УДК 621.313

ВИЗНАЧЕННЯ ВИТКОВИХ ЗАМИКАНЬ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

О.І. Титко, чл.-кор. НАН України, **А.В. Худяков**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail:anton@devi.kiev.ua

На основі даних фізичного моделювання проведено аналіз характеристик електромагнітного поля в коронках зубців статора і у повітряному проміжку асинхронного двигуна (АД). Запропоновано нові діагностичні параметри стану АД на основі різних форм представлення електромагнітного поля у проміжку машини, що має виткові замикання обмотки статора, показано їхні переваги. Бібл. 7, рис. 3, табл. 2.
Ключові слова: асинхронний двигун, обмотка статора, виткові замикання, діагностика, індукція магнітного поля.

У процесі експлуатації в електричних машинах досить часто виникають виткові замикання обмотки статора, що призводить до негативних наслідків: збільшується струм у пошкоджених обмотках, температура, рівень вібрації. Особливо часто виткові замикання обмотки статора мають місце в АД. Є багато способів визначення появи такого дефекту [1-7]. Як правило, діагностування здійснюється за аналізом струмів [1, 3], вібрацій [2], теплових процесів [7], електромагнітних процесів [4, 6]. Для раннього діагностування найбільш перспективними є методи, які базуються на аналізі характеристик електромагнітного поля [4, 6]. Проте тут виникає низка складнощів, пов'язаних з розподілом параметрів, що характеризують поле. Для аналізу поля необхідно його відобразити у просторі. Це можна зробити, наприклад, встановивши велику кількість датчиків і за їхніми показаннями виконати апроксимацію параметрів на всьому просторі, або створити мобільні засоби вимірювання. Обидва підходи в технічних об'єктах важко реалізувати. Більш перспективним є вимірювання поля в об'єктах на основі показань датчиків, встановлених у реперних точках, та результатів математичного і фізичного моделювання і формування бази знань у вигляді аналітичних залежностей і значень параметрів поля у реперних точках, отриманих для різних технічних станів об'єкта. Через те, що на ранніх стадіях розвитку дефектів деформація поля може бути незначна, у даній роботі пропонується розглядати компенсоване поле, яке є різницею параметрів полів умовно бездефектної машини і машини з поточним технічним станом. Такий підхід дозволяє підвищити чутливість діагностичних параметрів. Покажемо це на результатах діагностування коротких замикань обмотки статора асинхронних двигунів за зміною характеристик магнітного поля у проміжку машини або в коронках зубців статора.

Метою роботи є розробка і наукове обґрунтування методу діагностування електричних машин, зокрема асинхронних двигунів, на основі аналізу компенсованого електромагнітного поля, параметри якого контролюються в реперних точках у процесі роботи машин, пошук нових чутливих діагностичних параметрів. Для апробації методу діагностики обмотки статора щодо наявності виткових замикань, обґрунтування його достовірності та ефективності, а також можливого вдосконалення необхідно дослідити особливості магнітного поля у зоні установки датчиків контролю. На асинхронному двигуні А62-12/8/6/4 проведено комплекс робіт з оснащення датчиками індукції магнітного поля, що дозволило провести моделювання виткових замикань обмотки статора.

Для експериментального дослідження індукції магнітного поля у зазорі було встановлено датчики індуктивного типу, розроблені та виготовлені в Інституті електродинаміки НАН України. Датчик індукції у даному випадку – це один виток проводу ПЕЛШО-ОС діаметром 0,15 мм, навитий на коронку зубця статора електромашини та закріплений за допомогою клею "Професіонал".

На електромашині встановлено 18 датчиків, вихідні кінці 15 з них розпаяні на роз'єм; ті, що залишилися нерозпаяними, знаходяться у резерві. Таким чином оснащення виконано для двох пар полюсів. Це зроблено для того, щоб порівняти розподіл характеристик поля у двох зонах: під парами полюсів, де існує або відсутня замкнена частина обмотки.

