

дах, виготовлених з електротехнічної сталі. Визначено структури магнітоелектричних двигунів, в яких доцільне застосування стрічкових магнітопроводів. Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: шихтований магнітопровід, стрічковий магнітопровід, втрати на вихрові струми та гістерезис, магнітоелектричний двигун.

A.E. Antonov, I.S. Petukhov

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

The tape magnetic cores from amorphous iron in magnetoelectric type electric machines

The frequency dependences of losses in tape amorphous iron cores with radial and axial orientation of the magnetic flux of the rotor in electromechanical transducers of magnetoelectric type are obtained. A comparative analysis of the obtained frequency dependencies of the losses with those in the magnetic cores of electrical steel was executed. The structures of magnetoelectric motors, in which it is advisable to use the tape magnetic cores were determined. References 6, figures 5.

Key words: laminated magnetic core, tape magnetic core, eddy current and hysteresis losses, magnetoelectric motor.

Надійшла 15.07.2016

Received 15.07.2016

УДК 621.313

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ, ОБУМОВЛЕНИХ ВИЩИМИ ГАРМОНІКАМИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ

І.В. Головань, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: giv_6@ied.org.ua

Запропоновано підхід до розрахунку втрат, обумовлених вищими гармоніками електромагнітного поля асинхронного двигуна (АД), виходячи з співставлення результатів польового аналізу квазістаціонарних та нестаціонарних процесів електромагнітного поля АД. На прикладі АД з масивним гладким феромагнітним ротором проведено аналіз впливу різних чинників на величину втрат, обумовлених вищими гармоніками поля. Бібл. 8, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: втрати, вищі гармоніки, квазістаціонарне, нестаціонарне.

Вступ. Однією з причин зменшення ККД асинхронних двигунів (АД), зростання температури його активних частин, зниження моменту на валу двигуна є наявність додаткових втрат в АД.

Незважаючи на те, що питання додаткових втрат у традиційних конструкціях АД досліджено до теперішнього часу достатньо глибоко і знайдено різноманітні способи зменшення цих втрат [3], значення їх в АД залишаються достатньо високими. Так, реальні додаткові втрати в серійних АД можуть перевищувати значення 0,5 % від спожитої потужності (відповідно до ГОСТ 11828-75) і сягати 3 % й більше [1]. Величина додаткових втрат в АД нетрадиційних конструкцій, наприклад в АД з масивними елементами в колі ротора, у порівнянні з серійними АД може перевищувати в декілька разів, що робить такі двигуни взагалі недоцільними в експлуатації. Зменшення додаткових втрат в АД є необхідною передумовою до покращення експлуатаційних показників.

Основну частку додаткових втрат АД складають магнітні, а саме втрати, обумовлені вищими гармоніками поля.

Через складність визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, виникнення яких пов'язано з складними фізичними явищами і процесами, існуючі методики їх розрахунку носять наближений характер [1, 3, 4, 7].

У рамках існуючої теорії проектування електричних машин методики визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, представляються у вигляді спрощених аналі-

тичних виразів. У таких підходах прийнятна точність визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками магнітного поля АД традиційних конструкцій, досягається виходячи з прийнятої системи припущень та використанням поправних коефіцієнтів, що отримані на основі накопиченого досвіду даних чисельного і фізичного експериментів.

Врахувати вплив на величину втрат, обумовлених вищими гармоніками магнітного поля АД нетрадиційних конструкцій (АД з масивними елементами в колі ротора), таких факторів, як насичення окремих частин магнітопроводу, зубцевість осердь, дискретність розподілу обмоток за пазами, зміна конфігурації поля при обертанні ротора і т.п. взагалі неможливо в рамках припущень, що закладені в основі існуючих методик [1, 3, 4, 7]. Такі припущення пов'язані зі спрощеним врахуванням насичення магнітного поля, глибини проникнення магнітного поля в магнітопровід, характеру затухання магнітного поля, кількості врахованих гармонік індукції і т.п.

