



АНАЛІЗ ВПЛИВУ МАГНІТНИХ СИСТЕМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНИХ ТА СИНХРОННИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ

Досліджено конфігурації магнітних систем вентильно – реактивних двигунів типу SRM і синхронних реактивних двигунів типу Syn RM. Реалізація математичних моделей двигунів проведена в програмному пакеті INFOLYTICA методом скінченних елементів. Проведено аналіз впливу геометрії магнітних систем на величину і характер зміни електромагнітних моментів. Наведено механічні характеристики і масо-габаритні показники двигунів.

К л ю ч о в і с л о в а: вентильно-реактивний двигун, синхронний реактивний двигун, конфігурація магнітних систем, електромагнітний момент, механічні характеристики.

На сьогоднішній день спостерігається інтенсивний розвиток технологій енергозберігаючих електричних машин (ЕМ) з електронним керуванням на базі силових польових транзисторів та мікроконтролерів. Серед регульованих електричних машин останнім часом отримали розповсюдження вентильно-індукторні двигуни з реактивним ротором (ВІД або ВРД), в зарубіжній технічній літературі – Switched Reluctance Motor (SRM), які є простими в конструктивному виконанні, технологічними та надійними і успішно можуть конкурувати з асинхронними і синхронними машинами традиційних конструкцій [2, 4]. Достатньо велику увагу дослідників та розробників привернуто до синхронних реактивних двигунів (СРД) з змінним опором ротора (в зарубіжній технічній літературі – Syn RM) [6]. Фірми АВВ (Швейцарія), KSB (Німеччина), REEL (Італія) виробляють двигуни типу Syn RM для приводу насосів, вентиляторів, компресорів, конвеєрів тощо. Крім цього ВРД застосовують для спеціального виконання, транспорту, авіації, генераторів вітроелектростанцій [2, 6].

Перевагами двигунів є: високі масо-габаритні показники; високі значення коефіцієнта корисної дії (ККД), економія електроенергії завдяки регулюванню частоти їх обертання.

Принцип регулювання частотою обертання двигунів даних типів однаковий: за допомогою системи керування, яка отримує сигнали від датчиків положення ротора, відбувається комутація фаз у відповідності із заданим алгоритмом. При цьому застосовуються одиночна, парна або змішана типи комутацій.

Конструкції ВРД постійно вдосконалюються, при цьому розробники намагаються отримати найбільші одиничні потужності, максимум електромагнітного моменту, високі значення ко-

ефіцієнту корисної дії, знижені пульсації моменту і масо-габаритні показники.

На стадії попереднього проектування ЕМ необхідно враховувати величину і характер розподілу поздовжньої компоненти магнітної індукції в зазорі вздовж полюсного ділення, що безпосередньо впливає на величину електромагнітного моменту та на енергетичні і питомі показники. Оскільки електромагнітні процеси ВРД мають нелінійний характер, аналітичні або аналітико-емпіричні методи, що використовуються при проектуванні класичних ЕМ, не в змозі адекватно описати фізичні процеси в цих двигунах.

Вплив конфігурації магнітних систем ВРД та СРД на їх характеристики можна дослідити із застосуванням комп'ютерного моделювання двигунів з використанням сучасних програмних комплексів, таких як, FEMM, COMCOL, ELCUT, INFOLYTICA, ANSYS MAXWELL на основі методу скінченних елементів, що дозволяє на стадії попереднього проектування знаходити варіанти конструкцій із заданими характеристиками [1, 3, 5].

Метою даної статті є дослідження конфігурацій магнітних систем вентильно-реактивних і синхронних реактивних двигунів та аналіз впливу їх