Вимірювання індукції магнітного поля здійснювалося шляхом комп'ютерної реєстрації у режимі реального часу, що дає можливість отримати поточні значення індукції. Використовувався АЦП

© Титко О.І., Худяков А.В., 2017

Е-14-440 розрядністю в 14 біт. За 1 с здійснювалося 6250 вимірювань для кожного з 15 каналів, за період кривої індукції магнітного поля в 0,02 с – 125. Дослідження проводилися у режимі холостого ходу на умовно справній машині та на машині з замкненими витками статора.

Для підвищення точності проводилася статистична обробка даних. Для цього індукція у зубцях вимірювалася на 125 періодах у часі. Експерименти проводилися при наступних трьох варіантах виткових замикань: перший варіант – *Wз* = 1,3 %, другий – *Wз* = 3,1 %, третій – *Wз* = 4,5 %, де *Wз* – кількість замкнених витків у процентному відношенні до всіх витків фази. На рис. 1 показано розподіл по колу миттєвих значень магнітної індукції (в.о) для бездефектної машини (1) та при найбільш важкому варіанті виткових замикань (2) з статистичною обробкою вимірювань. Порівняння розподілів індукції магнітного поля по зубцях, отриманих для одного періоду, і при статистичній обробці показує їхню відмінність в окремих зубцях до 10-15%, що свідчить про необхідність при діагностуванні за магнітною індукцією *B* проводити статистичну обробку даних вимірювань.

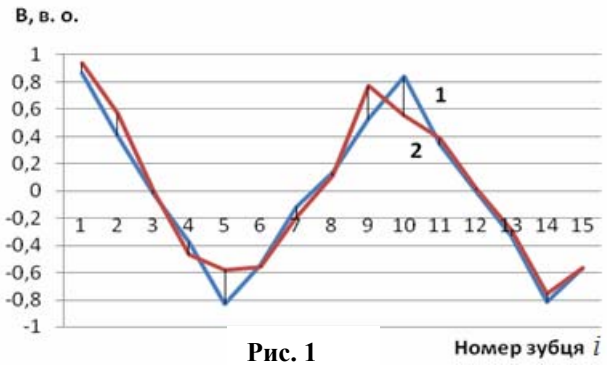

Рис. 1

Наведений розподіл індукції магнітного поля відповідає одному з моментів часу, обраному таким чином, щоб у зоні замкнених витків миттєве значення індукції було максимальним. Видно, що при даній нумерації зубців (номер зубця позначається літерою *i*) замкнені витки розташовані у пазах між 4 і 5 або 5 і 6 зубцями і через полюсне ділення, якому у цій машині відповідає 4,5 зубця.

Було застосовано метод сумарно-різницевої компенсації поля, тобто розглядалося поле, що відповідає лише його деформації внаслідок появи дефектів обмотки статора (рис. 2). Очевидно, що така крива розподілу магнітної індукції є набагато інформативнішою для діагностування. Крива розподілу індукції по зубцях вказує на точки місцезнаходження замикання витків – у пазах між 4 і 5 та 9 і 10 зубцями. Це визначається характером магнітного поля зубця, що межує з замкненими витками. Оскільки дане поле є суперпозицією основного робочого поля машини і пульсуючого поля струмів, які протікають у замкненій частині витків, то в одному із зубців магнітне поле буде слабшим, а в іншому сильнішим за робоче поле. Це і підтверджує характер розподілу індукції по зубцях компенсованого поля.