На цей час тільки польовий підхід до аналізу електричної машини дає змогу достатньо строго й ефективно врахувати вплив багатьох особливостей протікання електромагнітних процесів АД на величину втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, та максимально спростити систему припущень, яка має місце у сучасних методиках їх визначення.

При аналізі електричних машин колопольовим підходом [2] зникає потреба у відокремленні втрат за основною та вищими гармоніками поля. Такий підхід дає можливість напряму визначати всі необхідні характеристики режиму роботи електричної машини та величину усіх "грюючих" втрат. Але такий підхід є мало придатним (внаслідок потреби у великих ресурсах обчислювальної техніки) при проведенні багаторазових розрахунків АД, наприклад, при оптимальному проектуванні АД чи дослідженні їх у складі електромеханотронних систем. Такого недоліку з притаманними перевагами колопольового підходу позбавлений коловий аналіз режиму роботи електричної машини з визначенням за результатами польового аналізу параметрів схеми заміщення [5, 6]. Цей підхід дослідження електричної машини вже вимагає відокремлення втрат за основною та вищими гармоніками поля. Тому з метою отримання достовірних результатів за втратами, обумовленими вищими гармоніками поля, методика їх визначення має ґрунтуватись на результатах проведеного аналізу поля електричної машини.

Мета статті полягає у розробці та дослідженні особливостей підходу до визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, за результатами аналізу електромагнітного поля АД.

Основний матеріал та результати досліджень. Тільки при комплексному врахуванні у чисельних дослідженнях режиму роботи АД основних особливостей протікання електромагнітних процесів, з якими пов'язано виникнення вищих гармонік поля, можливо з прийнятною точністю визначити величину втрат за вищими гармоніками поля АД з будь-якою конфігурацією електромагнітного поля. Проаналізуємо можливість визначення втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, за результатами польового аналізу електромагнітного поля АД. Для розділення втрат за основною та вищими гармоніками поля умовно представимо потік машини у вигляді основного потоку робочої гармоніки і основного потоку вищих гармонік поля двигуна.

Провести аналіз електромагнітного поля АД з визначенням втрат за основним потоком вищих гармонік поля не можливо. Існуючий математичний апарат чисельного дослідження електромагнітного поля дає можливість провести дослідження АД за повним потоком та потоком тільки робочої гармоніки.

Тому розв'язок поставленої задачі буде полягати у відокремленні втрат, обумовлених вищими гармоніками поля АД, від втрат за повним потоком. Такий підхід можливо реалізувати за результатами дослідження режиму роботи АД за повним потоком та потоком робочої гармоніки поля. Отримавши втрати АД за повним потоком та потоком робочої гармоніки, втрати, обумовлені вищими гармоніками поля, можна отримати таким чином:

$$P_o = P_v - P_p, \quad (1)$$

де P_v – втрати АД, що виникли в результаті зміни повного потоку; P_p – втрати АД, що виникли в результаті зміни потоку робочої гармоніки поля.

Польова модель електромагнітного поля АД для розрахунку втрат за зміною повного потоку описується рівняннями Максвелла, що визначені в часовій області без врахування струмів зміщення, якими при існуючих у системі частотах можна знехтувати:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{\delta}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0.$$

Оскільки ці рівняння містять час як незалежні змінні, їх можна використати при моделюванні нестационарного поля. Після ряду відповідних перетворень отримуються рівняння двовимірного електромагнітного поля в x - y площині для дослідження нестационарних процесів у електромагнітному полі АД [2]:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}_z \right) + \sigma \frac{\partial \vec{A}_z}{\partial t} + \mu \sigma (\vec{v} \times \operatorname{rot} \vec{A}_z) = \vec{J}_c,$$

де \vec{A}_z – z -складова векторного магнітного потенціалу; μ – магнітна проникність матеріалу; σ – електропровідність матеріалу; \vec{v} – вектор швидкості; \vec{J}_c – z -складова вектора густини сторонніх струмів.

