

## СИЛОВИЙ ІНВЕРТОР ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА З ПАРАЛЕЛЬНИМ БУФЕРОМ ЕНЕРГІЇ ТА СПІЛЬНИМ КОЛОМ ФОРСУВАННЯ

*Наведено математичну модель вентильного реактивного двигуна постійного струму з паралельним буфером енергії, яка враховує дискретну зміну схеми транзисторного комутатора, насичення сталі магнітопровода, втрати в міді, в комутаторі, в сталі. Представлені результати розрахунку перехідного та квазіусталеного режимів роботи електроприводу на базі цього вентильного двигуна.*

*Представлена математическая модель вентильного реактивного двигателя с параллельным накопителем энергии, которая учитывает дискретное изменение схемы транзисторного коммутатора, насыщение стали магнитопровода, потери в меди и стали, потери в коммутаторе в целом. Представлены результаты расчета переходного и квазистационарного режимов работы электроприводов на базе таких двигателей.*

### ВСТУП

Невисокі енергетичні показники вентильних реактивних двигунів служать стримуючим фактором їх широкого застосування. Значення енергетичних показників обумовлюються необхідністю розсіювання запасеної в електромагнітному полі енергії при комутації струму в секціях транзисторними ключами з метою захисту їх від перенапруг. В [1, 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.

Для покращення використання електричної машини збільшують електромагнітні навантаження та активну зону сигнального сектора давача положення ротора (ДПР). При цьому в різні моменти часу до джерела живлення під'єднується різна кількість секцій, що зумовлює значні пульсації струму живлення вентильного двигуна, проте це є небажаним при використанні ВД в малопотужних регульованих електроприводах, які живляться від джерел обмеженої потужності.

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ

#### В ТРАНЗИСТОРНОМУ КОМУТАТОРІ З ПАРАЛЕЛЬНИМ БУФЕРОМ ЕНЕРГІЇ

Поліпшити енергетичні показники й зменшити пульсації струму джерела живлення ВД з пасивним ротором дозволяє однопівперіодний комутатор з паралельним під'єднанням нагромаджувального конденсатора [1]. На рис. 1 наведено принципову електричну схему вентильного реактивного двигуна з паралельним ємнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ).

Аналогічно можна підвищити надійність і ВД з паралельним ЄНЕ, замінивши окремі транзисторні ключі і діоди підживлення секцій спільним ключем і діодом. Схема перетворюється до вигляду, який наведений на рис. 2. В цьому комутаторі керування підживлювальним транзисторним ключем VT4 здійснюється, як і в попередньому випадку, сигналом схеми виявлення співпадіння сигналів суміжних каналів ДПР.

Заряд конденсатора тут відбувається так само, як і у ВД з послідовним ЄНЕ: через діоди VD1-VD3 і діод VD4. Відбувається форсоване спадання струму в

секції. Конденсатор заряджається до напруги, яка більша від напруги джерела живлення.

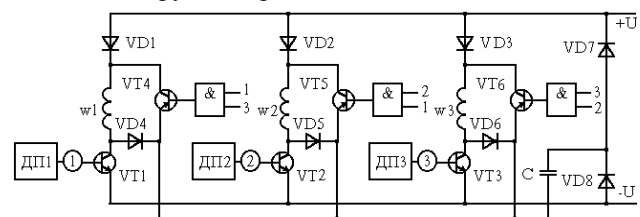


Рис. 1. Транзисторний комутатор з паралельним ЄНЕ

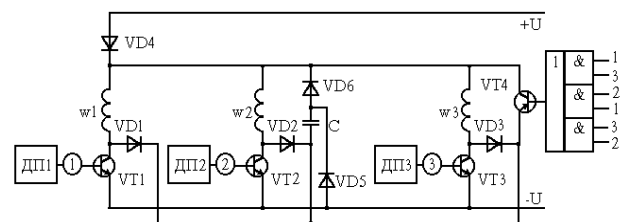


Рис. 2. ВРД з паралельним буфером й спільним колом форсування

Успішне вирішення задач аналізу та синтезу машинно-вентильних систем, а також створення досконалих схем і конструкцій в значній мірі залежить від наявності адекватних математичних моделей електромеханічних процесів в таких системах. Тому удосконалення існуючих і розроблення нових математичних моделей відомих й новостворюваних вентильних двигунів з пасивними роторами є актуальним завданням.

Для побудови математичної моделі цього вентильного двигуна приймемо допущення, які не надто спотворюючи реальні фізичні процеси дозволять 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, для яких можна прийняти, що, по-перше, перехідні процеси, а значить, і комутація секцій електромеханічного перетворювача (ЕМП) ВД відбуваються практично миттєво; по-друге, зворотній опір закритого ключа дорівнює безмежності; діоди в провідному стані представлені

математичною моделлю діода (вольт-амперну характеристику якого можна апроксимувати виразом

$$i_{\partial} = I_o(e^{b \cdot \Delta U_{\partial}} - 1),$$

на основі якого спадок напруги на діоді можна записати як:

$$\Delta U_{\partial} = \ln \frac{i_{\partial} + I_o}{I_o} / b,$$

де  $I_o$ ,  $b$  – зворотній струм діода і коефіцієнт температурного потенціалу, в закритому стані їх опір дорівнює безмежності.

Магнітна характеристика магнітопроводу магнітоізольованої секції представлена виразом залежності від струму і та кута положення  $\theta$  [2]; параметри обмотки статора зосереджені.

Змінний магнітний потік, замикаючись по сталевому осерддю, наводить в ньому електрорушійну силу, яка є причиною струмів Фуко в сталі, які зумовлюють втрати в ній. Перетин магнітопроводу можна розглядати як такий, що складається з елементарних замкнених контурів, які утворюють короткозамкнені витки, що пронизуються змінним магнітним потоком. Представимо їх в заступній схемі секції ВД – у вигляді гілки  $L_{\sigma}$  і  $R_s$ , яка під'єднана паралельно до гілки намагнічення. Опір сталі струмам Фуко з достатньою для інженерної практики точністю можна визначити за виразом

$$R_s = \frac{E^2}{\Delta P_s},$$

де  $E = 4.44 \cdot f \cdot w_z \cdot B \cdot s$ ,  $\Delta P = P_0 \cdot \gamma_s \cdot s \cdot l_m \cdot B^2 \cdot (f/f_0)^2$ , звідки отримуємо вираз для обчислення  $R_s$  однієї секції:

$$R_s = 4,9 \cdot 10^4 \cdot \frac{w_z^2 \cdot S \cdot q}{P_0 \cdot \gamma_s \cdot l_m},$$

де  $p_0$ ,  $\gamma_s$ ,  $l_m$ ,  $w_z$ ,  $q$  – питомі втрати в сталі, густина матеріалу магнітопроводу, довжина магнітної силової лінії, кількість витків обмотки на одному зубці, кількість зубців статора на одну секцію відповідно.

Індуктивність розсіяння  $L_{\sigma}$  контурів струмів Фуко є незначною і її величиною можна було б знехтувати. Однак для забезпечення стійкості розв'язку диференціальних рівнянь чисельними методами пропонуємо значення  $L_{\sigma}$  приймати наступним

$$L_{\sigma} \cong \frac{\Delta t}{12} \cdot R_s,$$

де  $\Delta t$  – крок інтегрування диференціальних рівнянь.

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.

Відповідно до алгоритму роботи ВРД й прийнятих допущень структура схеми під'єднання секції і рівняння напруг дискретно змінюватимуться при зміні кута  $\theta$  [4]. Для узагальнення системи диференціальних рівнянь відносно роботи транзисторних ключів введемо формальні коефіцієнти  $K_1$  та  $K_2$ .

Моделювання силових транзисторних ключів здійсню-

єно за допущення, що перехідні процеси їх вмикання і вимикання відбуваються миттєво, опір закритого ключа дорівнює безмежності, вольт-амперна характеристика насиченого ключа описується виразом (1)

$$\Delta U_T = U_{KE} = U_{KE.0} + R_{KE.нас} \cdot i, \quad (1)$$

де  $U_{KE.0}$ ,  $R_{KE.нас}$  визначають з паспорта на транзистор.

Стан транзисторних ключів електронного комутатора (ЕК) зумовлений взаємним положенням ротора й статора, тобто вони керуються сигналами давача положення ротора. Покладемо у відповідність стану цих ключів формальні коефіцієнти  $K_j$ , які набувають значення "1" – якщо ключ відкритий, і "0" – якщо ключ закритий;  $j$  – номер ключа.

На рис. 3 наведено приклад діаграми роботи ключів ЕК трифазного ВД з паралельним ЄНЕ.

