

# МАТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Гриценко В.Є., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

**Вступ.** Матричні перетворювачі (МП) останнім часом привертають все більшу увагу дослідників і розробників. Це обумовлено тим, що МП можуть конкурувати з іншими відомими структурами перетворювачів частоти і мають ряд переваг над останніми: вони є одноступеневими перетворювачами; потребують мінімум пасивних реактивних компонентів (завдяки відсутності ланки постійного струму і гармонік низького порядку); забезпечують двосторонній потік енергії та чотириквADRANTНИЙ режим роботи; відрізняються високою питомою потужністю (у 2–5 разів вищою, ніж у відомих топологій); мають високу швидкодію.

Сучасні досягнення в розвитку силових напівпровідникових приладів і силової електроніки взагалі (швидкі та дешеві повністю керовані ключові прилади у модульній інтегральній формі, цифрові сигнальні процесори DSP та мікрокомп'ютерна технологія для керування у реальному часі) зробили можливим перехід на більш високий рівень розвитку перетворювальної техніки, розробку нових методів керування МП, які були неможливі декілька років тому.

**Мета досліджень.** Розробка способів підвищення якості електроенергії на виході матричного перетворювача асинхронних електроприводів, розвиток методу керування та аналізу напівпровідникових перетворювачів.

**Матеріали досліджень.** Розглянемо векторну ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) у традиційних МП. На рис. 1 показано схему силової частини матричного перетворювача, що з'єднує три вхідних лінії з трьома вихідними за допомогою дев'яти IGBT-ключів двосторонньої провідності. Просторова векторна модуляція МП базується на миттєвому відображенні просторових векторів вхідного струму та вихідної напруги (рис. 2). Основою векторної модуляції є те, що мережа, від якої живиться МП, повинна бути лінійно навантажена. У цьому випадку форма кривої вхідного струму МП синусоїдальна за умови синусоїдальності вхідної напруги. Розглянемо випадок, коли немає зсуву між векторами вхідного струму і напруги (рис. 2а) [1].

Згідно з алгоритмом ВШІМ (векторна ШІМ), матричним перетворювачем формуються просторові вектори заданої фазної (або лінійної) вихідної напруги  $u_{ref}$  і вхідного струму  $i_{ref}$ . Ці просторові вектори синтезуються за допомогою стаціонарних векторів і у кожному з шести секторів їх розташування (рис. 2) тлумачаться як усереднені значення, які визначаються таким чином:

$$u_{ref} = \sum_{k=1}^4 d_k u_{ok}; i_{ref} = \sum_{k=1}^4 d_k i_{ik}, \quad (1)$$

де  $u_{ok}$  та  $i_{ik}$  – ненульові стаціонарні вектори;  $d_k$  – відносний час, протягом якого вони використовуються на поточному періоді частоти ШІМ.

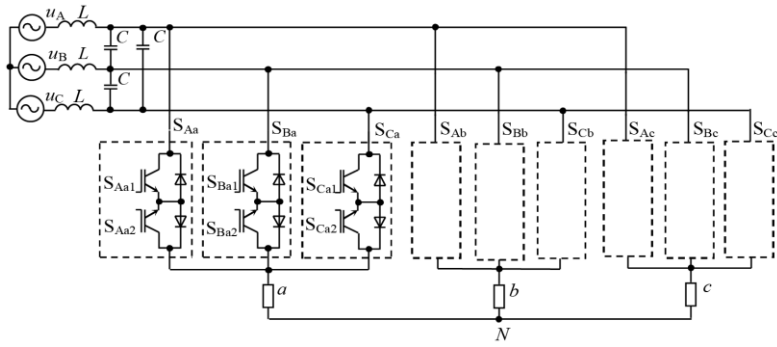


Рисунок 1 – Схема силової частини МП

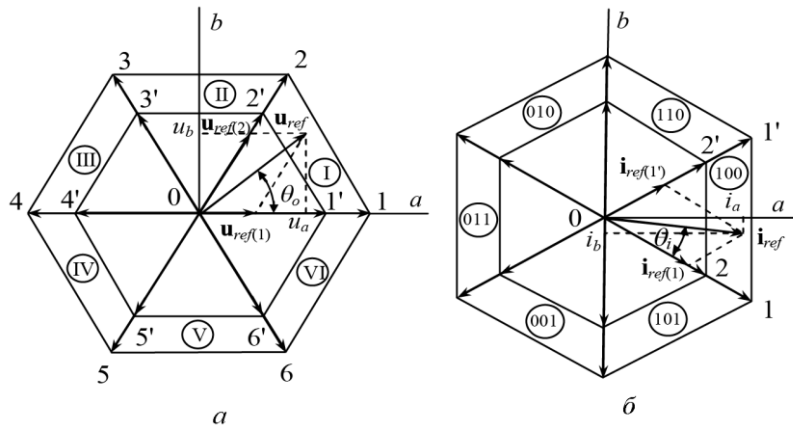


Рисунок 2 – Векторні діаграми вихідної напруги (а) і вхідного струму МП (б)