Втрати АД, що виникають в результаті зміни повного потоку, будуть розраховуватись за виразом

$$P_v = \frac{l}{\sigma} \int_S \vec{J}_n(t)^2 ds, \quad (2)$$

де l – довжина магнітопроводу; $\vec{J}_n(t)$ – z -складова вектора густини наведених струмів, що змінюється в функції незалежної змінної – часу; s – площа поперечного перерізу ротор АД.

Польова модель електромагнітного поля АД для розрахунку втрат за зміною потоку робочої гармоніки описується рівняннями Максвелла, що визначені в частотній області і записуються в комплексній формі

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{E}} = -j\omega \dot{\vec{B}}, \quad \operatorname{rot} \dot{\vec{H}} = \dot{\vec{\delta}}, \quad \operatorname{div} \dot{\vec{B}} = 0.$$

Рівняння електромагнітного поля, що містять кутову частоту як незалежну змінну, характеристики якого змінюються в часі за гармонічним законом, використовуються при моделюванні квазістационарного поля АД. Рівняння для дослідження квазістационарних процесів у електромагнітному полі АД має вигляд

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{\vec{A}}_z \right) + j\omega \sigma \dot{\vec{A}}_z = \dot{\vec{J}}_c,$$

де $\dot{\vec{A}}_z$ – z -складова комплексу векторного магнітного потенціалу; $\dot{\vec{J}}_c$ – z -складова комплексу вектора густини сторонніх струмів; ω – кутова частота зміни характеристик поля в часі.

Втрати АД, що виникають в результаті зміни потоку робочої гармоніки, будуть розраховуватись за виразом

$$P_p = \frac{l}{2\sigma} \int_S \left| \dot{\vec{J}}_n \right|^2 ds, \quad (3)$$

де $\dot{\vec{J}}_n$ – z -складова комплексу амплітуди вектора густини наведених струмів.

На прикладі АД з масивним гладким феромагнітним ротором продемонструємо можливість визначення величини втрат за вищими гармоніками поля в масиві ротора, виникнення яких обумовлене насиченістю магнітопроводів статора та ротора, нерівномірністю повітряного проміжку, дискретністю розміщення обмотки в пазах.

Розрахунки АД з масивним гладким феромагнітним ротором проведемо на базі розрахункової області АД 4A80A2У3 з матеріалом масиву ротора Ст3. Розв'язок рівнянь нестационарних і квазістационарних процесів у електромагнітному полі АД реалізовано методом скінченних елементів у середовищі комплексу COMSOL Multiphysics [8].

Величину втрат від впливу кожного з перерахованих вище чинників визначимо шляхом поетапного їх врахування на прикладі чотирьох варіантів розрахункових польових моделей АД.

Перший варіант розрахункової польової моделі характеризується відсутністю чинників виникнення вищих гармонік електромагнітного поля і відповідно спричинених ними втрат. Розрахункова модель такого АД характеризується неелектропровідним магнітопроводом статора, рівномірністю повітряного проміжку (відсутність зубцевої зони на статорі та роторі), заданням сторонніх струмів у повітряному проміжку (що відповідає синусоїдному розподілу магніторушійної сили (МРС)), таким значенням модуля густини сторонніх струмів, при якому магнітопровід статора і ротора можна вважати нененасиченим ($I_m = 0,1 \cdot I_{nom}$), де I_{nom} – модуль густини сторонніх струмів АД 4А80А2У3 у номінальному режимі.

Відповідно до викладеного вище підходу дослідимо квазістаціонарні та нестаціонарні процеси електромагнітного поля АД.

Вираз для визначення комплексу амплітуди вектора густини сторонніх струмів у повітряному проміжку для дослідження квазістаціонарних процесів електромагнітного поля АД має вигляд

$$\dot{J} = I_m \left[\left(x / \sqrt{x^2 + y^2} \right) + j \left(y / \sqrt{x^2 + y^2} \right) \right],$$

де I_m – амплітуда густини сторонніх струмів; x, y – координати точок на розрахунковій області АД.

Вираз для визначення вектора густини сторонніх струмів у повітряному проміжку для дослідження нестаціонарних процесів електромагнітного поля АД має вигляд

$$\vec{J} = I_m \left[\left(x / \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot \cos(\omega t) - \left(y / \sqrt{x^2 + y^2} \right) \cdot \sin(\omega t) \right],$$

де t – час як незалежна змінна.