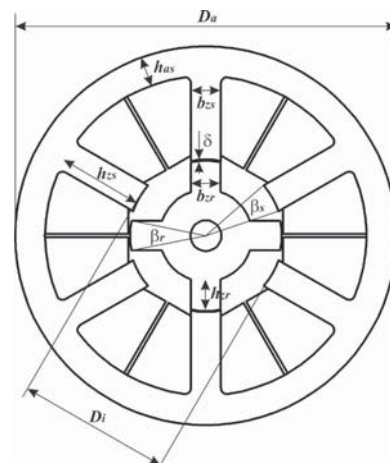


Рис. 1. Конфігурація ВРД та її основні розміри

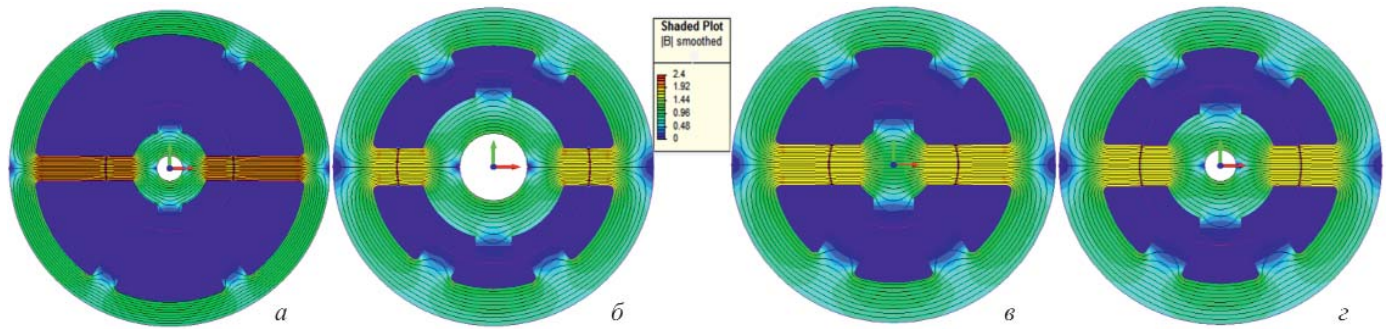


Рис. 2. Картини магнітного поля та розподіл магнітної індукції ВРД

а) варіант 1, $D_i = 60$ мм, $\beta_s = 22,5^\circ$; б) варіант 2, $D_i = 90$ мм, $\beta_s = 22,5^\circ$; в) варіант 3, $D_i = 60$ мм, $\beta_s = 37,5^\circ$; г) варіант 4, $D_i = 75$ мм, $\beta_s = 30^\circ$;

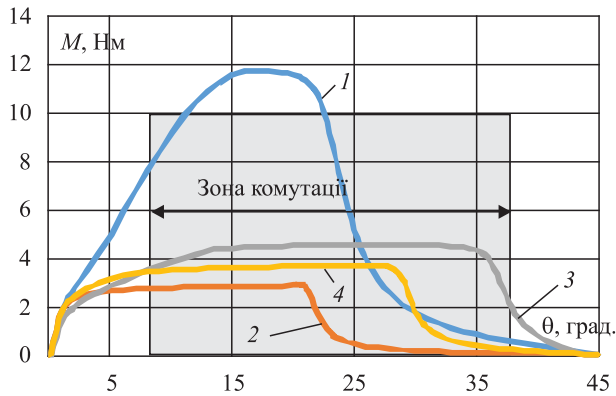


Рис. 3. Залежності $M = f(\theta)$ при зміні D_i і β_s для одиної комутації.

1 – вар. 1, $D_i = 60$ мм, $\beta_s = 22,5^\circ$; 2 – вар. 2, $D_i = 90$ мм, $\beta_s = 22,5^\circ$;
3 – вар. 3, $D_i = 60$ мм, $\beta_s = 37,5^\circ$; 4 – вар. 4, $D_i = 75$ мм, $\beta_s = 30^\circ$;

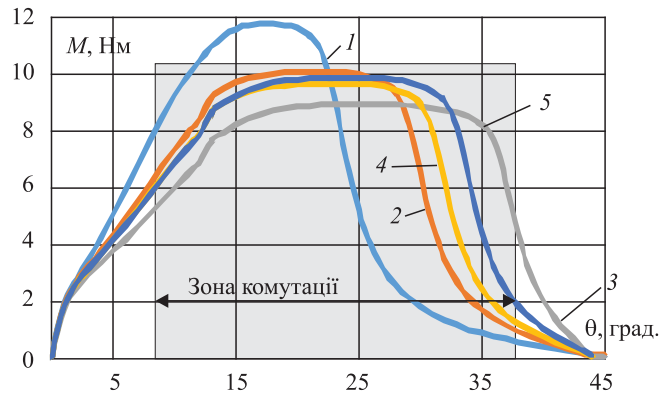


Рис. 4. Залежності $M = f(\theta)$ при зміні β_s і β_r для одиної комутації.