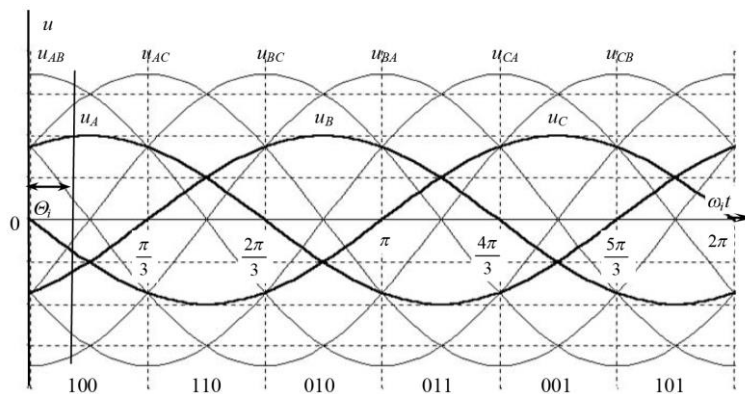


Рисунок 3 – Часова діаграма вхідних напруг

На рис. 3 показано розбивку періоду мережі на шість інтервалів по 60 ел. град., протягом кожного з яких стаціонарні вектори вихідної напруги формуються з двох максимальних за модулем лінійних напруг мережі, завдяки чому досягаються максимально можливий коефіцієнт передачі напруги і нульовий фазовий зсув між струмом і напругою на вході МП. Поточний кут всередині інтервалу (рис. 3) відповідає поточній фазі просторового вектора вхідного струму всередині сектора (рис. 2 б). Позначення інтервалів на рис. 3 прив'язано до полярності напруг фаз А, В, С ("1" відповідає позитивній полярності, "0" – негативній) [2].

Далі введемо всередині будь-якого поточного інтервалу індекси  $\delta$  і  $\gamma$  для двох фаз з напругами однакової полярності й індекс  $\nu$  для третьої фази, напруга якої має протилежну полярність і максимальна за модулем.

Припустимо, що МП виконує функцію формування просторового вектора напруги, який у кожен момент часу задається регулятором електромеханічної системи і може бути виражений у різних прийнятих для цієї системи координатах (що не має ніякого принципового значення для керування МП). Як приклад наведемо розповсюджений в автоматизованому електроприводі розгляд вектора в нерухомій щодо статора електродвигуна системі прямокутних координат  $u_{ref} = [u_a \ u_b]^T$ . За координатами визначається, в якому секторі й з яких за величиною складових уздовж напрямків стаціонарних векторів формується заданий просторовий вектор (рис. 2). Необхідні для цього співвідношення наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Співвідношення для визначення номера сектора векторної діаграми

Номер вектора (n)	Номер сектора					
	I	II	III	IV	V	VI
1	$u_a - u_b / \sqrt{3}$					$u_a + u_b / \sqrt{3}$
2	$2u_b / \sqrt{3}$	$u_a + u_b / \sqrt{3}$				
3		$-u_a + u_b / \sqrt{3}$	$2u_b / \sqrt{3}$			
4			$-u_a - u_b / \sqrt{3}$	$-u_a + u_b / \sqrt{3}$		
5				$-2u_b / \sqrt{3}$	$-u_a - u_b / \sqrt{3}$	
6					$u_a - u_b / \sqrt{3}$	$-2u_b / \sqrt{3}$

Виходячи з розташування заданого вектора вихідної фазної напруги на векторній діаграмі (рис. 2 а) і його величини

$$|u_{ref(n)}| = \left(\frac{2}{3}\right) |d_{\delta(n)}(u_v - u_\delta) + d_{\gamma(n)}(u_v - u_\gamma)|, \quad (2)$$

де  $n=1\dots 6$  – номер сектора (і відповідно стаціонарного вектора, що утворює його першу межу при переміщенні вектора проти годинникової стрілки);  $d_{\delta(n)}$  і  $d_{\gamma(n)}$  - відносний час використання фаз  $\delta$  і  $\gamma$  (тобто векторів, сформованих з лінійних напруг  $u_{v\delta}$  і  $u_{v\gamma}$ ) протягом циклу ВШІМ  $T$ ;  $d_{\delta(n)} = t_\delta / T$ ,  $d_{\gamma(n)} = t_\gamma / T$ , запропоновано визначати відносні тривалості [3]:

$$\begin{bmatrix} d_{\delta(n)} \\ d_{\gamma(n)} \\ d_{\delta(n+1)} \\ d_{\gamma(n+1)} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{\Delta} \begin{bmatrix} |u_\delta| \left( u_a \sin \frac{n\pi}{3} - u_b \cos \frac{n\pi}{3} \right) \\ |u_\gamma| \left( u_a \sin \frac{n\pi}{3} - u_b \cos \frac{n\pi}{3} \right) \\ |u_\delta| \left( -u_a \sin \frac{(n-1)\pi}{3} + u_b \cos \frac{(n-1)\pi}{3} \right) \\ |u_\gamma| \left( -u_a \sin \frac{(n-1)\pi}{3} + u_b \cos \frac{(n-1)\pi}{3} \right) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{де } \Delta = u_{\delta}^2 + u_{\gamma}^2 - (u_{\delta} + u_{\gamma})u_v.$$