За виразами (2) та (3) втрати в масиві ротора становитимуть $P_v = 1,154$ Вт та $P_p = 1,158$ Вт відповідно. Таким чином, за результатами розрахунків значення повних втрат в обох розрахункових моделях АД фактично будуть однаковими. Що є підтвердженням відсутності вищих гармонік поля в повітряному просторі та спричинених ними додаткових втрат $P_\delta \approx 0$.

У другому варіанті оцінимо результати виникнення вищих гармонік поля і визначимо спричинені ними втрати внаслідок насичення магнітопроводів АД. З метою реалізації поставленої задачі у описаній розрахунковій моделі АД було збільшено значення амплітуди густини сторонніх струмів до номінального значення амплітуди густини сторонніх струмів АД 4А80А2У3.

Відомо, що насиченість магнітопроводу призводить до сплюснення кривої індукції в повітряному проміжку. Така форма кривої індукції в повітряному проміжку буде мати місце у випадку задання в якості джерела електромагнітного поля синусоїдної напруги живлення.

У цих моделях як джерело електромагнітного поля є синусоїдально розподілений в повітряному проміжку струм. Через що крива розподілу індукції в повітряному проміжку буде мати вигляд, показаний на рис. 1. Тому при обробці результатів чисельного дослідження АД приймається загальноприйняте припущення при проектуванні АД стосовно синусоїдності заданого струму як джерела електромагнітного поля.

За виразами (2) та (3) втрати в масиві ротора будуть становити $P_v = 96,0$ Вт та $P_p = 83,5$ Вт відповідно. За виразом (1) втрати, обумовлені вищими гармоніками поля, у цьому випадку будуть становити близько $P_\delta = 12,5$ Вт.

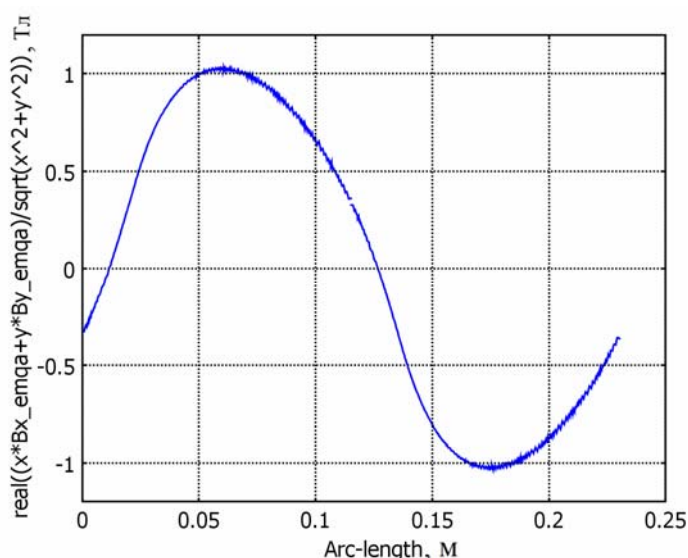


Рис. 1

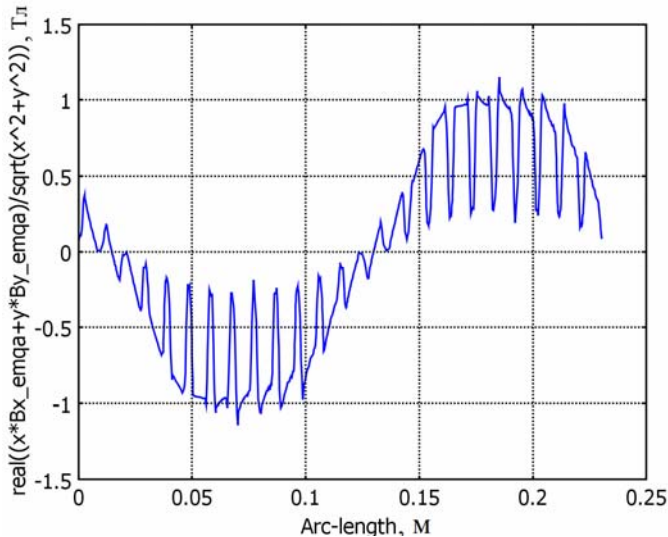


Рис. 2

значно перевищують втрати, спричинені суто насиченістю магнітопроводу, що пов'язано зі значно більшим спотворенням синусоїдної кривої розподілу магнітної індукції.

