

В.А. ВЛАСЕНКО, аспірант, КТУ, Кривий Ріг

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОІНДУКЦІЇ ФАЗ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА

Побудовано польові моделі індукторних машин різних конструкцій з метою визначення параметрів міжфазної взаємної індуктивності. Сформульовано рекомендації щодо врахування взаємоіндукції фаз.

Построено полевые модели индукторных машин разной конструкции с целью определения параметров межфазной взаимной индуктивности. Сформулировано предложения относительно учета взаимоиндукции фаз.

Вступ. Математичне моделювання вентильно-індукторного двигуна (ВІД) є основним засобом його дослідження та проектування. У переважній більшості математичних моделей ВІД взаємна індукція фаз двигуна не враховується і розглядається без належного обґрунтування як фактор невисокої значимості [1-3]. Деякі ж дослідники включають в модель двигуна взаємну індуктивність фаз, проте не приділяють питанню її кількісного визначення достатньої уваги [4, 5].

На практиці при застосуванні симетричної одиночної комутації фаз індукторної машини токові хвилі фаз перекриваються між собою [3]. Фактично це означає, що за період роботи кожної фази в ній виникають напруги взаємоіндукції від струмів в інших фазах.

Мета дослідження. Встановити закономірність зміни взаємоіндукції для вентильних реактивних двигунів в залежності від поточної конфігурації магнітної системи та визначити вплив взаємоіндукції фаз на електромагнітні процеси в двигуні.

Теоретичні дослідження. Визначення взаємної індуктивності фаз ВІД безпосередньо пов'язане з розрахунком розподілу магнітної індукції при доволі складному поперечному перетині магнітної системи, а тому може бути якісно обґрунтовано лише на основі польового підходу. В даній публікації для дослідження задачі магнітостатики використовується чисельний метод інтегральних рівнянь відносно вектора намагніченості, який детально розглянуто в [6].

Як відомо, взаємна індуктивність між двома котушками визначається впливом струму однієї котушки на потокозчеплення іншої. З

урахуванням принципу взаємності між фазами k та j $M_{kj} = M_{jk}$. Таким чином, достатньо визначити лише вплив однієї фази на іншу в кожній парі досліджуваних фаз. Оскільки конструкція ВІД симетрична, то потрібно визначити взаємоіндукцію між однією будь-якою фазою та іншими фазами машини попарно. Для інших фаз ці залежності будуть аналогічні за урахування кута зміщення фаз.

Для індукторних двигунів розрахунок взаємоіндукції передбачає визначення потокозчеплення у полюсі статора досліджуваної фази при збудженні іншої фази. Таким чином, взаємна індуктивність k -ї та j -ї фаз

$$M_{kj} = \Psi_k / i_j = 2\Phi_k w_j / i_j, \quad (1)$$

де $\Phi_k = \int B_k dl$ – магнітний потік, що проходить через поперечний перетин полюса k -ї фази під дією струму i_j j -ї фази; w_j – кількість витків j -ї фази.

Взаємна індуктивність, як і власна індуктивність фази, не є величиною постійною і залежить від поточного положення магнітної системи, тобто є функцією кута повороту ротора θ . Тому розрахунки слід проводити для різних положень ротора на всьому періоді зміни функції. Очевидно, періоди функцій $M(\theta)$ і $L(\theta)$ однакові, і обумовлені кількістю зубців ротора. Нульове значення θ прийнято для повністю неузгодженого положення ротора відносно статора, тобто коли вісі пази ротора та полюса статора співпадають, а додатний напрям руху ротора – проти годинникової стрілки.

Математичне моделювання. Результати моделювання поля з різними конструкціями магнітної системи, яке було проведено на основі програмного пакету Matlab, показані на рис. 1. Для моделювання обрані найбільш розповсюджені конфігурації двигунів: трифазна машина простої конструкції 6/4 (рис. 1, а), чотирифазна машина конструкції 8/6 (рис. 1, б), трифазна машина з подвоєною кількістю полюсів на фазу конструкції 12/8 (рис. 1, в) та трифазна машина конструкції 12/10 псевдо U -подібного типу (рис. 1, г).

Картини магнітних полів наглядно демонструють, яким чином взаємодіють обмотки суміжних фаз. Вони представлені для кутів положення ротора, що відповідають максимальним значенням взаємної індуктивності.

Результати розрахунку взаємної індуктивності між фазними обмотками статора для розглянутих конструкцій двигунів представлені на рис. 2 у вигляді графічних залежностей $M(\theta)$: а – 6/4; б – 8/6; в – 12/8; г – 12/10.