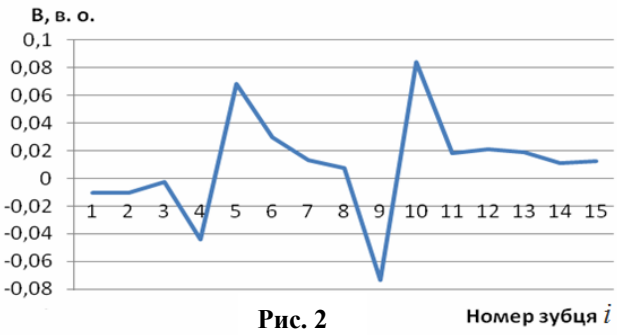

Рис. 2

Отже, зміна полярності компенсованого поля у двох сусідніх зубцях є діагностичною ознакою місця замикання витків. Крива на рис. 2 отримана в результаті обчислювальних операцій з миттєвими значеннями індукції магнітних полів у машині, що знаходиться у двох технічних станах. Розрахунки показують, що аналогічною є крива, отримана в результаті обчислювальних операцій з амплітудними або діючими значеннями індукції магнітного поля машини.

Цікавою для діагностування є топографія (рис. 3), отримана в результаті зображень миттєвих значень індукції в кожному з зубців на певному відрізку часу. На рис. 3, *а* показано групу кривих розподілу миттєвих значень індукції для бездефектної машини, а на рис. 3, *б* – для машини з витковими замиканнями (*Wз* =4,5 %). Через те, що магнітне поле є обертальним у повітряному проміжку машини, то в бездефектній машині амплітудні значення індукції магнітного поля приблизно однакові, про що свідчить отримана топографія. При дефектах в обмотці статора, коли виникає деформація поля, в розглянутій топографії з'являються провали у зоні зубців із замкненими витками. Таке зображення миттєвих значень може також використовуватися для візуального діагностування, яке є більш простим для обслуговуючого персоналу.

У табл. 1 наведено миттєві *(Вмит)* та амплітудні *(Вампл)* значення індукції магнітного поля у зубцях статора АД для чотирьох технічних станів машини в один із моментів часу при різній кількості замкнених витків.

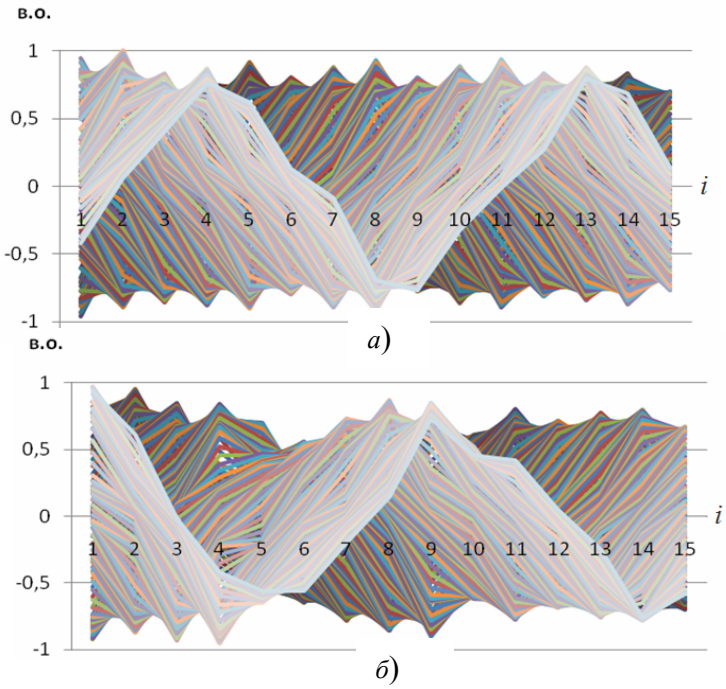

Рис. 3

Для тих самих варіантів наведено також індукцію вже компенсованого магнітного поля *(Вк.ампл)* у зубцях статора АД для трьох технічних станів машини. Видно, що навіть на ранній стадії розвитку дефекту в обмотці статора АД зміна індукції компенсованого поля показує на його наявність.

Для побудови діагностичних процедур, тобто алгоритмів діагностування ступеня розвитку дефекту (кількості замкнених витків) доцільно користуватися певними інтегральними параметрами. Таким параметром може бути площа фігури S, що утворюється кривою індукції компенсованого магнітного поля і азимутальною віссю на двох полюсних діленнях.

