті математичного моделювання (а) та експериментальних досліджень (б) для трьох варіантів: 1) умовно-бездефектного двигуна, 2) при замиканні дев'яти витків, 3) при замиканні 22 витків. Порівняння спектрограм показує, що розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними для першої гармоніки складає 5...10 %, що є прийнятним для практики. Дещо більша розбіжність у спектрах вищих гармонік може свідчити про можливі дефекти конструкції АД, що досліджувався, та ін.

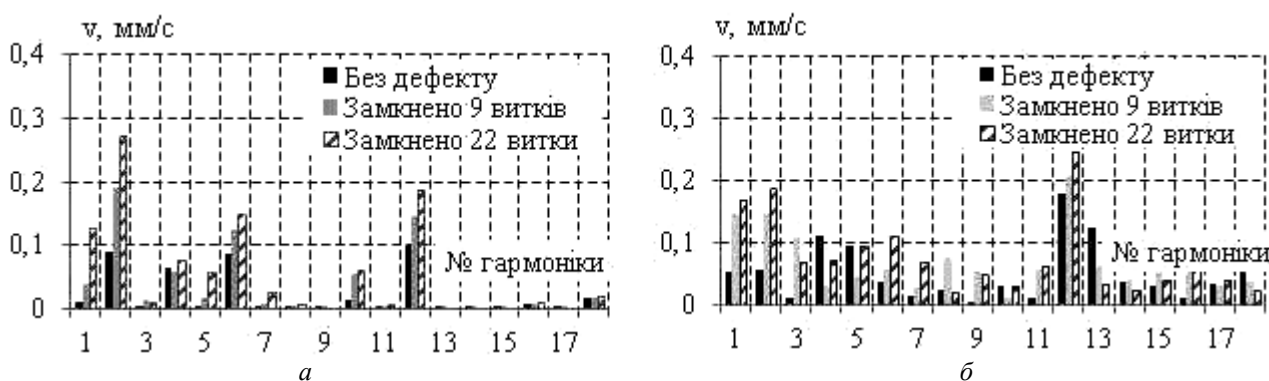


Рис. 4

Тому для адекватної оцінки щодо виявлення дефектів обмотки статора, у тому числі на вищих гармонічних складових, та формулювання конкретних діагностичних ознак, за такого виду ушкодження, проінтегруємо сигнал віброшвидкості та отримаємо відповідні спектри вібропереміщення. На рис. 5 показано розподіл амплітуд вібропереміщення вздовж поверхні корпусу статора АД при бездефектному стані обмотки (суцільна лінія) і при замиканні дев'яти (точкова лінія) та 22-х (штрих-пунктирна лінія) витків фази для таких частот: 8,33 Гц (а), 16,66 Гц (б), 100 Гц (в) та 200 Гц (г). Символом α_k умовно позначено полюсну поділку зовнішньої поверхні корпусу статора. Загальна довжина кола корпусу відповідає числу полюсів і відповідно становить $12 \alpha_k$. З отриманого розподілу видно характерні місця ушкодження котушки, відстань між якими приблизно дорівнює одному (умовному) полюсному діленню корпусу α_k . З цього випливає, що при виникненні ушкодження розподіл вібропараметрів вздовж поверхні корпусу статора стає нерівномірним, а на його основі можна стверджувати про наявність дефектів. На рис. 6 зображено умовну схему котушкової групи витків, що розміщені в одному пазу, та перемичку, яка моделює замикання витків у лобовій частині обмотки. Як бачимо, при появі виткових замикань з'являється замкнений контур (позначено штрих-пунктиром), який оминає струм фази ОС та в якому наводиться ЕРС і протікають місцеві циркуляційні струми [2]. За рахунок цього стає можливим виявити появу пошкоджень. На основі наведеного розподілу проаналізуємо піки кривих у зоні ушкодження, розклавши функції сигналу в даних токах на спектри за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

