

ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА З БУФЕРОМ ЕНЕРГІЇ

Ткачук В.І., д.т.н., проф., Каша Л.В., м.н.с.

Національний університет "Львівська політехніка"

Україна, 79013, Львів, вул. С.Бандери, 12, НУ "Львівська політехніка", кафедра "Електричні машини і апарати", тел. (032) 258-21-60, E-mail: tkachuk@polynet.lviv.ua

Наведено конструктивні схеми електромеханічного перетворювача та принципову схему транзисторного комутатора вентильного двигуна з послідовним ємнісним накопичувачем енергії. Представлено результати дослідження величини пульсацій електромагнітного моменту цього вентильного двигуна та запропоновано шляхи зменшення рівня пульсацій у вентильних реактивних двигунах.

Приведены конструктивные схемы электромеханического преобразователя и принципиальная схема транзисторного коммутатора вентильного двигателя с последовательным емкостным накопителем энергии. Представлены результаты исследования величины пульсаций электромагнитного момента этого вентильного двигателя и предложены пути уменьшения уровня пульсаций в вентильных реактивных двигателях.

ВСТУП

Інтенсивні наукові дослідження в багатьох країнах світу свідчать, що вентильні реактивні двигуни (ВРД), відомі в англійській аббревіатурі, як SRM (switched reluctance motor), успішно прокладають собі шлях в застосуванні в керованих електроприводах постійного струму. Їхня проста конструкція, завдяки відсутності постійних магнітів, обмоток на роторі та щітково-колекторного вузла, а також висока ефективність забезпечує електроприводам на базі ВРД конкурентоспроможність серед інших типів приводів.

Для використання у вентильному реактивному двигуні з усього різноманіття індукторних електромеханічних перетворювачів найбільш доцільними є конструкції з явно вираженими полюсами на статорі, в яких можна забезпечити магнітну ізоляцію окремих секцій якорної обмотки. Серед них варто відзначити "класичну" конструкцію (рис. 1), з Т-подібними елементами, з С-подібними елементами та з U-подібними елементами (рис. 2) [1].

Під терміном "вентильний реактивний двигун" розумітимемо електротехнічний комплекс в складі електромеханічного перетворювача (ЕМП), давача положення ротора (ДПР), електронного комутатора (ЕК) та блоку керування (БК).

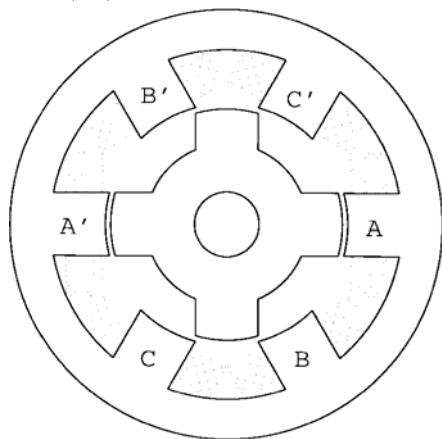


Рис. 1. Конструкція трисекційного електромеханічного перетворювача ВРД структури 6/4

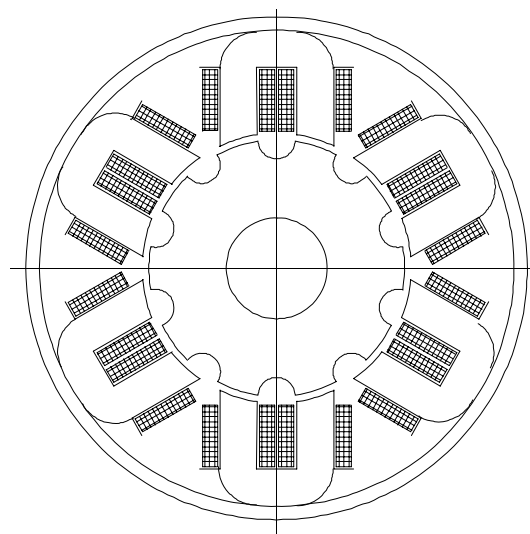


Рис. 2. U-подібна конструктивна схема активної частини ЕМП ВД

Широке розповсюдження вентильних реактивних двигунів стримується їх невисокими енергетичними показниками, що зумовлено необхідністю розсіювання запасеної в електромагнітному полі енергії під час комутації струму в секціях транзисторними ключами з метою захисту їх від перенапруг. В [2, 3] запропоновано схемні рішення транзисторних інверторів ВРД, які дозволяють повторно використовувати цю енергію для форсованого вмикання струму в секціях, захищаючи при цьому силові транзистори від перенапруг. На рис. 3 наведено, як приклад, одна із запропонованих 5-и таких схем.