Вплив дискретності розміщення обмотки в пазах на величину втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, визначимо на прикладі **четвертого варіанту** розрахункової польової моделі АД з заданими сторонніми струмами в пазах статора. Для цього в третьому варіанті розрахункової моделі АД проведемо заміну заданої області зі сторонніми струмами в повітряному проміжку на області струмів в пазах статора.

Така модель дає змогу виявити втрати від вищих гармонік магнітного поля, пов'язаних з вищими гармоніками МРС. Вирази комплексу амплітуди векторів густини сторонніх струмів у фазах обмотки статора для дослідження квазістаціонарних процесів АД мають вигляд

$$\dot{J}_A = I_m, \quad \dot{J}_B = I_m \left(-0,5 - j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right), \quad \dot{J}_C = I_m \left(-0,5 + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right).$$

Вирази векторів густини сторонніх струмів у фазах обмотки статора для дослідження нестаціонарних процесів АД мають вигляд

$$\vec{J}_A = I_m \cos(\omega t); \quad \vec{J}_B = I_m \cos(\omega t + \pi \cdot 4/3); \quad \vec{J}_C = I_m \cos(\omega t + \pi \cdot 2/3).$$

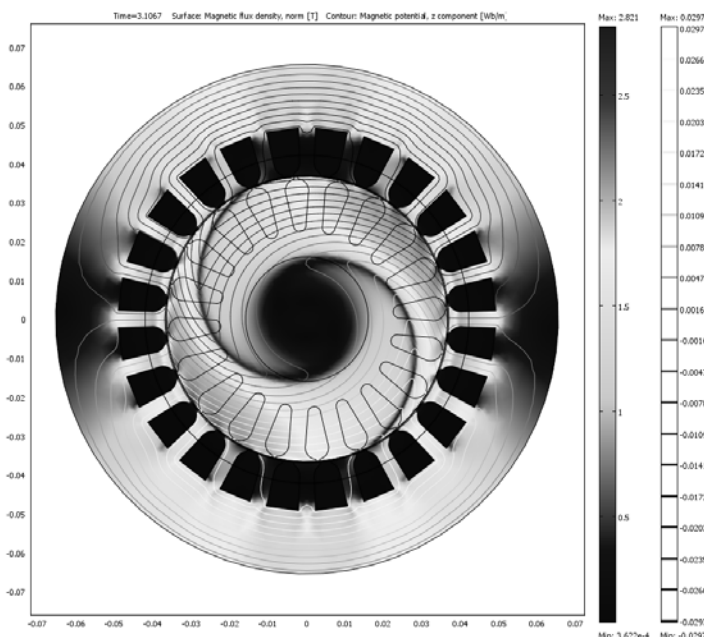


Рис. 3

З метою виявлення втрат, спричинених нерівномірністю повітряного проміжку, **третій варіант** розрахункової польової моделі у порівнянні з другим доповнимо пазовою структурою магнітопроводу статора АД 4А80А2У3.

Нерівномірність повітряного проміжку, як це видно з рис. 2, призвела до спотворення в ньому синусоїдної кривої розподілу магнітної індукції.

За виразами (2) та (3) втрати в масиві ротора будуть становити $P_v=253,5$ Вт та $P_p=45,8$ Вт відповідно. Величина втрат за вищими гармоніками поля, спричинених сумарною дією насиченості магнітопроводу та нерівномірністю повітряного проміжку, становить $P_\delta=207$ Вт. Вони

На рис. 3 у вигляді картини розподілу величини індукції магнітного поля та ізоліній векторного магнітного потенціалу продемонстровано результат розрахунку розрахункової моделі АД з гладким масивним феромагнітним ротором.

