

УДК 621.314

УСУНЕННЯ ПАРАЗИТНИХ ЦИКЛІВ КОМУТАЦІЇ ПРИ ВЕКТОРНОМУ КЕРУВАННІ ВХІДНИМ СТРУМОМ МАТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА В РЕАЛЬНОМУ КОВЗНОМУ РЕЖИМІ

Т.В.Мисак, канд.техн.наук, В.М.Михальський, докт.техн.наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна.  
 e-mail: taras@igbt.com.ua

Об'єктом дослідження є матричний перетворювач з керуванням у ковзному режимі. Векторний підхід до синтезу ковзного режиму забезпечує високу якість вихідної напруги з мінімальною кількістю комутацій та форму струму мережі, наближену до синусоїдальної. Застосування адаптивного спостерігача мережі живлення дозволяє уникнути формування паразитних циклів комутації при керуванні МП в реальному ковзному режимі. Бібл. 4, рис. 2.

**Ключові слова:** матричний перетворювач, ковзний режим, векторний метод, адаптивний спостерігач мережі, комутації.

**Вступ.** На сьогодні спостерігається посилення уваги до дослідження та впровадження матричних перетворювачів (МП) традиційної топології. Поширені методи керування МП реалізуються на основі скалярних або векторних принципів в залежності від вимог до процесів перетворення енергії в цілому, необхідної якості вхідної та вихідної енергії перетворювача, обмежень по частоті комутації, обчислювальних можливостей систем керування МП. Відомі рішення, що використовують скалярні методи керування в рамках детермінованих систем, не забезпечують незмінної якості вхідного струму МП у процесі регулювання вихідної частоти та напруги за наявності різноманітних збурень та завад.

Використання розривності характеристики напівпровідникових силових ключів дає можливість застосування при синтезі керування МП методів теорії систем зі змінною структурою та отримання переваг, характерних для систем такого класу [1].

**Постановка задачі.** Розглядається трифазно-трифазний матричний перетворювач (МП), що має традиційну топологію та побудований на практично ідеальних двонаправлених ключах змінного струму. При створенні системи керування (СК) МП обмежуємося припущенням, що мережі живлення притаманні деякі фільтруючі властивості, та виразимо вихідні напруги такого МП через вхідні

$$|U_2| = [H]|U_1|, \tag{1}$$

де  $U_1 = \text{colon}\{U_A, U_B, U_C\}$  – вектор миттєвих значень напруг на вході МП;  $U_2 = \text{colon}\{U_R, U_S, U_T\}$  – вектор миттєвих значень напруг на виході МП;  $H$  – комутаційна матриця з елементами  $[h_{ij}]$ ,  $i, j=1,2,3$ .

Використовуючи перетворення трифазної системи координат з лінійно-залежними базисними векторами  $e_R, e_S, e_T$  до двофазної системи з ортогональними базисними векторами  $e_\omega, e_\beta$ , запишемо рівняння (1) у вигляді

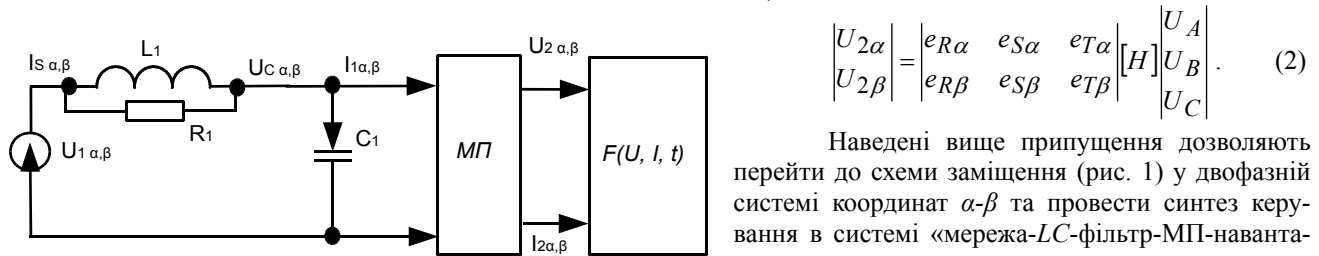


Рис. 1

$$\begin{vmatrix} U_{2\alpha} \\ U_{2\beta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} e_{R\alpha} & e_{S\alpha} & e_{T\alpha} \\ e_{R\beta} & e_{S\beta} & e_{T\beta} \end{vmatrix} [H] \begin{vmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{vmatrix}. \tag{2}$$

Наведені вище припущення дозволяють перейти до схеми заміщення (рис. 1) у двофазній системі координат  $\alpha$ - $\beta$  та провести синтез керування в системі «мережа-LC-фільтр-МП-навантаження» примусовим введенням ковзного режиму формування вихідної напруги та наближеного до синусоїдального вхідного струму.

Якщо записати рівняння вхідного LC-фільтра у вигляді

$$\frac{d}{dt}|U_C| = \frac{1}{C}(I_S - I_1), \quad \frac{d}{dt}|I_S| = -\frac{1}{L}(U_C - U_1) + \frac{1}{R}\left(\frac{dU_1}{dt} - \frac{1}{C}I_S + \frac{1}{C}I_1\right), \tag{3}$$

та доповнити рівняння поверхонь ковзання контурів формування вихідної напруги МП третім рівнянням для реактивної компоненти вхідного струму МП, можемо описати ковзний режим на перетині поверхонь

$$\begin{vmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \\ S_q \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \varepsilon_\beta \\ \varepsilon_{Iq} + \tau_q \varepsilon_{Uq} \end{vmatrix}, \tag{4}$$

де  $\varepsilon U_q = U_{Cqz} - U_{Cq}$ ,  $\varepsilon I_q = I_{Sqz} - I_{Sq}$ , що не має надлишковості по керуванню [2].

При переході від ідеального випадку до процесу керування з ненульовими значеннями похибок у такому МП можуть виникати додаткові комутації, які погіршують ККД. Тому підвищення ККД перетворення в такому МП потребує усунення вищезначених комутацій.

**Рішення задачі.** В реальному ковзному режимі з ненульовими значеннями компонент /координат/ вектора похибки зміна структури МП (здійснення комутації) відбувається при виході вектора похибок за межі опуклої фігури допустимих похибок. Окрім того, зміна структури відбувається в точках природної комутації.

При практичній побудові СК система, згідно з принципом функціонально-модульної композиції, розбивається на декілька підсистем. Саме тут дається взнаки суттєва відмінність між ідеальним та реальним ковзними режимами. Інформаційно-вимірювальна підсистема МП формує два види сигналів напруги: для векторного модулятора та для дискретної підсистеми (розподільник імпульсів).

Компоненти напруги, що вимірюються на вході МП, мають високочастотну та низькочастотну складові. Саме високочастотна (ВЧ) складова змінних стану, що не враховувалася в попередніх припущеннях при синтезі алгоритму, і є причиною виникнення паразитних циклів комутації. ВЧ складова є корисним сигналом тільки при обчисленні компонент вектора похибки керування. При обчисленні векторів фазових швидкостей та дискретних сигналів стану мережі ця складова є зайвим (паразитним) шумовим сигналом.

Для усунення високочастотної складової використовуються різні методи: дискретно-апаратні, що потребують застосування тактових регістрів; аналогові схеми фільтрації вимірюваних сигналів; програмні, що використовують різноманітні цифрові фільтри.

Недоліком перших двох є введення в канал керування затримки, яка безпосередньо впливає на якість керування та може приводити до втрати системою стійкості. Недоліком другого та третього – значне збільшення розмірності диференціальних рівнянь, що описують рух системи. Типове рішення, яке є промисловим стандартом, базується на використанні систем фазової синхронізації (PLL – Phase locked loops) і представляє собою складні нелінійні фільтри.

Виходячи з цього, задача найбільш точної оцінки стану мережі на вході МП та запобігання виникненню паразитних циклів комутації є досить важливою при побудові практичних зразків МП.

У роботі [3] запропоновано застосування нового концептуального підходу до вимірювання компонент вектора напруги живлення, що базується на використанні адаптивних спостерігачів. Згідно з цим підходом, адаптивний спостерігач може бути зконструйованим з динамічної моделі гармонічного сигналу та описаним для нашого випадку (рис. 1) рівняннями (5), а рівняння динаміки похибок оцінювання мають вигляд (6)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{U}_{Ca} \\ \hat{U}_{Cb} \end{bmatrix} &= \hat{\omega}_1 \begin{bmatrix} -U_{Cb} \\ U_{Ca} \end{bmatrix} + k_U \begin{bmatrix} \tilde{U}_{Ca} \\ \tilde{U}_{Cb} \end{bmatrix}, \\ \frac{d}{dt} \hat{\omega}_1 &= -k_\omega (\tilde{U}_{Ca} U_{Cb} - \tilde{U}_{Cb} U_{Ca}), \end{aligned} \quad (5),$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{U}_{Ca} \\ \tilde{U}_{Cb} \end{bmatrix} &= \tilde{\omega}_1 \begin{bmatrix} -U_{Cb} \\ U_{Ca} \end{bmatrix} - k_U \begin{bmatrix} \tilde{U}_{Ca} \\ \tilde{U}_{Cb} \end{bmatrix}, \\ \frac{d}{dt} \tilde{\omega}_1 &= k_\omega (\tilde{U}_{Ca} U_{Cb} - \tilde{U}_{Cb} U_{Ca}), \end{aligned} \quad (6)$$

де  $k_U$ ,  $k_\omega$  – параметри налаштування,  $\hat{U}_{Ca}$ ,  $\hat{U}_{Cb}$  – оцінки компонент напруги,  $\tilde{U}_{Ca}$ ,  $\tilde{U}_{Cb}$  – похибки оцінок.

Адаптивний спостерігач (5) гарантує глобальне асимптотичне оцінювання компонент вектора напруги живлення  $U_a, U_b$ , а також частоти його обертання  $\omega_1$ . Оскільки динамічна система (5) може розглядатися також як адаптивний фільтр, то в оцінених значеннях  $\hat{U}_{Ca}$ ,  $\hat{U}_{Cb}$  буде забезпечуватися фільтрація вищих гармонік [4]. Оцінені значення частоти та складових вектора напруги мережі живлення далі можуть бути використані при обчисленні компонент векторів фазових швидкостей векторного алгоритму керування МП із формуванням вхідного струму [2]. Результати дослідження на математичній моделі наведено на рис. 2. На рис. 2, а показано діаграми напруги ідеальної мережі живлення  $U_{1a}$ , напруги на вході МП  $U_{Ca}$  та оцінки напруги  $\hat{U}_{Ca}$ . Аналіз взаємного розташування кривих напруги дозволяє зробити висновок, що похибка по фазі майже непомітна, тому діапазон максимально можливих значень модуля вектора вихідної напруги залишається близьким до теоретичного. Використання компонент вектора оцінки напруги не впливає на форму кривої струму в навантаженні та вхідного струму МП, що показано для однієї з фаз на рис. 2, б, але підвищує ККД за рахунок усунення паразитних сигналів.

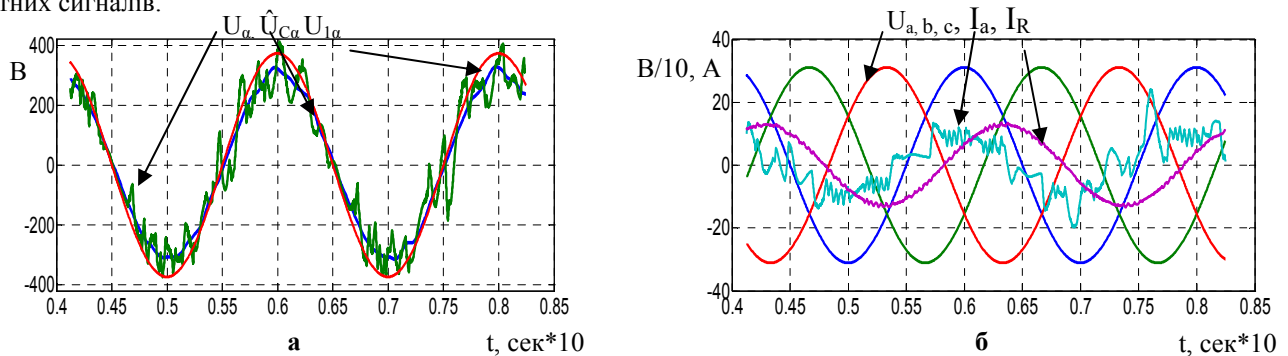


Рис. 2

**Висновки.** Введення в систему керування МП, який функціонує у ковзному режимі, адаптивного спостерігача параметрів мережі живлення та використання оцінок компонент вектора вхідної напруги МП замість безпосередньо вимірюваних значень дозволило усунути паразитні цикли комутації, що забезпечило суттєве (до 20%) зменшення кількості комутацій у порівнянні з традиційними системами керування МП.

1. Utkin V., Guldner J., Jingxin Shi. Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems. – N.-Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group. – 2009. – 504 p.

2. Мысак Т.В., Михальский В.М. Управление входным током матричного преобразователя с использованием скользящего режима // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. 2012. – № 33. – С. 74-83.

3. Пересада С. М., Диннік Т.В. Адаптивний спостерігач параметрів мережі живлення // II міжн. наук.-техн. конф. "Оптимальне керування електроустановками." – Вінниця, 22-24 жовтня 2013. – С. 77.

4. Потепенко Е.М., Потепенко Е.Е., Соломаха А.В. Синтез адаптивного фильтра-наблюдателя двухфазного сигнала / Вісник КДПУ „Електромеханічні системи та автоматизація”. – 2006. – Вип.3. – Ч. 2. – С. 46-48.

#### УСТРАНЕНИЕ ПАЗАРИТНЫХ ЦИКЛОВ КОММУТАЦИИ ПРИ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ ВХОДНЫМ ТОКОМ МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕАЛЬНОМ СКОЛЬЗЯЩЕМ РЕЖИМЕ

Т.В.Мысак, канд.техн.наук, В.М.Михальский, докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

E-mail: [taras@igbt.com.ua](mailto:taras@igbt.com.ua)

*Объектом исследования является матричный преобразователь с управлением, реализующим скользящий режим. Векторный подход к синтезу скользящего режима обеспечивает высокое качество выходного напряжения с минимальным количеством переключений и форму тока, потребляемого из сети, близкую к синусоидальной. Применение адаптивного наблюдателя параметров питающей сети позволяет устранить формирование паразитных циклов коммутации при управлении МП в реальном скользящем режиме. Библи. 4, рис. 2.*

**Ключевые слова:** матричный преобразователь, скользящий режим, векторный метод, адаптивный наблюдатель сети, коммутация.

#### SOLUTION THE PARASITIC SWITCHING CYCLES OF THE VECTOR CONTROL INPUT CURRENT FOR MATRIX CONVERTER IN REAL SLIDING MODE

T.V.Mysak, V.M.Mykhalskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: [taras@igbt.com.ua](mailto:taras@igbt.com.ua)

*Object of research is a matrix converter with sliding mode control. Vector approach to the synthesis of a sliding mode provides high quality output voltage with minimal commutations and input current close to sinusoidal. Application of adaptive observer parameters of mains supply eliminates forming of parasitic switching cycles when operating MC in real sliding mode. References 4, figures 2.*

**Keywords:** matrix converter, sliding mode, vector method, adaptive observer network, switching.

1. Utkin V., Guldner J., Jingxin Shi Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems. – N.-Y.: CRC Press, Taylor & Francis Group. – 2009. – 504 p.

2. Mysak T.V., Mykhalsky V.M. Control input current matrix converter using sliding mode / Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2012. – № 33. – Pp. 74-83. (Rus)

3. Peresada S.M., Dynnuk T.V Adaptive observer parameters of mains supply / II Mszhnarodna Naukovo-tekhnichna Konferenciia "Optimal control of the electric units". – Vinnytsia 22-24 Oktober 2013. – 77 p. (Ukr)

4. Potapenko E.M., Potapenko E.E., Solomakha A.V. Synthesis of adaptive filter-observer of the two-phase signal / Visnyk KDPU “Electromekhanichni systemy ta automatizatsiia”. – 2006. – No 3. – Part.2. – Pp. 46-48. (Rus)

Надійшла 24.02.2014