Зазначимо, що якщо сума миттєвих значень фазних напруг мережі дорівнює нулю, то  $\Delta = u_A^2 + u_B^2 + u_C^2$ . При живленні МП від симетричної системи напруг  $\Delta = (3/2)U_{mi}^2$ , де  $U_{mi}$  - амплітуда фазної напруги мережі. Відносний час використання нульового вектора  $d_0 = 1 - d_{\delta(n)} - d_{\gamma(n)} - d_{\delta(n+1)} - d_{\gamma(n+1)}$ .

В зв'язку з тим, що керування МП є значно складнішим у порівнянні з керуванням традиційними перетворювачами, зважаючи на особливості процесів комутації змінного струму, проблеми підвищення якості електроенергії на вході та виході перетворювача потрібно розглядати в тісному поєднанні з особливостями побудови циклів ШІМ, конструкції яких дають змогу здійснювати безпечні комутації ключів при різних стратегіях керування. Як відомо, проблема безпечної (без коротких замикань через ключі та розривів струму навантаження) комутації змінного струму ключами двосторонньої провідності матричних перетворювачів є однією з основних при практичній реалізації таких перетворювачів [4].

У порівнянні з розглянутим ВШІМ при застосуванні для керування МП векторної широтно-імпульсної модуляції і формуванні просторових векторів вихідної напруги та вхідного струму з почерговим використанням двох вхідних лінійних напруг, максимальних за модулем на поточних інтервалах періоду напруги мережі живлення, межами яких є моменти зміни полярності фазних напруг, використовується стратегія комутації струму за публікацією [5]. Ця стратегія полягає в тому, що на кожному циклі векторної широтно-імпульсної модуляції нульовий стаціонарний вектор розташовується в середині циклу і формується під'єднанням всіх трьох фаз навантаження до вхідної фази. Напруга вхідної фази максимальна за модулем на поточному 60-градусному інтервалі періоду напруги мережі живлення, а два перших і два останніх на циклі модуляції стаціонарних вектори формуються з двох різних вхідних лінійних напруг. Таке чергування дає змогу здійснювати безпечну покрокову комутацію змінного струму, що базується на інформації про співвідношення напруг мережі живлення на момент перемикання ключів двосторонньої провідності.

При формуванні вихідної напруги з використанням двох вхідних лінійних напруг, максимальних за модулем на поточних інтервалах періоду напруги мережі живлення, є можливість підтримувати близьким до нуля кут зсуву між просторовими векторами вхідного струму і вхідної напруги. Покрокова комутація полягає в тому, що при переведенні струму з одного ключа в інший здійснюються послідовне вмикання і вимикання транзисторів з рознесенням цих процесів у часі та з вибором послідовності залежно від напруги, прикладеної до комутуваних ключів, і/або від напрямку струму через них. Запропоноване рішення ґрунтується на однозначному і безпомилковому визначенні полярності напруг між комутуваними ключами [6].

**Висновки.** Запропонована стратегія комутацій не вимагає визначення напрямку струму навантаження або співвідношення вхідних напруг і є грубою стосовно визначення границь інтервалів вхідних напруг, тобто до моменту

перетинання кривими вхідних напруг нуля. Це забезпечує коректну комутацію при неточному визначенні границь інтервалів. У результаті запропонований метод гарантує працездатність МП навіть при дуже значних спотвореннях як вхідної напруги, так і вихідного струму навантаження.

Розглянутий спосіб комутації може бути застосований не тільки при використанні розглянутої векторної широтно-імпульсної модуляції із синтезом просторового вектора вихідної напруги МП напруги з п'яти стаціонарних векторів, але й при інших можливих алгоритмах, якщо є присутньою нульова компонента і з її допомогою виключаються прямі переходи від однієї напруги мережі до іншої при формуванні з них вихідної напруги. Загальна кількість комутацій протягом циклів ШІМ при цьому суттєво не зміниться у порівнянні з іншими способами, наприклад, способами, що використовують інформацію про напрямок струму, який комутується.

Нова генерація матричних перетворювачів змінного струму і керованих за допомогою матричних перетворювачів електричних та електромеханічних систем забезпечує істотне покращення характеристик перетворення енергії: динамічні показники, розмір, вага, електромагнітна сумісність тощо.

Перевагами такого алгоритму є: лінійне навантаження симетричної мережі живлення; точне формування заданого просторового вектора вихідної напруги МП при спотвореннях і несиметрії напруг мережі.

#### Перелік посилань

1. Михальський В.М. Векторна широтно-імпульсна модуляція в матричних перетворювачах. Навчальний посібник / В.М. Михальський, В.М. Соколов, Е.М. Чехет. – