

УДК 621.313.175.32

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

**В.І. Ткачук, д.т.н., професор, Л. В. Каша, к.т.н., доцент,
І.Є. Біляковський, к.т.н., доцент, НУ «Львівська політехніка», Україна**

Анотація. Описано методику розрахунку вентильних двигунів з буферами енергії. Наведено математичну модель вентильного реактивного двигуна, електронний комутатор якого має паралельний ємнісний нагромаджувач та спільне коло форсування струму. Представлені результати симулювання різного роду режимів роботи ВРД з паралельним буфером енергії та спільним колом форсування.

Ключові слова: вентильний реактивний двигун, буфер енергії, силовий інвертор, математична модель, комп'ютерна симуляція.

СИЛОВОЙ ИНВЕРТОР ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ БУФЕРОМ ЭНЕРГИИ И ОБЩЕЙ ЦЕПЬЮ ФОРСИРОВАНИЯ

**В. И. Ткачук, д.т.н., профессор, Л. В. Каша, к.т.н., доцент,
И. Е. Биляковский, к.т.н., доцент, НУ «Львовская политехника», Украина**

Аннотация. Описана методика расчета вентильных двигателей с буферами энергии. Приведена математическая модель вентильного реактивного двигателя, электронный коммутатор которого включает параллельный емкостный накопитель и общую цепь форсирования тока. Представлены результаты симуляции различного рода режимов работы ВРД с параллельным буфером энергии и общей схемой форсирования тока.

Ключевые слова: вентильный реактивный двигатель, буфер энергии, силовой инвертор, математическая модель, компьютерная симуляция.

POWER INVERTOR OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH PARALLEL ENERGY BUFFER AND COMMON FORCING CIRCUIT

**V. I. Tkachuk, Doctor of science, prof., L.V. Kasha, Ph.D., Associate Professor,
I. E. Bilyakovskyy, Ph.D., Associate Professor, Lviv Polytechnic National University,
Ukraine**

Annotation. The calculating method of switched reluctance motor with energy buffers are described. The mathematical model of the switched reluctance motor, which an electronic commutator include parallel capacity storages and common current force circuit are given in paper. The simulating results of different operation modes of SRM with parallel energy buffer and common forcing circuit are shown.

Key words: switched reluctance motor, energy buffer, power inverter, mathematical models, computer simulation.

Вступ

Застосування вентильних двигунів (ВД) у

сучасних регульованих електроприводах малої й середньої потужності, в тому числі й для електротранспорту, на думку фахівців,

нині є найбільш перспективним з посеред інших типів двигунів, що пояснюється низкою відомих конструктивних і техніко-експлуатаційних переваг ВД порівняно з існуючими типами електричних машин [5]. Отже, видається логічним розглянути можливість застосування таких двигунів для приводу коліс транспортних засобів, зокрема застосування вентильного реактивного двигуна (ВРД).

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.

Аналіз публікацій

Покращити енергетичні показники й зменшити пульсації струму джерела живлення ВД з пасивним ротором можна використовуючи однонапівперіодний комутатор з паралельним під'єднанням накопичуючого конденсатора [1]. На рисунку 1 наведено принципову електричну схему вентильного реактивного двигуна з паралельним ємнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ).

Аналогічно можна підвищити надійність і ВРД з паралельним ЄНЕ, замінивши окремі транзисторні ключі і діоди підживлення секцій спільним ключем і діодом. Схема перетворюється до вигляду, який наведений на рисунку 2. В цьому комутаторі керування

підживлювальним транзисторним ключем VT4 здійснюється, як і в попередньому випадку, сигналом схеми виявлення співпадіння сигналів суміжних каналів ДПР.

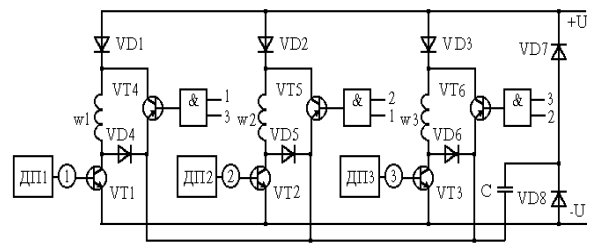


Рис. 1. Транзисторний комутатор з паралельним ЄНЕ

Заряд конденсатора тут відбувається так само, як і у ВРД 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.

Як показано в [1], ВРД з ЄНЕ не поступається техніко-експлуатаційними показниками тяговим двигунам постійного струму (ДПС) і може розглядатися як альтернатива ДПС та асинхронним двигунам в електроприводах транспортних засобів обмеженої потужності.