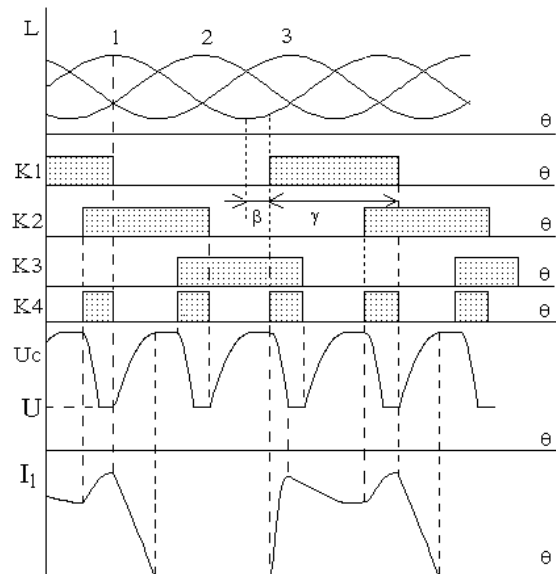


Рис. 3. Індуктивності секцій, діаграма роботи транзисторних ключів, напруга на конденсаторі та струм секції ВРД з паралельним ЄНЕ й спільним колом форсування

Значення формальних коефіцієнтів  $K_j$  залежать від положення ротора й обчислюють згідно наступної перемикальної функції (2)

$$K_j = 1, \text{ якщо } \begin{cases} \theta + 2 \cdot (N_j - 1) \cdot \pi + (j - 1) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{m} < \theta \leq \theta + 2 \cdot (N_j - 1) \cdot \pi + (j - 1) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{m} + \gamma \end{cases} \quad (2)$$

$K_j = 0$  для всіх інших значень,

де  $N_j = \frac{\theta + \pi + (j - 1) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{m}}{2 \cdot \pi} + 1$  – номер періоду для відповідної секції, якщо  $u_c = 0$ , то і  $K_2 = 0$ .

Відповідно до принципу роботи двигуна, керувати ключами VT4-VT6 можна за будь-яким законом. Важливо лише, щоб в момент відключення струму в будь-якій з секцій вони були закриті. Одним з найпростіших способів організації керування підживлювальними ключами є спосіб, коли сигнали керування формуються шляхом логічного перемноження сигналів суміжних каналів давача положення ротора (рис. 2). В

$m$ -секційному двигуні, на відміну від трисекційного, перемножуються сигнали не суміжних каналів, а вибір пари каналів залежить від кількості секцій двигуна й величини інтервалу комутації  $\gamma$

$$K_{j+m} = K_j \cdot K_i, \quad (3)$$

де  $i = m - l + j$  якщо  $2 \cdot (l + 1) \cdot \pi / m \geq \gamma \geq 2 \cdot l \cdot \pi / m$ ,  $l = 1, 2, 3, 4$ ; причому  $i = i - m$  якщо  $i > m$

$$K_{m+1} = \sum_{j=1}^m K_j \cdot K_i.$$

Враховуючи вищенаведене, нелінійну систему диференціальних рівнянь (н.с.д.р.), яка описує електромеханічні процеси у ВРД з паралельним ємнісним буфером, можна представити у вигляді (4).

Для розв'язку н.с.д.р. застосований метод Рунге-Кутта четвертого порядку зі сталим кроком інтегрування.

$$\begin{cases} \frac{di_j}{dt} = \left[ u_j + R \cdot i_j + \frac{A_j}{L_\sigma} \cdot (u_j - R \cdot i_j + R_s \cdot i_{sj}) - B_j \cdot \omega \right] / A_j; \\ \frac{di_{sj}}{dt} = -(R_s \cdot i_{sj} + u_j - R \cdot i_j) / L_\sigma; \\ \frac{du_{cj}}{dt} = (1 - K_j - K_{j+m}) \cdot \frac{i_j}{C}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left[ \frac{z_r \cdot (i_j + i_{sj}) \cdot \cos \theta_{pj} \cdot \psi_y \times}{2} \left( 1 - e^{-a \cdot (i_j + i_{sj}) \cdot \sin \theta_{pj}} - \frac{\psi_{lr} \cdot (i_j + i_{sj})}{2 \cdot \psi_y} \right) \right] - M_c \right\} \cdot \frac{z_r}{J}; \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega; \end{cases} \quad (4)$$

де  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $J$  – момент інерції ротора;  $M_c$  – момент опору навантаження;

$$u_j = (U + \Delta U_D) \cdot (K_j - K_{j+m}) + u_c \cdot (K_j + K_{j+m} - 1) - \Delta U_T \cdot (K_j + K_{j+m}) - \Delta U_D \cdot (3 - K_j - K_{j+m});$$

$$A_j = \psi_{10} - \psi_{lr} \cdot \sin \theta_{pj} + \psi_y \cdot a \cdot \sin^2 \theta_{pj} \cdot e^{-a \cdot (i_j + i_{sj}) \cdot \sin \theta_{pj}};$$

$$B_j = \frac{\cos \theta_{pj}}{2} \cdot \left[ \psi_y - \psi_{lr} \cdot (i_j + i_{sj}) - \psi_y \cdot e^{-a \cdot (i_j + i_{sj}) \cdot \sin \theta_{pj}} \cdot (1 - a \cdot (i_j + i_{sj}) \cdot \sin \theta_{pj}) \right];$$

$$\theta_{pj} = \frac{\theta}{2} - (j-1) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{m}.$$