На рис. 3 наведена схема транзисторного комутатора з послідовним ємнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ). Транзистори VT11, VT21, VT31 - силові ключі ЕК, керовані сигналами ДПР, кут активної зони сигнального сектора якого більший, ніж $2 \cdot \pi / m$ і менший, ніж $4 \cdot \pi / m$ електричних радіан (m - кількість секцій обмотки якоря ВД). При закриванні, наприклад, ключа VT11 струм відповідної секції під дією електрорушійної сили самоіндукції буде протікати по

колу: діод VD12, конденсатор C11, діод VD11, заряджаючи при цьому конденсатор C11. Енергія магнітного поля передається в електричне поле конденсатора. Одночасно здійснюється захист силового ключа VT11 від перенапруги. Причому, струм секції практично миттєво переходить колою заряду конденсатора, що значно зменшує динамічні втрати на перемикання транзисторних силових ключів.

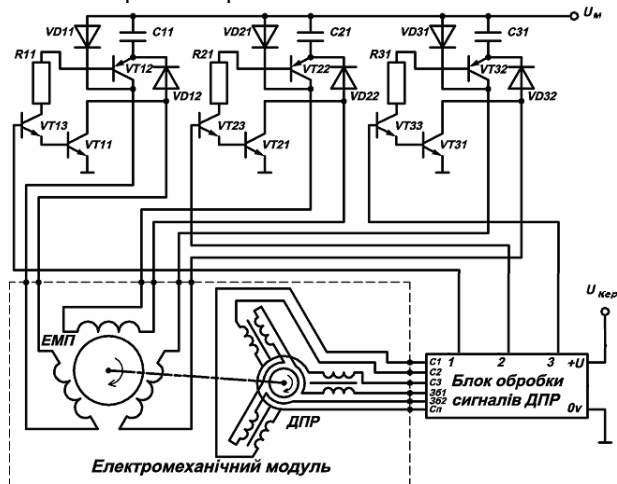


Рис. 3. Транзисторний комутатор ВД з послідовним ємнісним накопичувачем

При наступному вмиканні цієї ж секції одночасно з силовим ключем VT11 вмикається і транзистор VT12. До секції прикладаються напруга джерела живлення U_M і послідовно згідно з нею напруга конденсатора C11, в результаті чого струм у секції наростає форсовано. Діод VD11 при цьому закритий прикладеною до нього в зворотному напрямку напругою конденсатора. Конденсатор розряджається, віддаючи енергію, яка була накоплена в електричному полі, у секцію. Коли напруга на конденсаторі зменшиться до нуля, відкриється діод VD11 і секція буде отримувати живлення від джерела [2].

При обертанні ротора процес циклічно повторюється.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У вентильних реактивних двигунах з буферами енергії, крім факторів впливу на характеристики, які є і в інших типах електричних машин, присутні і характерні тільки для них. Це такі параметри й елементи як початковий кут вмикання секції, інтервал її комутації, величина ємності накопичувального конденсатора тощо. Дослідження впливу цих та інших факторів на величину пульсацій електромагнітного моменту, частоту обертання, використання активних матеріалів, енергетичні та якісні показники є актуальною задачею.

Метою даної роботи є демонстрація можливостей розроблених автоматизованих підсистем проектування і дослідження [4 - 6] як інструментів для усебічних досліджень ВРД, оптимізації проектування ЕМП та вибору необхідних елементів комутатора для забезпечення конкретного технічного завдання на проектування.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Для побудови математичної моделі досліджуваного вентильного двигуна прийнято допущення, які не надто спотворюючи реальні фізичні процеси дозволили отримати прості математичні залежності, що адекватно відображають електромеханічне перетворення в ньому енергії: інвертор сполучений з джерелом напруги, внутрішній опір якого дорівнює нулю; магнітні зв'язки між секціями відсутні; силові ключі комутатора - безінерційні електронні ключі; діоди представлено математичною моделлю; магнітна характеристика магнітопроводу магнітоізованої секції представлена аналогічним виразом; параметри обмотки статора зосереджені, втрати в сталі представлені струмами Фуко [4, 5].