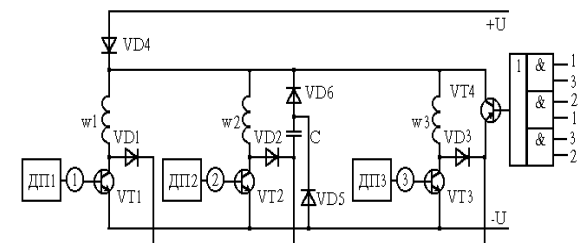


Рис. 2. ВРД з паралельним буфером й спільним колом форсування

Мета та постановка задачі

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 дозволяють 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, поперше, 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 $i_d = I_o(e^{b \cdot \Delta U_d} - 1)$, на основі якого спадок напруги на діоді можна записати як:

$$\Delta U_d = \ln \frac{i_d + I_o}{I_o} / b, \text{ де } I_o, b - \text{ зворотній}$$

струм діода і коефіцієнт температурного потенціалу, в закритому стані їх опір дорівнює безмежності.

Магнітна характеристика магнітопроводу магнітоізолюваної секції представлена виразом залежності від струму i та кута положення θ [2]; параметри обмотки статора зосереджені.

Змінний магнітний потік, замикаючись по сталюму 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 замкнутих контурів, які утворюють короткозамкнені витки, що пронизуються змінним магнітним потоком. Представимо їх в заступній схемі секції ВД - у вигляді гілки L_σ 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 $E = 4,44 \cdot f \cdot w_z \cdot B \cdot S$,

$\Delta P_s = P_0 \cdot \gamma_s \cdot s \cdot l \cdot B^2 \cdot (f / f_0)^2$, звідки отримаємо 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_σ 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_σ приймати наступним $L_\sigma \cong \frac{\Delta t}{12} \cdot R_s$, де Δt - 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 θ [4].

Для узагальнення системи диференціальних рівнянь відносно роботи транзисторних ключів введемо формальні коефіцієнти K_1 та K_2 .

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

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

де $U_{KE.0}, R_{KE.nac}$ 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 рисунку 3 наведено приклад діаграми ро-

боти ключів ЕК трифазного ВД з паралельним СНЕ.

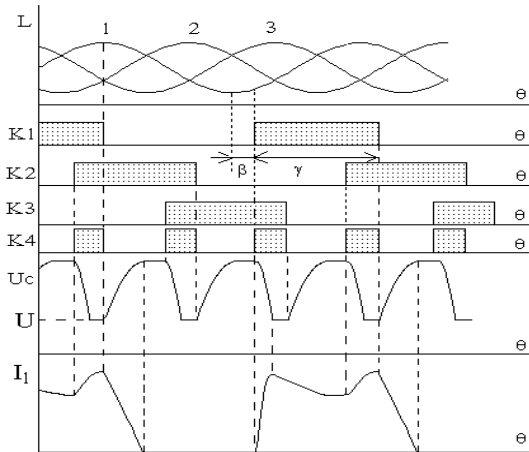


Рис.3. Індуктивності секцій, діаграма роботи транзисторних ключів, напруга на конденсаторі та струм секції ВРД з паралельним СНЕ й спільним колом форсування

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

$K_j = 1$ якщо

$$\beta + 2 \cdot (N_j - 1) \cdot \pi + (j - 1) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{m} < \theta \leq \beta + 2 \cdot (N_j - 1) \cdot \pi + (j - 1) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{m} + \gamma \quad ; \quad (2)$$

$K_j = 0$ для всіх інших значень,

$$\text{де } N_j = \frac{\theta + \pi + (j - 1) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{m}}{2 \cdot \pi} + 1 \text{ - номер періоду для відповідної секції.}$$

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 γ :

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

де $i = m - l + j$ якщо

$$2 \cdot (l + 1) \cdot \pi / m \geq \gamma \geq 2 \cdot l \cdot \pi / m, \quad l = 1, 2, 3, 4;$$

причому $i = i - m$ якщо $i > m$, то

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

Результати досліджень

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.