Оскільки кут  $\theta$ , струми секцій  $i_j$  і напруга на накопичувальному конденсаторі  $u_c$  є функціями часу  $t$ , то при інтегруванні н.с.д.р. виникає необхідність застосування ітераційних методів для точного визначення моментів вмикання і вимикання силових транзисторних ключів, моментів, коли струми секцій досягають значення нуля, а також моментів, коли напруга на конденсаторі досягають значення напруги джерела живлення. Однак при використанні методів інтегрування вищих порядків точне попадання в момент комутації не є простим. Тому частіше всього задовольняються приблизним попаданням в момент комутації, користуючись ітераційними методами і задавшись деякою допустимою похибкою. Такий вихід з поло-

ження має два недоліки. По-перше, нема математично обґрунтованого критерію для визначення допустимої похибки попадання в момент комутації  $i$ , по-друге, навіть для наближеного визначення моменту комутації необхідне дроблення кроку.

Найбільш природне вирішення проблеми відшукання моментів комутації досягається шляхом застосування методу інвертування н.с.д.р. [5]. Суть цього методу стосовно до даної задачі полягає в тому, що в околі вмикання чи вимикання котрогось із силових ключів ЕК, коли на наступному кроці інтегрування за часом  $t$  його стан зміниться (був закритий і відкриється або навпаки), незалежно змінною приймають кут  $\theta$ .

На рис. 4-5 наведено графіки квазіусталених значень струмів секцій та напруги на конденсаторі для трисекційного вентилярного реактивного двигуна з паралельним ємнісним буфером енергії.

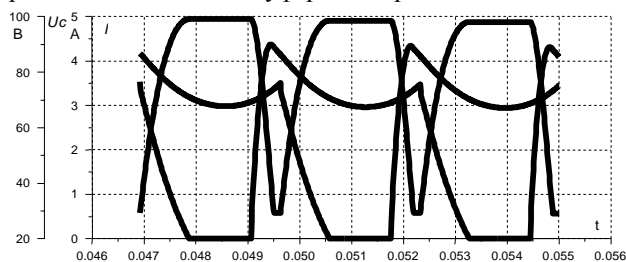


Рис. 4. Квазіусталені розрахункові значення струмів секцій та напруги на конденсаторі ВРД з паралельним ємнісним накопичувачем

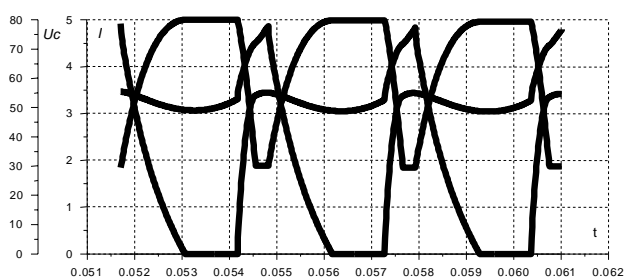


Рис. 5. Квазіусталені розрахункові значення струмів секцій та напруги на конденсаторі трисекційного ВРД з паралельним буфером енергії й спільним підживлювальним ключем

Приклад розрахунку перехідного процесу пуску трисекційного вентилярного реактивного двигуна з паралельним буфером енергії (струм однієї з секцій, електромагнітний момент, частота обертання) наведено на рис. 6-7.

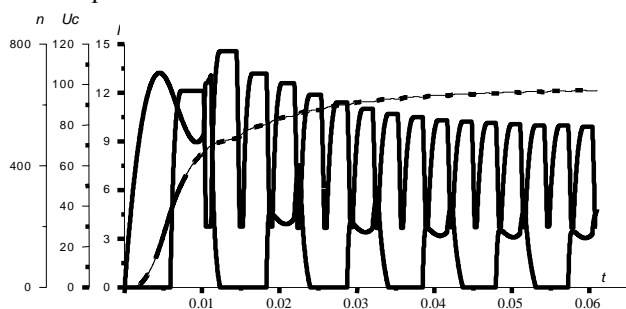


Рис. 6. Результати розрахунку пуску ВРД з паралельним ємнісним буфером енергії (струм однієї секції, напруга на конденсаторі та частота обертання)