Правомірність цих допущень для ВРД багаторазово доведена співставленням результатів експериментальних і математичних досліджень ВРД в діапазоні потужностей від 30 Вт і до 5 кВт.

Згідно з прийнятими допущеннями, кожен із секцій m -секційного ВД можемо в електричному відношенні розглядати окремо, а зв'язувати їх тільки через створюваний ними електромагнітний момент, який діє на ротор.

Описана математична модель послужила основою для створення автоматизованої системи дослідження керованих електроприводів на базі явнопольних вентильних реактивних двигунів з послідовними ємнісними буферами енергії [4], яка дозволяє здійснювати комплексні дослідження характеристик та поведінки ВРД в складі електромеханотронних систем за різноманітних режимів роботи.

Система містить й надає користувачу в інтерактивному режимі необхідний довідниковий матеріал, створює відповідні файли результатів розрахунку, що дозволяє використовувати відповідні програмні пакети для візуалізації графічних залежностей з метою полегшення аналізу. Система дозволяє досліджувати і регулювальні властивості електроприводу, розраховуючи за цього миттєві значення всіх важливих координат.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ

Пульсації електромагнітного моменту двигуна безпосередньо впливають на стабільність його обертання. Дослідження нерівномірності обертання вентильних двигунів має важливе практичне значення у зв'язку з широким їх застосуванням в приводах, до яких виставляються жорсткі вимоги до стабільності частоти обертання. Це можуть бути пристрої з стрічкотяжними механізмами (звукозапис й звуковідтворення, реєстратори тощо). Коливання миттєвої швидкості відбивається на якості вихідних характеристик апаратури.

На величину пульсацій електромагнітного моменту ВРД впливає багато факторів. Це, перш за все, особливість перебігу електромагнітних процесів, яка зумовлена дискретною зміною стану напівпровідникових елементів комутатора, кількість секцій якірної

обмотки, значення кута вмикання β й інтервалу комутації γ секції, співвідношення й конфігурація геометричних розмірів зубцевої зони ЕМП, спосіб керування підживлювальними ключами комутатора, величина ємності нагромаджувального конденсатора. Всі ці фактори впливають на пульсації моменту з періодом, який дорівнює міжкомутаційному періоду. Крім того, ще існують фактори, які зумовлюють так звані оборотні пульсації моменту. Це еліптичність розточки статора й ротора, технологічні похибки при виготовленні давача положення ротора, точність установки давача положення ротора тощо.

Широкий набір факторів, які впливають на величину пульсацій електромагнітного моменту ВРД, зумовлює широке коло задач дослідження.

При оцінці пульсацій електромагнітного моменту одним із найважливіших показників є максимальна нестабільність в часі, яка характеризує зміну миттєвого значення моменту досліджуваного двигуна відносно його середнього значення:

$$\Delta M = \frac{|M - M_{\text{СЕР}}|_{\text{max}}}{M_{\text{СЕР}}} \quad (1)$$

Вплив кількості секцій на нестабільність моменту. На величину пульсацій моменту ВРД найбільш впливає кількість секцій обмотки статора. В таблиці 1 наведено результати розрахунку нестабільності електромагнітного моменту й частоти обертання для вентильних реактивних двигунів з послідовними буферами енергії, які спроектовані на однакові номінальні значення основних параметрів, тільки з різною кількістю секцій.

Таблиця 1

Дослідження пульсацій моменту й частоти обертання

К-сть секцій	Z_r	γ , ел.град	ΔM	n , об/хв	$\Delta \nu$
3	10	145	0.819	700	7.2E-3
4	14	145	0.682	690	6.4E-3
5	18	145	0.206	675	0.9E-3
6	22	145	0.142	650	0.6E-3

Наведені в таблиці дані підтверджують тезу про те, що кількість секцій обмотки статора суттєво впливає на нестабільність електромагнітного моменту. Пульсації частоти обертання в значній мірі залежать від моменту інерції обертових частин двигуна й приводного механізму і тому при даних значеннях швидкості обертання є незначними.

На рис. 4 та 5 наведено графічне представлення розрахункових значень електромагнітних моментів та струмів секцій для двох крайніх значень кількості секцій - 3 і 6.