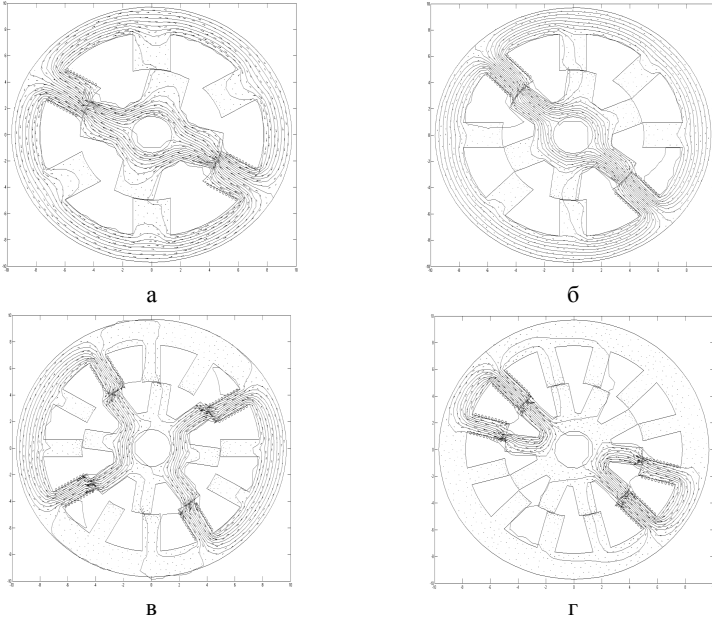


Рис. 1.

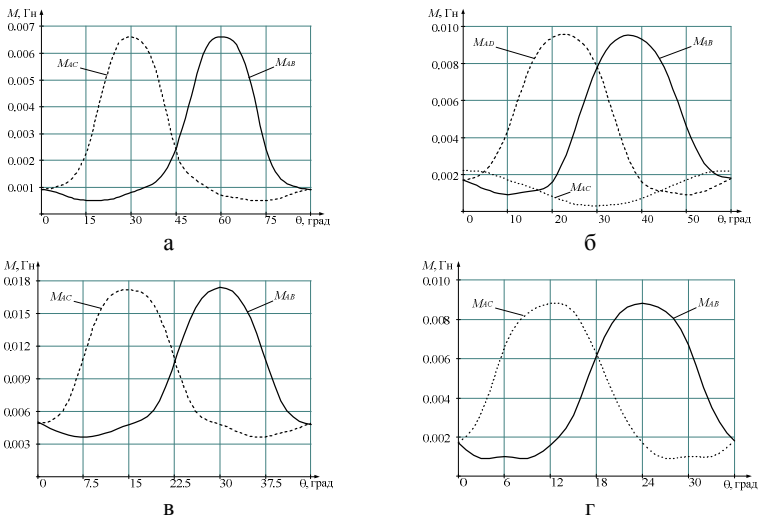


Рис. 2.

Значення взаємної індуктивності для суміжних фаз, отримані в ході обчислювальних експериментів, зведені до табл. 1.

Таблиця 1

Конфігурація магнітної системи Z_1/Z_2	Мінімальне значення взаємної індуктивності M_{\min} , мГн	Максимальне значення взаємної індуктивності M_{\max} , мГн	Середнє значення взаємної індуктивності M_0 , мГн	Амплітуда взаємної індуктивності M_1 , мГн	Співвідношення взаємної та власної індуктивностей M_{\max} / L_{\max}
6/4	0,5	6,6	3,55	3,05	0,06
8/6	0,9	9,4	5,15	4,05	0,10
12/8	3,8	17,4	10,6	6,8	0,12
12/10	0,9	8,8	4,85	3,95	0,056

Із наведених результатів моделювання витікає, що найбільше значення взаємної індуктивності фази мають в момент максимального полюсного перекриття відповідних полюсів статора полюсами ротора. Це означає, що кут зміщення функції взаємної індуктивності відносно функції власної індуктивності фази рівний половині різниці кута між полюсами статора та кута між полюсами ротора:

$$\gamma = \frac{\pi(z_1 - z_2)}{z_1 z_2}, \quad (2)$$

де z_1, z_2 – кількість полюсів статора і ротора відповідно.

Аналіз графіків на рис. 2 свідчить, що найбільше значення взаємної індуктивності мають суміжні фази. При цьому з діаграми фазних струмів при симетричній одиночній комутації видно, що в період дії струму в фазі одночасно з ним може протікати лише струм в попередній фазі, що вмикається, або в наступній фазі, що вмикається [1, 3]. Отже, врахування взаємної індуктивності доцільне лише для суміжних фаз.