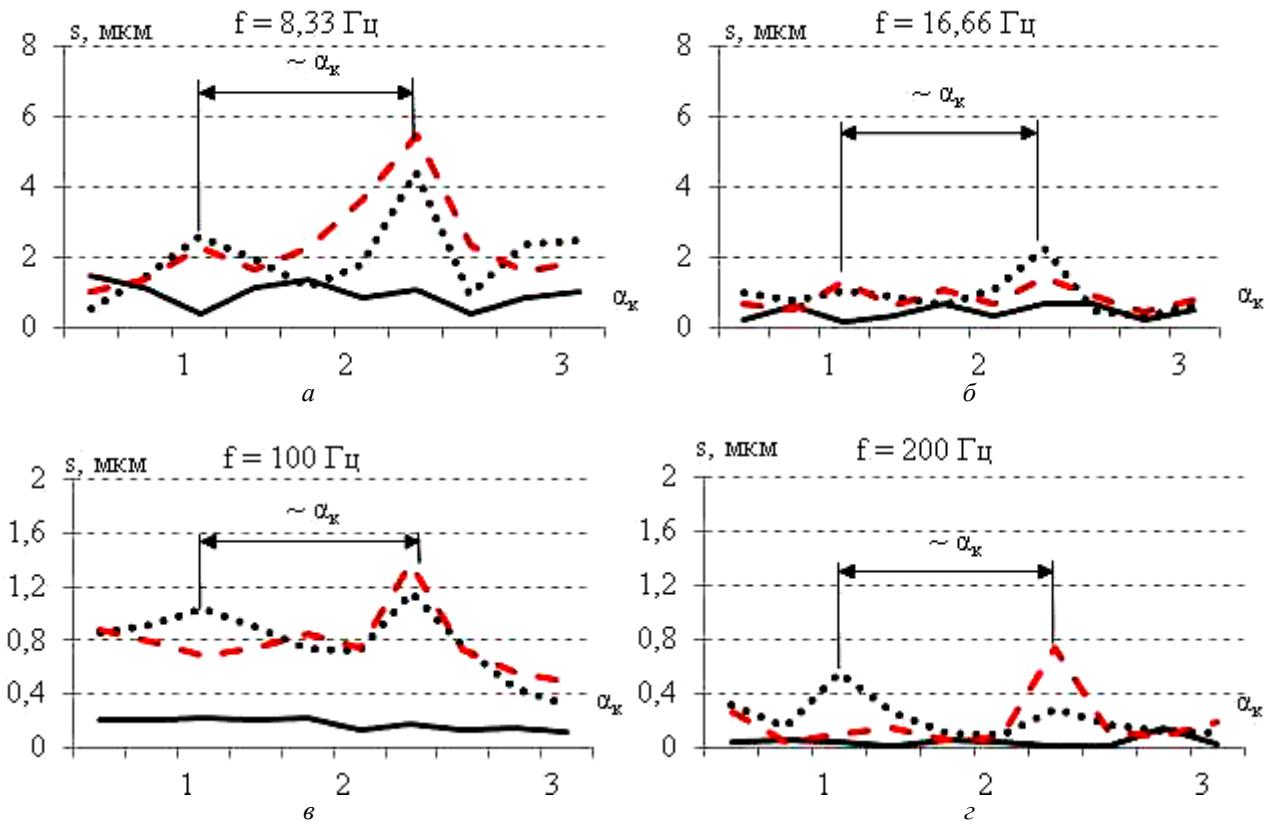


Рис. 5

З рис. 7 випливає, що за появою у спектрі сигналу вібропереміщення складових 1-, 2-, 3- та 12-ї гармонік можна говорити про наявність виткових замикань в обмотці статора. Окрім цього, у спектрі також з'являються вищі (4-...11-та) гармоніки, проте за їх наявністю стверджувати про виникнення дефекту недоцільно.

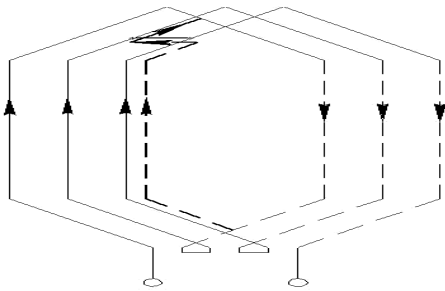


Рис. 6

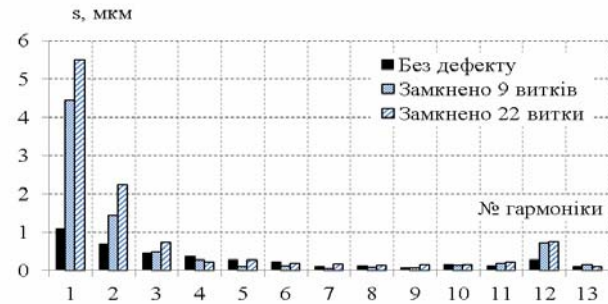


Рис. 7

Висновки: 1. На основі розробленої польової математичної моделі проведено аналіз розподілу віброзбуджуючих сил за наявності виткових замикань обмотки статора. Виявлено, що залежно від кількості замкнених витків обмотки статора в спектрі розподілу віброзбуджуючих сил спостерігається збільшення 100 Гц гармоніки у 1,3...1,8 разу та кратних їй гармонік 200 Гц та 300 Гц відповідно в 1,4 та 1,13 разу. Окрім цього, в спектрі розподілу з'являються додаткові гармоніки, кратні обертовій частоті $f_{об}$, та складають 11...27 % від основної гармоніки електромагнітних коливань частоти 100 Гц.