1 – вар. 1, $\beta = 22,5^\circ$; 2 – вар. 1.1, $\beta_s = 30^\circ$; 3 – вар. 1.4, $\beta = 37,5^\circ$;
4 – вар. 1.2, $\beta = 32^\circ$; 5 – вар. 1.3, $\beta = 34^\circ$;

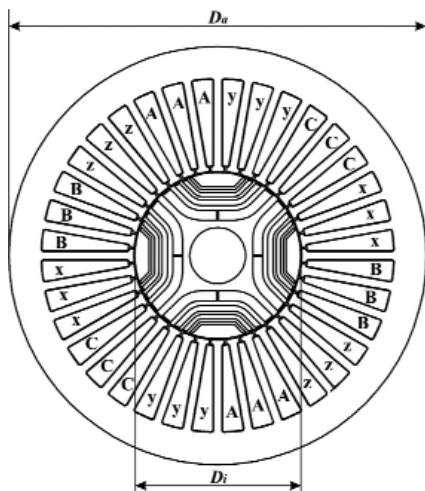


Рис. 5. Конфігурація магнітної системи СРД

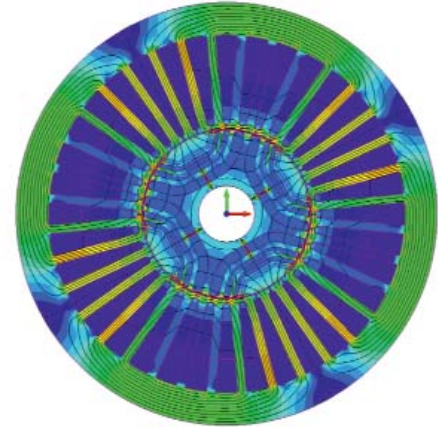


Рис. 6. Картина магнітного поля моделі СРД.

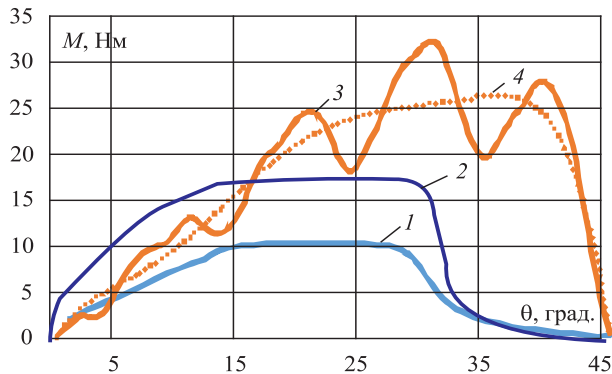


Рис. 7. Залежності $M = f(\theta)$ двигунів ВРД і СРД

1 – ВРД: $D_a = 149$ мм, $D_i = 60$ мм, $\beta = 34^\circ$; 2 – ВРД: $D_a = 187,6$ мм, $D_i = 99$ мм, $\beta = 32^\circ$; 3 – СРД: $D_a = 149$ мм, $D_i = 60$ мм, без скосу зубців;
4 – СРД зі скосом зубців на одне зубцеве ділення

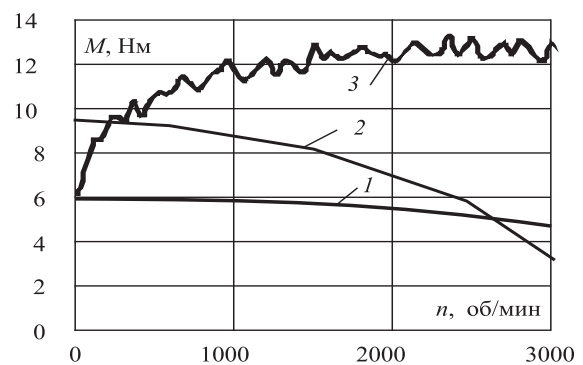


Рис. 8. Механічні характеристики двигунів ВРД і СРД 1

1 – ВРД: $D_a = 149$ мм, $D_i = 60$ мм, $\beta = 34^\circ$; 2 – ВРД: $D_a = 187,6$ мм, $D_i = 99$ мм, $\beta = 32^\circ$; 3 – СРД: $D_a = 149$ мм, $D_i = 60$ мм, без скосу зубців



геометрії на величину і характер зміни електромагнітного моменту та механічні характеристики.

Моделювання конфігурацій магнітних систем двигунів проведено в габаритах асинхронного двигуна (АД) типу АІР90L2 із зовнішнім діаметром статора $D_a = 149$ мм, діаметром валу ротора – 18 мм, довжиною активної частини машини $l_s = 100$ мм, величиною повітряного проміжку $\delta = 0,4$ мм, густиною струму в обмотках $J = 5,0$ А/мм²; коефіцієнтом заповнення паза міддю $k_3 = 0,5$; напрузі живлення 400 В.