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

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

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

$$\begin{aligned} A_j &= \psi_{10} - \psi_{1t} \cdot \sin \theta_{pj} + \\ &+ \psi_y \cdot a \cdot \sin^2 \theta_{pj} \cdot e^{-a(i_j + i_{sj}) \sin \theta_{pj}}; \end{aligned}$$

$$B_j = \frac{\text{Cos}\theta_{pj}}{2} \cdot \left[\psi_y - \psi_{1t} \cdot (i_j + i_{sj}) - \right. \\ \left. - \psi_y \cdot e^{-a(i_j + i_{sj}) \cdot \text{Sin}\theta_{pj}} \cdot (1 - a \cdot (i_j + i_{sj}) \cdot \text{Sin}\theta_{pj}) \right];$$

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

Оскільки кут θ , струми секцій i_j і напруга на накопичуючому 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 задовільняються приблизним попаданням в момент комутації, користуючись ітераційними методами і задавшись деякою допустимою похибкою. Такий вихід з положення має два недоліки. По-перше, нема математично обгрунтованого критерію для визначення допустимої похибки попадання в момент комутації і, по-друге, навіть для наближеного визначення моменту комутації необхідне дроблення кроку.

Найбільш природне вирішення проблеми відшукування 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 θ .

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

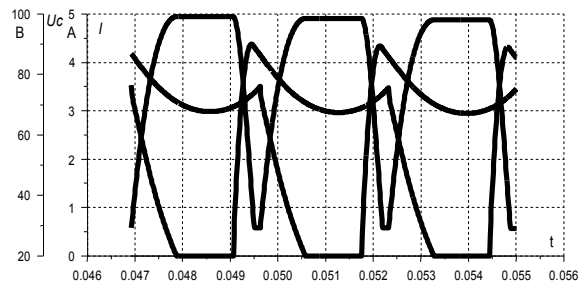


Рис.4. Квазіусталені розрахункові значення струмів секцій та напруги на конденсаторі ВРД з паралельним ємнісним нагромаджувачем

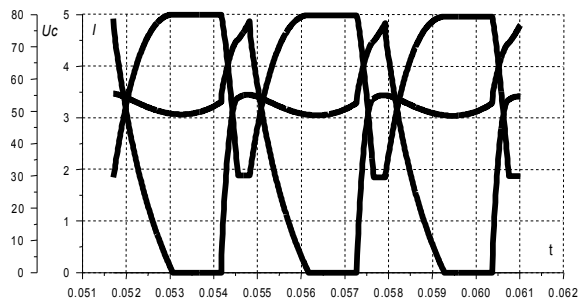


Рис. 5. Квазіусталені розрахункові значення струмів секцій та напруги на конденсаторі трисекційного ВРД з паралельним буфером енергії й спільним підживлювальним ключем

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

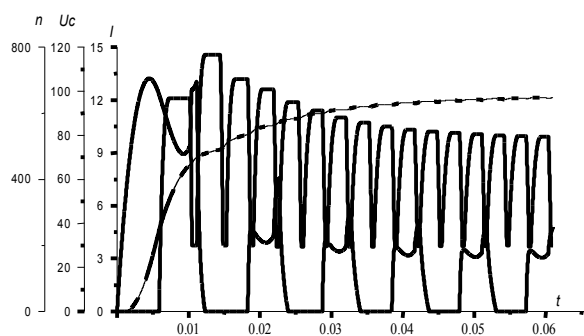


Рис.6. Результати розрахунку пуску ВРД з паралельним ємнісним буфером енергії

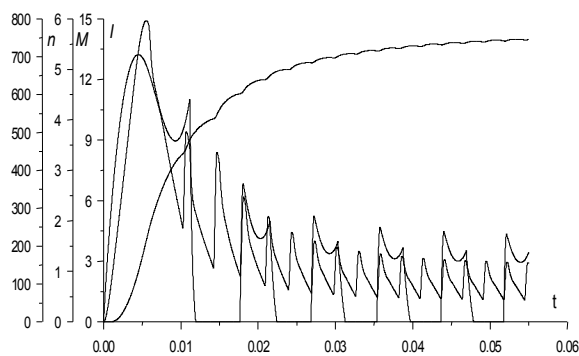


Рис.7. Розрахункові значення струму однієї секції, електромагнітного моменту та частоти обертання трисекційного ВРД з паралельним буфером енергії під час його пуску

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.

Література

1. Ткачук В.І., Каша Л.В., Грещук О.В. Керований вентиляльний 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 симпозіуму з теоретичної електротехніки (ISTET'05), Львів, Україна. 2005. - Р. 308-311.
3. Ткачук В. І. Електромеханотроніка: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2006. – 440с.
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. В. І.Ткачук, Ю. В.Осідач. Математичне моделювання електромеханічних процесів в електроприводі з вентиляним реактивним двигуном // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник ДУ "Львівська політехніка", № 288, 1995. - С. 83-90.

Рецензент: А.В. Гнатов, професор, д.т.н., ХНАДУ

Стаття надійшла до редакції 8 листопада 2015 р.