Таблиця 1

№ зубця	Миттєві значення *Вмит*, в.о				Амплітудні значення *Вампл*, в.о				Амплітудні значення *Вк.ампл*, в.о		
	Бездеф.	1 вар.	2 вар.	3 вар.	Бездеф	1 вар.	2 вар.	3 вар.	1 вар.	2 вар.	3 вар.
1	0,867	0,862	0,890	0,939	0,944	0,916	0,978	1,031	0,028	0,034	0,088
2	0,404	0,670	0,593	0,567	1,006	0,969	1,022	1,100	0,038	0,016	0,094
3	-0,015	0,103	0,013	0,005	0,831	0,834	0,997	1,063	0,003	0,166	0,231
4	-0,375	-0,183	-0,368	-0,469	0,869	0,878	0,994	1,041	0,009	0,125	0,172
5	-0,829	-0,658	-0,557	-0,577	0,909	0,825	0,706	0,750	0,084	0,203	0,159
6	-0,545	-0,675	-0,591	-0,557	0,797	0,747	0,69	0,700	0,050	0,106	0,097
7	-0,117	-0,315	-0,242	-0,199	0,894	0,838	0,844	0,878	0,056	0,050	0,016
8	0,137	0,019	0,085	0,113	0,922	0,900	0,975	1,031	0,022	0,053	0,109
9	0,532	0,353	0,669	0,770	0,788	0,809	0,978	1,044	0,022	0,191	0,256
10	0,842	0,787	0,607	0,551	0,894	0,809	0,669	0,659	0,084	0,225	0,234
11	0,342	0,629	0,498	0,384	0,934	0,925	0,878	0,841	0,009	0,056	0,094
12	0,006	0,691	0,602	0,022	0,834	0,891	0,838	0,794	0,056	0,003	0,041
13	-0,328	-0,153	-0,244	-0,282	0,888	0,797	0,813	0,850	0,091	0,075	0,038
14	-0,814	-0,639	-0,73	-0,754	0,903	0,831	0,859	0,881	0,072	0,044	0,022
15	-0,565	-0,677	-0,6	-0,563	0,781	0,709	0,763	0,788	0,072	0,019	0,006

Таблиця 2

Діагностичні параметри	№ варіантів		
	1	2	3
S_1	0,120	0,442	0,664
S_2	0,192	0,502	0,558
S_1+S_2	0,312	0,944	1,222

У табл. 2 наведено залежність даного параметра від величини W_3 для трьох варіантів виткових замикань обмотки статора, S_1 – параметр, розрахований на першому полюсному діленні обмотки, S_2 – на другому полюсному діленні.

Очевидно, що для бездефектної машини параметр S_i=0. Якщо за діагностичний параметр прийняти амплітудне або діюче значення індукції магнітного поля [5], то за наявності третього варіанта виткових замикань даний параметр максимально зміниться (у зубцях, прилеглих до замкнених вит-

ків) на 29 %. Тоді як, наприклад, параметр S_1 змінюється у цьому випадку на 66 %. Це підтверджує високу чутливість введеного діагностичного параметра. Дані табл. 2 дозволяють за інтегральним діагностичним параметром визначати кількість замкнених витків у обмотці статора даного АД. Як видно, з розвитком дефекту діагностичний параметр S зростає.

Висновки. Для діагностування виткових замикань обмотки статора асинхронного двигуна запропоновано і досліджено метод компенсованого поля. Показано, що застосування вказаного методу підвищує інформативність вимірювальних даних контролю індукції магнітного поля машини. Запропоновано інтегральний діагностичний параметр для визначення ступеня розвитку дефекту обмотки статора та спосіб ідентифікації місця замкнених витків. Запропоновано також візуальні способи моніторингу технічного стану АД. Реалізація запропонованого методу діагностування АД розрахована на застосування обчислювальної техніки.