Конфігурація ВРД обрана із співвідношенням числа полюсів статора z_s і ротора $z_r = 6/4$, основні розміри якої позначено на Рис. 1. Статор має шість явно-виражених полюсів, на яких розміщено обмотки котушкового типу. Кожна фаза складається з двох послідовно з'єднаних катушок.

На першому етапі для визначення оптимальної конфігурації, що забезпечує при заданих габаритах ЕМ максимум середнього електромагнітного моменту в зоні комутації (30° геометричних градусів), виконано моделювання магнітних систем в магнітостатиці при зміні діаметру розточування статора D_i та кутових величин полюсів статора β_s і ротора β_r .

При розрахунках прийнято наступні допущення: ширина зубця статора дорівнює висоті спинки статора $b_{zs} = h_{as}$; кутові величини полюсів статора та ротора однакові; магнітопроводи статора та ротора виконано зі сталі марки Ст2211; вал ротора – з немагнітного матеріалу з магнітною проникністю $\mu_0 = 1$. Розрахунки магнітного поля та електромагнітного моменту виконано за допомогою методу скінченних елементів в ліцензійному програмному пакеті INFOLYTICA MAGNET 7.6.

На Рис. 2 приведено картини магнітного поля та розподіл магнітної індукції (як фон) у перетині магнітопроводу моделей ВРД. Картини магнітного поля відповідають моменту часу, коли включено одну з фаз двигуна, а ротор орієнтовано по осі d . За результатами моделювання магнітного поля варіантів магнітних систем визначено: спинка статора для всіх моделей ненасичена ($B = 1,4$ Тл), полюси статора та ротора насичені ($B = 1,9$ Тл) лише для варіанту 1.

Залежності електромагнітних моментів від кута повороту ротора $M = f(\theta)$ при одиночній комутації фаз приведено на Рис. 3. В даному випадку датчики положення ротора налаштовано таким чином, що момент включення кожної з фаз відповідає положенню 8°, а момент відключення фази – положенню 38°.

Середні значення електромагнітних моментів M_{cp} наступні: $M_{cp(вар.1)} = 7$ Нм; $M_{cp(вар.2)} = 1,68$ Нм; $M_{cp(вар.3)} = 4,26$ Нм; $M_{cp(вар.4)} = 3$ Нм. Таким чином, найбільше значення M_{cp} отримано для варіанту 1 ($D_i = 60$ мм, $\beta_s = 22,5^\circ$). Слід відмітити, що варіанти 2...4 забезпечують зниження пульсацій електромагнітних моментів, однак при цьому середні їх значення зменшуються в 1,6...4,2 рази.

На другому етапі досліджено магнітні системи з внутрішнім діаметром $D_i = 60$ мм, який відповідає максимальному значенню $M_{cp} = 7$ Нм, при зміні кутових величин полюсів статора та ротора за умови $\beta_s = \beta_r$ для одиночної комутації. Розраховані залежності $M = f(\theta)$ при зміні β_s і β_r приведено на Рис. 4.

В результаті аналізу розрахунків визначено максимальне значення M_{cp} , яке дорівнює 8,25 Нм, що відповідає варіанту 1.3 ($\beta_s = 34^\circ$), в подальшому – базовому. Таким чином, зміною геометричних розмірів ВРД можна збільшити значення M_{cp} , в даному випадку – на 18% в порівнянні з варіантом 1.

Досліджено конструкцію синхронної реактивної машини типу Syn RM, (в подальшому – СРД) з числом пазів на статорі $Z_s = 36$ [3]. Конфігурація магнітної системи приведена на Рис. 5.

Зовнішній і внутрішній діаметри статора, а також довжина активної частини машини відповідають значенням базового варіанту. Ротор СРД має складну конфігурацію, що дозволяє реалізувати чотири полюси зі змінним магнітним опором. Фази статора включено наступним чином: А(+), В(-), С(0). За результатами моделювання магнітного поля та аналізу розподілу магнітної індукції в перетині магнітної системи двигуна (рис. 6) визначено, що спинка статора не насичується, зубці статора насичені частково, суттєвих потоків пазового розсіювання не спостерігається.

Залежність електромагнітного моменту від кута повороту ротора $M = f(\theta)$ розрахована в діапазоні, що дорівнює 45 (геометричним градусам). Використано алгоритм парної комутації фаз: А(+), В(+), С(0); А(0), В(+), С(+); А(+), В(0), С(+) і т. і.