Результати досліджень стосуються вентильного двигуна, електромеханічний перетворювач якого має U-подібну конструкцію і розрахований на номінальний момент 2 Нм, частоту обертання 750 об/хв, за напруги живлення 30 В та моменту навантаження на валі 1,5 Нм. Параметри комутації: а) $\beta=10$ ел. град., $\gamma=150$ ел. град. $C=20$ мкФ; б) $\beta=0$ ел. град., $\gamma=145$ ел. град. $C=100$ мкФ; в) $\beta=0$ ел. град., $\gamma=120$ ел. град. $C=100$ мкФ.

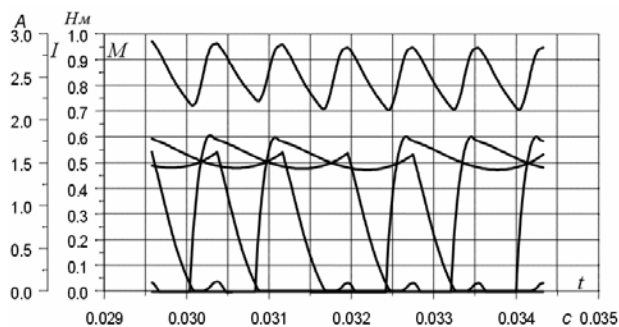


Рис. 4. Електромагнітний момент та струми 5-ти секцій 6-тисекційного ВРД з послідовним буфером енергії

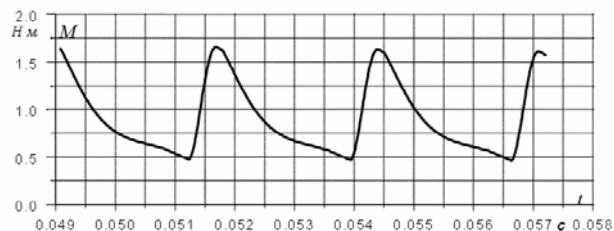


Рис. 5. Електромагнітний момент трисекційного ВРД з послідовним буфером енергії

Зі збільшенням кількості секцій обмотки якоря не тільки зменшуються пульсації електромагнітного моменту за амплітудою, а й зростає їх частота, а значить, полегшується задача згладжування пульсацій частоти обертання.

Вплив кута вмикання β на нестабільність моменту. Впливати на величину пульсацій електромагнітного моменту вентильного реактивного двигуна можна і за допомогою зміни кута вмикання секцій. Діапазон його зміни залежить від величини інтервалу комутації секції та від того, чи призначений двигун для реверсивного режиму роботи.

На рис. 6 та рис. 7 представлено результати розрахунків електромагнітних моментів для трисекційного ВРД з послідовними буферами енергії в кожній секції зі сталим значенням інтервалу комутації й різними значеннями кута вмикання.

Результати розрахунків показують, що величина кута вмикання, хоч не в такій мірі як кількість секцій, але все таки впливає на пульсації електромагнітного моменту: його збільшення приводить до збільшення амплітуди пульсацій моменту.

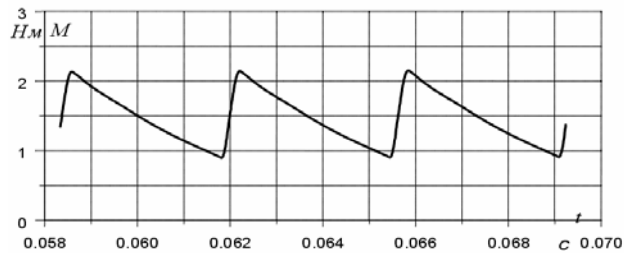


Рис. 6. Електромагнітний момент ВРД ($\beta=10$ ел. град.; $\gamma=125$ ел. град.)

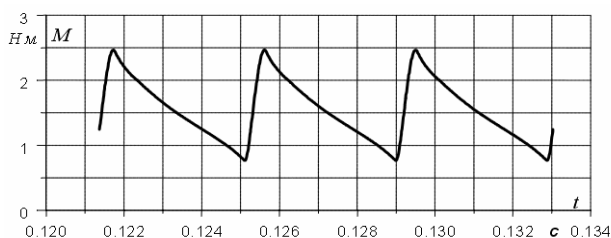
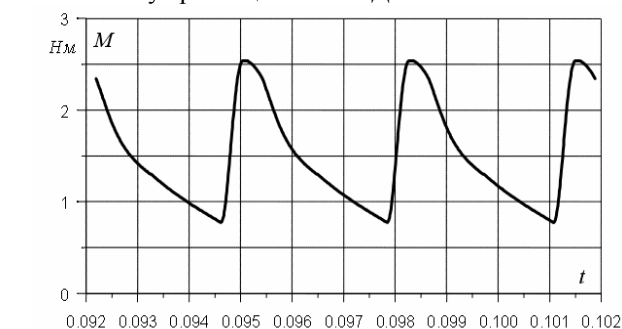
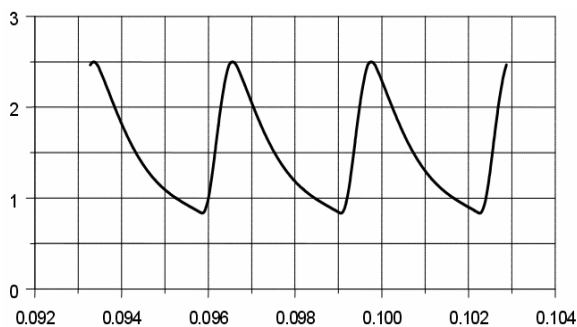