1. *Гемке Р.Г.* Неисправности электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.

2. *Гижко Ю.І., Мислович М.В.* Елементи теорії та питання практичного застосування систем вібродіагностування рухомих вузлів електричних машин // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 45–56.

3. *Гринберг Г.А.* Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. − 727 с.

4. *Гуторова М.С.* Електромагнітний спосіб діагностики виткових замикань статорної обмотки АД // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2008. – № 20. – С. 42.

5. *Гуторова М.С.* Моделювання магнітного поля в проміжку АД за виткових замикань обмотки статора // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2015. – № 40. – С. 90–95.

6. *Петухов В.С., Соколов В.А.* Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – № 1. – С. 50–52.

7. *Счастливый Г.Г., Титко А.И., Федоренко Г.М., Бабяк А.А., Хуторецкий Г.М., Игнатов А.Д.* Электрическая машина с устройством для контроля температуры активной стали ротора. А.с. № 14417112 (СССР), 1988. Б.И. № 30.

УДК.621.313

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.И. Титко, чл.-корр. НАН Украины, **А.В. Худяков**

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина. E-mail:anton@devi.kiev.ua

На основе данных физического моделирования проведен анализ характеристик электромагнитного поля в коронках зубцов статора и в воздушном зазоре АД. Предложены новые диагностические параметры на основе разных форм представления электромагнитного поля в зазоре машины, имеющие витковые замыкания обмотки статора, показаны их преимущества. Библ. 7, рис. 3, табл. 2.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, обмотка статора, витковые замыкания, диагностика, индукция магнитного поля.

DEFINITION OF TURN-FAULT OF STATOR WINDING INDUCTION MOTOR ON THE BASIS OF THE COMPENSATION MAGNETIC FIELD

O.I. Tytko, A.V. Khudiakov

Institute of Electrodynamics Nationals Academy of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail:anton@devi.kiev.ua

Based on the analysis of physical design characteristics of the electromagnetic field in the stator teeth crowns in the air gap induction-squirrel-cage motor. The new diagnostic options based on different forms of representation of the electromagnetic field in the air gap of motor, having circuit turns the stator winding shown their benefits. References 7, figures 3, tables 2.

Key words: asynchronous motor, winding stator, coils circuit, diagnostics, magnetic field.

1. *Hemke R.G.* Malfunctions of electrical machines. − Leningrad: Energoatomisdat, 1989. − 336 p. (Rus)

2. *Gyzhko Yu.I.*, *Myslovych M.V.* Elements theory and practical application of issue Vibro-moving electrical machinery UNITS // Tekhnichna Elektrodynamika. − 2015. − No 2. − Pp. 45−56. (Ukr)

3. *Greenberg G.A.* Selected problems of mathematical theory of electrical and magnetic phenomena. − Moskva-Leningrad: Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR, 1948. − 727 p. (Rus)

4. *Hutorova M.S.* Electromagnetic method of diagnosing stator winding circuits induction-squirrel-cage motor // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. − 2008. − No 20. − 42 p. (Ukr)

5. *Hutorova M.S.* Modelling of the magnetic field in the gap for induction-squirrel-cage motor coil circuit stator winding // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. − 2015. − No 40. − Pp. 90−95. (Ukr)

6. *Petukhov V., Sokolov V.A.* Diagnosis of the electric motors. Method of spectral analysis of the current consumption // Novosti Elektrotekhniki. – 2005. – No 1. – Pp. 50–52. (Rus)

7. *Shchastlivyi G.G., Titko A.I., Fedorenko G.M., Babiak A.A., Khutoretsky G.M., Ignatov A.D*. Electric machine with a device for controlling the temperature of the rotor become active. AS 14417112 (USSR), 1988. (Rus)

Надійшла 13.04.2016

Остаточний варіант 30.09.2016