На Рис. 7 приведено залежності електромагнітних моментів від кута повороту ротора досліджених двигунів. Визначено, що середнє значення електромагнітного моменту СРД для парної комутації ($M_{cp} = 18,9$ Нм) більш у 2,3 рази в порівнянні з базовою моделлю ВРД при одиночній комутації.

Недоліком СРД є пульсації електромагнітно-



го моменту, які можуть бути суттєво зменшені шляхом виконання скосу полюсів на роторі або на статорі. На Рис. 7 пунктирними лініями показано залежність $M = f(\theta)$ при виконанні скосу полюсів на роторі на одне зубцеве ділення.

В результаті чисельних досліджень згідно методики пропорційного перерахунку визначено геометрію магнітної системи ВРД із забезпеченням необхідного середнього електромагнітного моменту ($M_{cp} = 12,5$ Нм) з наступними параметрами ($D_a = 186,7$ мм, $D_i = 99$ мм, $l_s = 100$ мм, $\beta_s = \beta_r = 32^\circ$).

Розраховано механічні характеристики двигунів ВРД та СРД при напрузі 400 В та густині струму 5 А/мм², які представлено на Рис. 8.

Проведено розрахунок маси використаних матеріалів для базового ВРД і СРД, які виконано в однакових габаритах ($D_a = 149$ мм, $D_i = 60$ мм). Отримано наступні дані відповідно для ВРД і СРД: загальна маса сталі статора і ротора – 10,68 кг і 12,27 кг; маса міді – 3,02 кг і 4,65 кг. Таким чином, загальна маса сталі і міді ВРД на 13% менше, ніж маса СРД. Для варіанта ВРД ($D_a = 186,7$ мм, $D_i = 99$ мм, $l_s = 100$ мм, $\beta_s = \beta_r = 32^\circ$) загальна маса збільшена на 40% в порівнянні з СРД і дорівнює 17,3 кг.

Висновки.

1. Дослідження геометрії магнітних систем вентильно-реактивних двигунів в габаритах асинхронного двигуна типу АІР90L2 показали, що при зміні діаметру розточування статора та кутових величин полюсів статора і ротора можна отримати характеристики електромагнітного моменту, які забезпечують його максимальне середнє значення, або зменшені пульсації. Визначено геометрію ВРД з максимальним значенням середнього електромагнітного моменту при одиночній

комутації.

2. За результатами моделювання варіантів магнітних систем ВРД при густині струму в обмотках статора $J = 5,0$ А/мм² та аналізу розподілу магнітної індукції у перетині магнітопроводу визначено, що магнітні системи ненасичені, за винятком частини перекриття полюсів статора та ротора ($B = 1,9$ Тл).

3. Встановлено, що синхронний реактивний двигун типу Syn RM(в режимі парної комутації) дозволяє збільшити значення середнього електромагнітного моменту більше, ніж у два рази в порівнянні з базовим ВРД в однакових габаритах (при одиночній комутації) і на 50 % – в порівнянні з варіантом ВРД при збільшених габаритах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бібік О.В. Проектування вентильно-реактивного двигуна зі знизеними пульсаціями електромагнітного моменту / О.В. Бібік, В.В. Гребеніков, М.В. Приймак, Р. Гамалія // Техн. Електродинаміка. – 2014. - № 4. – С. 117 – 119.
2. Бычков М.Г. Вентильно-индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития // Рынок электротехники. – 2007. – №2. – С. 4–14.
3. Гребеніков В.В. Сравнительный анализ вентильных двигателей индукторно-реактивного типа и с постоянными магнитами на роторе // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. № 28. – С. 70–76.
4. Ильинский Н.Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода // Электричество. – 2003. – №3. – С. 2–7.
5. Пуйло Г.В. Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны на электромагнитный момент вентильно-реактивного двигателя / Г.В. Пуйло, А.С. Порайко, И.Н. Радимов, В.В. Рымша // Вестник НУ, "Львовская политехника". Темат выпуск "Электроэнергетические и электромеханические системы". – 2003. – № 485. – С. 112–117.
6. Шумов Ю.Н. Энергосберегающие электрические машины (обзор зарубежных разработок) / Ю.Н. Шумов, А.С. Сафонов // Электричество. – 2015. – № 4. – С. 45–55.

© Бібік О.В., Гребеніков В. В. 2016