Рис. 7. Електромагнітний момент ВРД ($\beta=35$ ел. град.; $\gamma=125$ ел. град.)

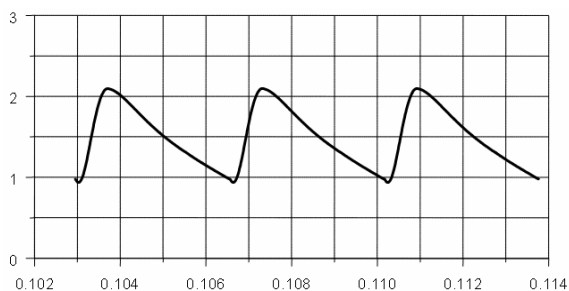
Вплив інтервалу комутації на пульсації моменту. На рис. 8 наведено ілюстрацію алгоритму поступового зменшення рівня пульсацій електромагнітного моменту трисекційного ВРД.



а)



б)



в)

Рис. 8. Зменшення рівня пульсацій електромагнітного моменту ВРД з послідовним буфером енергії за допомогою вибору параметрів комутації

Форсування вмикання струму на початку інтервалу комутації зумовлене способом керування підживлювальними ключами і є причиною швидкого наростання електромагнітного моменту в цей час й великого рівня його пульсації. У ВРД з послідовним буфером енергії з малою кількістю секцій якірної обмотки ліквідувати повністю пульсації, які викликані форсованим наростанням струму вибором відповідних значень параметрів комутації та величини ємності накопичувального конденсатора не вдається. Проте змен-

шити ці пульсації можна, вибираючи кут вмикання, інтервал комутації та величину ємності конденсатора й розраховуючи в підсистемі дослідження квазіусталений режим роботи для конкретного ВРД.

ВИСНОВКИ

Розроблена математична модель явнополюсних вентильних реактивних двигунів з послідовними ємнісними буферами енергії має високу ступінь адекватності і дозволяє здійснювати комплексні дослідження характеристик та поведінки ВРД у складі електро-механотронних систем за різноманітних режимів роботи.

Порівняння наведених графічних представлень розрахунків електромагнітного моменту показує, що варіацією трьох незалежних параметрів (β , γ і C) можна суттєво зменшити пульсації електромагнітного моменту навіть для ВРД з малою кількістю секцій (від 0,7 у варіанті а, до 0,4 у варіанті в).

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Ткачук В.І. Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 440 с.
- [2] Ткачук В.І. Ємнісний накопичувач енергії у вентильно-реактивному двигуні // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник ДУ "Львівська політехніка". - 1997. - № 334. - С. 125 - 131.
- [3] Ткачук В.І. Вентильний реактивний двигун та його математична модель // Теоретична електротехніка. - 1998. - № 54. - С. 121 - 127.
- [4] Ткачук В. Підсистема автоматизованого дослідження вентильних реактивних двигунів // Технічна електродинаміка. - 1998. - С. 180 - 187.
- [5] Tkachuk V.I., Kasha L.V., Greschuk O.V. Mathematical Modeling of SRM with Buffer of Energy // Матеріали 13-го міжнародного симпозіуму з теоретичної електротехніки (ISTET'05), Львів, Україна. 2005. - Р. 308-311.
- [6] Ткачук В.І., Каша Л.В., Грещук О.В. Керований вентильний реактивний двигун з паралельним буфером енергії // Науковий журнал "Технічна електродинаміка" Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність 2004", Ч.3, 2004. – С. 37-40.

Надійшла 30.08.2007