За виразами (2) та (3) втрати в масиві ротора становитимуть $P_v=290$ Вт та $P_p=42,1$ Вт відповідно. Величина втрат за вищими гармоніками поля, спричинених сумарною дією насиченості магнітопроводу, нерівномірністю повітряного проміжку та дискретністю розміщення обмотки із струмом в пазах, становить $P_\delta=247,9$ Вт. Порівняно незначне зростання втрат від вищих гармонік поля у порівнянні з попереднім варіантом дослідження

АД пояснюється незначною зміною кривої розподілу миттєвого значення магнітної індукції в повітряному проміжку (рис. 4).

Результати наведених вище розрахунків зведені до таблиці.

Отримані результати проведеного аналізу впливу перерахованих вище факторів на величину втрат від вищих гармонік поля підтверджують прямий зв'язок величини втрат, обумовлених вищими гармоніками поля, зі ступенем спотворення синусоїдно розподіленого поля в повітряному проміжку. З таблиці видно, що найбільші втрати, обумовлені вищими гармоніками поля, в масиві ротора АД пов'язані з впливом вищих гармонік поля, спричинених нерівномірністю повітряного проміжку.

Висновок. Запропоновано підхід до розрахунку втрат, обумовлених вищими гармоніками поля АД, який полягає у безпосередньому їх визначенні виходячи з співставлення результатів польового аналізу квазістаціонарних та нестационарних процесів електромагнітного поля АД. Розглянутий підхід дає змогу дослідити вплив особливостей протікання електромагнітних процесів, що пов'язані з геометрією, властивостями матеріалу та режимом роботи АД, на величину втрат, обумовлених вищими гармоніками поля.

Дослідження, проведені на прикладі АД з масивним гладким ротором, продемонстрували можливість аналізу впливу різних чинників на величину втрат, обумовлених вищими гармоніками поля АД. Це дає змогу розраховувати величину таких втрат та розробляти необхідні заходи щодо їх зменшення на стадії проектування АД.

1. Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. Асинхронные двигатели общего назначения; Под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.
2. Васильовський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 192 с.
3. Гаинцев Ю.В. Добавочные потери в асинхронных двигателях. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.
4. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Пер. с англ.; Под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
5. Попович О.М., Головань І.В. Уточнення аналізу режимів роботи асинхронних двигунів у складі електромехатронних систем еквівалентуванням їх польових моделей коловими // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 113–115.
6. Попович О.М. Математичні моделі, параметри та характеристики асинхронних двигунів електромехатронних систем: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: Спец. 05.09.01 «Електричні машини і апарати». – К., 2015. – 39 с.
7. Копылов И.П., Горянов Ф.А., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
8. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com>.

УДК 621.313

И.В. Головань, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Определение потерь, обусловленных высшими гармониками электромагнитного поля в асинхронном двигателе

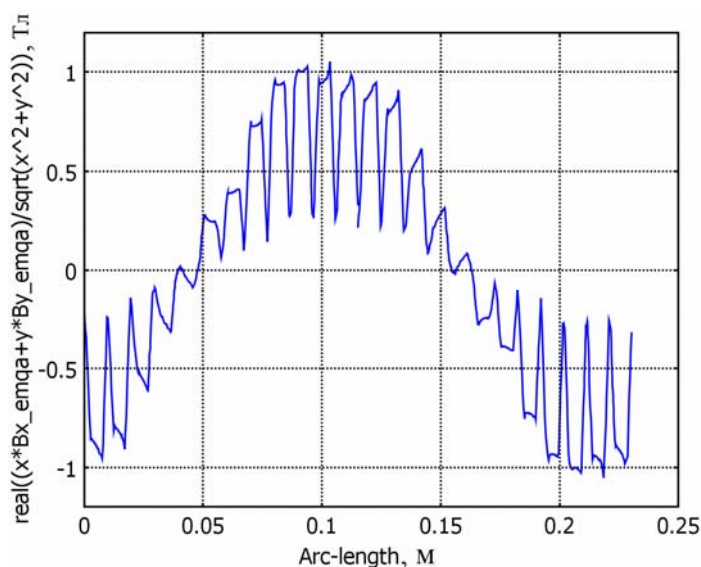


Рис. 4

Втрати, Вт	Номер варіанту розрахункової польової моделі АД			
	1	2	3	4
P_v	1,154	96,0	253,5	290,0
P_p	1,158	83,5	45,8	42,1
P_o	~0	12,5	207,7	247,9