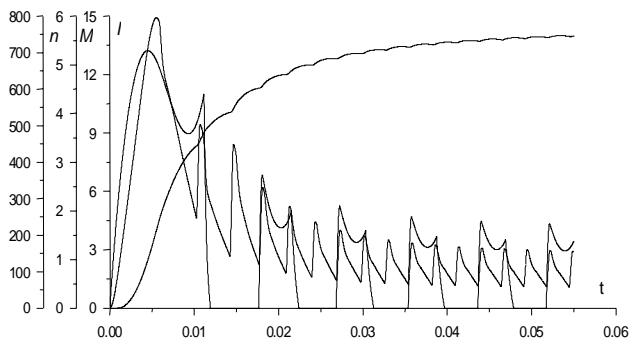


Рис. 7. Розрахункові значення струму однієї секції, електромагнітного моменту та частоти обертання трисекційного ВРД з паралельним буфером енергії під час його пуску

### ВИСНОВКИ

Порівняння результатів розрахунків з дослідними осцилограмами, а також порівняння середніх значень моменту, частоти обертання і складових втрат для макетних взірців ВРД з номінальними моментами до 20 Нм показують, що розходження не перевищують 5 %, що свідчить про адекватність математичних моделей фізичному взірцю.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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.
2. Tkachuk V.I., Kasha L.V., Greschuk O.V. Mathematical Modeling of SRM with Buffer of Energy // Матеріали 13-го міжнародного симпозиуму з теоретичної електротехніки (ISTET'05), Львів, Україна. 2005. – Р. 308-311.
3. Ткачук В.І. Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2006. – 440 с.
4. Ткачук В. Математична модель мехатронного перетворювача та інвертування диференціальних рівнянь // Матеріали конференції TCSET'98. – Львів, Вид-во ДУ "Львівська політехніка, 1998. – С. 50-51.

5. Ткачук В.І., Осідач Ю.В. Математичне моделювання електромеханічних процесів в електроприводі з вентильним реактивним двигуном // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник ДУ "Львівська політехніка". – № 288. – 1995. – С. 83-90.

**Bibliography (transliterated):** 1. Tkachuk V.I., Kasha L.V., Greschuk O.V. Kerovaniy ventil'niy reaktivnij dvigun z paralel'nim buferom energii // Naukovij zhurnal "Tehnichna elektrodinamika" Tematichnij vipusk "Silova elektronika ta energoefektivnist' 2004". - Ch. 3. - 2004. - S. 37-40. 2. Tkachuk V.I., Kasha L.V., Greschuk O.V. Mathematical Modeling of SRM with Buffer of Energy // Materiali 13-go mizhnarodnogo simpoziumu z teoretichnoi elektrotehniki (ISTET'05), L'viv, Ukraina. 2005. - P. 308-311. 3. Tkachuk V.I. Elektromehanotronika: Pidruchnik. - L'viv: Vid-vo NU "L'vivs'ka politehnika", 2006. - 440 s. 4. Tkachuk V. Matematichna model' mehatronnogo peretvoryuvacha ta invertuvannya diferencijnih rivnyan' // Materiali konferencii TCSET'98. - L'viv, Vid-vo DU "L'vivs'ka politehnika, 1998. - S. 50-51. 5. Tkachuk V.I., Osidach Yu.V. Matematichne modelyuvannya elektromehanicnih procesiv v elektroprivodi z ventil'nim reaktivnim dvigunom // Elektroenergetichni ta elektromehanicni sistemi. Visnik DU "L'vivs'ka politehnika". - № 288. - 1995. - S. 83-90.

Надійшла 12.10.2011

Ткачук Василь Іванович, д.т.н., проф.  
 Біляковський Ігор Євгенович, к.т.н., доц.  
 Каша Лідія Володимирівна  
 Національний університет "Львівська політехніка"  
 кафедра "Електричні машини і апарати"  
 79013, Львів, вул. С.Бандери, 12  
 тел. (032) 258-21-60, e-mail: tkachuk@polynet.lviv.ua

Tkachuk V.I., Bilyakovskiy I.E., Kasha L.V.

### A power inverter of a switched reluctance motor with parallel energy storage and a common forcing circuit.

A mathematical model of a DC switched reluctance motor with parallel energy storage is presented. The model takes into account discrete change of the transistor switch circuit, the magnetic core steel saturation, the iron and copper loss, and loss in the switch as a whole. Simulation results of transient and quasi-steady operation modes of the motor-based DC drives are given in this paper.

**Key words – switched reluctance motor, power inverter, mathematical model.**