2. Математична модель підтверджена експериментально шляхом порівняння амплітуд спектрів віброшвидкостей корпусу АД при дефектному та умовно-бездефектному станах обмотки статора. Розбіжність між математичною моделлю та експериментом склала 5...10 %.

3. Запропоновано діагностичні параметри: 1) параметр, що характеризує відношення амплітуди спектра ТМН при наявності замкнених витків до амплітуди спектра ТМН при їх відсутності для першої, другої та третьої гармонік основної частоти електромагнітних сил;

2) параметр, що показує у відсотковому співвідношенні скільки становить амплітуда спектра ТМН непарних гармонік до амплітуди спектра ТМН основної гармоніки частоти 100 Гц.

1. Васьковський Ю.Н., Гераскин А.А. Вибровозмущающие электромагнитные силы в короткозамкнутых асинхронных двигателях при наличии повреждений их конструкции // Техн. электродинамика. – 2010. – № 5. – С. 31–38.
2. Гуторова М.С. Моделирование магнитного поля в промежутке асинхронных двигателей за витковых замыканий обмотки статора // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2015. – Вип. 40. – С. 90–95.
3. Ткаченко А.А., Коновалов В.А., Лагуненко С.В. Разработка устройства диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 4 (29). – С. 76–80.
4. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>.
5. Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic [Електронний ресурс] / Pedro V. J. Rodriguez, Antero Arkkio // Режим доступу до статті: <http://www.sciencedirect.com/sci-hub.org/science/article/pii/S1568494607000981>
6. Mamchur D., Kalinov A. Diagnostics of Asynchronous Motors Based on Spectra Analysis of Power Consumption // Proc. XI International PhD Workshop OWD'2009, Poland, Gliwice, 2009, pp. 434-439.
7. Nejari H. and Benbouzid M.E.H. Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach // IEEE Transactions on Industry Applications: Vol. 36, No. 3. – P. 730–735, May/June 2000.
8. Tallam R.M., Habeler T.G., Ronald G. Harley Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – 2002. – P. 1553–1557.

УДК 621.313

А.Н. Мельник, асп.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03680, Украина

Моделирование и распределение вибровозмущающих сил при витковых замыканиях обмотки статора асинхронного двигателя

Разработана полевая математическая модель для анализа распределения вибровозмущающих сил электромагнитного происхождения в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором при наличии витковых замыканий обмотки статора. Компьютерное моделирование выполнено методом конечных элементов. Исследование проведено на примере серийного двигателя типа А62 мощностью 1,7 кВт. Показано, что при возникновении витковых замыканий в спектре сигнала появляются дополнительные гармоники, кратные частоте вращения. Сравнение результатов математического моделирования с экспериментальным показало расхождение 5...10 %. Предложены диагностические параметры, которые характеризуют отношение амплитуд спектров распределения тензора магнитного натяжения в зависимости от количества закороченных витков обмотки статора. Библ. 8, рис. 7, таблица.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных элементов, тензор магнитного натяжения, витковые замыкания, электромагнитные силы, вибрация.

A.M. Melnyk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Simulation and distribution of vibration disturbing forces at turn-fault of induction motors stator winding

A mathematical model of electromagnetic field for the analysis of distribution of electromagnetic vibration disturbing forces in induction-squirrel-cage motor at turn-fault of stator winding is developed. Computer simulation is executed by a finite element method. Investigation is spent on an example of the production machine of type A62 by power of $P_n = 1,7$ kW. If there are of turn-fault in spectrum of signal to appear additional harmonics multiple to a rotation frequency are shown. Comparison of result of mathematical simulation with the experimental has shown a discrepancy 5...10 %. Diagnostic variables described of amplitude ratio of distributing spectrum of Maxwell stress tensor depending on quantity of the short-circuited turns of a stator winding is proposed. References 8, figures 7, table. vibration displacement spectrum in the presence of the turn-fault and of amplitude ratio of a vibration displacement spectrum at soundness of a winding is entered. References 8, figures 7, table.

Key words: mathematical simulation, a finite element method, Maxwell stress tensor, turn-fault, electromagnetic forces, vibration.

Надійшла 9.02.2016
Received 9.02.2016