Цель работы состоит в разработке и исследовании особенностей подхода к определению потерь, обусловленных высшими гармониками поля, по результатам анализа электромагнитного поля асинхронного двигателя. Предложен подход к расчету потерь, обусловленных высшими гармониками электромагнитного поля асинхронного двигателя, исходя из сопоставления результатов полевого анализа квазистационарных и нестационарных процессов электромагнитного поля асинхронного двигателя. Данный подход дает возможность исследовать влияние особенностей электромагнитных процессов, связанных с геометрией, свойствами материалов и режимом работы асинхронного двигателя, на величину потерь от высших гармоник поля. Представленные в работе результаты исследования на примере асинхронного двигателя с массивным гладким ротором продемонстрировали возможность анализа влияния разных факторов на величину потерь от высших гармоник поля асинхронного двигателя, что дает возможность разрабатывать необходимые мероприятия по их уменьшению на стадии проектирования асинхронного двигателя. Библ. 8, рис. 4, таблица.

Ключевые слова: потери, высшие гармоники, квазистационарный, нестационарный.

I.V. Golovan

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

Determination of losses after ultraharmonics electromagnetic field in the induction motor

The purpose of work is to develop and study is particularly suited to the determination of the loss of the higher harmonics of the field for the results of the analysis of the electromagnetic field of the induction motor. The approach of calculating the loss of the higher harmonics of the electromagnetic field of the induction motor, which is in direct determination of the loss of the higher harmonics of the field based on the comparison of the results of field analysis of quasi-stationary and non-stationary processes of the electromagnetic field of the induction motor. This approach makes it possible to investigate the influence of the electromagnetic characteristics of the processes associated with the geometry, material properties and mode of operation of the induction motor, the value of losses for the higher harmonics of the field. Presented in the results of a study on the example of an asynchronous motor with a massive smooth rotor, we demonstrated the ability to analyze the impact of various factors on the value of losses for the higher harmonics of the field of an induction motor, which makes it possible to develop the necessary measures to reduce them to an induction motor design stage. References 8, figures 4, table.

Key words: loss, harmonics, quasi-stationary, non-stationary.

Надійшла 30.06.2016

Received 30.06.2016

УДК 621.313.322-81

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВІБРОЗБУДЖУЮЧИХ СИЛ ПРИ РОЗПРЕСУВАННІ ШИХТОВАНОГО ОСЕРДЯ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

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>

Проведено фізичне моделювання електромагнітних віброзбуджуючих сил при виникненні розпресування шихтованого осердя статора потужного турбогенератора на прикладі масштабних фізичних моделей серійних турбогенераторів потужністю 200 та 500 МВт, розроблених в Інституті електродинаміки НАН України. Показано, що при виникненні локального розпресування крайнього пакета шихтованого осердя статора турбогенератора збільшується амплітуда основної гармоніки вібрацій електромагнітних сил на 25...55 %. Порівняння експериментальних даних з аналітичним розрахунком показало розбіжність результатів майже у 6 %, що є допустимим. Проведено вимірювання розподілу вібрацій на зовнішній поверхні статора фізичної моделі серійного генератора 500 МВт при пошкодженні тяжкої шпильки та виявлено збільшення амплітуди спектра основної гармоніки вібрацій вздовж всієї поверхні. Аналіз зміни розподілу амплітуди другої гармоніки спектра сигналу вібрацій дає змогу чітко діагностувати місце ослаблення тяжкої шпильки. Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова: турбогенератор, фізичне моделювання, електромагнітні віброзбуджуючі сили, експеримент, віброзміщення, віброприскорення.