Взаємна індуктивність між суміжними фазами може бути представлена періодичною функцією, розкладеною в ряд Фур'є, гармонійний склад якого обумовлений особливостями магнітної системи ВІД

$$M_{kj} = \sum_{i=0}^N M_i \cos \left[ipz_2 \theta - \frac{\pi(2k-1)}{m} + (k-j) \frac{\pi(z_1 - z_2)}{z_1} \right], \quad (3)$$

де k, j – номери фаз, причому $j = k \pm 1$, так як розглядаються суміжні фази; N – кількість гармонік ряду Фур'є; i – номер гармоніки; p – кількість

пар полюсів на фазу; θ – кут положення ротора; m – кількість фаз.

За умови близького до синусоїдного виду залежності $M(\theta)$ можна обмежитись нульовим та першим членами ряду Фур'є, які можуть бути визначені на основі мінімального та максимального значень взаємної індуктивності

$$M_{kj} = M_0 - M_1 \cos \left[pz_2 \theta - \frac{\pi(2k-1)}{m} + (k-j) \frac{\pi(z_1 - z_2)}{z_1} \right], \quad (4)$$

де

$$M_0 = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2}; \quad M_1 = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2}. \quad (5)$$

Одноименне приєднання суміжних фаз до джерела живлення призводить до "послаблення" індуктивності фази завдяки ефекту взаємодукції, так як при цьому котушки фаз знаходяться в неузгодженому з'єднанні одна відносно іншої. З огляду на це можна зробити висновок, що вигідним з позиції врахування взаємодукції є різнойменне з'єднання котушок суміжних фаз, так як при цьому електромагнітний момент, що розвивається фазою, збільшується за рахунок складання магнітних потоків суміжних фаз. Для машин з непарною кількістю фаз, наприклад трифазних, це просто реалізувати, приєднавши до джерела живлення фазні обмотки, по чергово змінюючи полярність. У машин з парною кількістю фаз, таке з'єднання неможливе, при цьому завжди буде як мінімум одна пара котушок, розташованих одна відносно іншої не узгоджено, що вносить асиметрію в роботу машини.

Отже, система класичних рівнянь [4], що описують електромеханічні процеси ВІД, з урахуванням взаємної індуктивності суміжних фаз може бути записана у наступному вигляді:

$$\begin{cases} u_k = Ri_k + L_k(\theta, i_k) \frac{di_k}{dt} + \omega \frac{\partial L_k(\theta, i_k)}{\partial \theta} i_k \pm M_{kj}(\theta, i_j) \frac{di_j}{dt} \pm \omega \frac{\partial M_{kj}(\theta, i_j)}{\partial \theta} i_j \\ M_e = \frac{\partial L_k(\theta, i_k)}{\partial \theta} \cdot \frac{i_k^2}{2} \pm \frac{\partial M_{kj}(\theta, i_j)}{\partial \theta} \cdot \frac{i_j^2}{2} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_e - M_c) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (6)$$

де $k = 1 \dots m$ – номер фази; $j = k \pm 1$ – номери фаз, суміжних з k -ю фазою; u_k, i_k – відповідно напруга та струм k -ї фази; R – активний опір обмотки; M_e – електромагнітний момент двигуна; M_c – статичний мо-

мент навантаження; J – момент інерції; ω – кутова частота обертання ротора. Знак "+" перед останніми двома доданками першого рівняння та останнім доданком другого відповідає узгодженню з'єднанню фаз.

Подяки. Автор статті виражає подяку своєму науковому керівнику доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедри електро-механіки КТУ Толмачову Станіславу Трохимовичу за сприяння у виконанні роботи.

Висновки. Аналіз результатів обчислювальних експериментів свідчить про збільшення значення відносної взаємної індуктивності при збільшенні числа полюсів статора, найменше її значення має машина псевдо U -подібної конструкції.

Врахування взаємної індуктивності при моделюванні ВІД певним чином ускладнює його математичну модель. Враховуючи, що значення взаємної індуктивності складає 5-12% відносно власної індуктивності фази, доцільно враховувати взаємоіндукцію лише на етапі проектування машини та при необхідності детального аналізу її електромагнітних процесів. У переважній більшості інженерних розрахунків наявністю міжфазної взаємоіндукції можна знехтувати.

Список літератури: 1. *Ткачук В.І.* Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Вид-во Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 406 с. 2. *Рышиа В.В., Радимов И.Н., Малеваный О.Е.* Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2002. – № 2. – С. 60-64. 3. *Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А.* Вентильно-индукторные двигатели. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 70 с. 4. *Голландцев Ю.А.* Вентильные индукторно-реактивные двигатели. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ "Электроприбор", 2003. – 148 с. 5. *Польовий Є.В., Садовий О.В., Сохіна Ю.В.* Модель вентильно-індукторного двигуна з врахуванням взаємоіндукції фаз статора // *Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика,* 2009. – С. 285-286. 6. *Толмачев С.Т.* Специальные методы решения задач магнитостатики. – Киев: Вища школа, 1983. – 166 с.

Надійшла до редколегії 13.10.2010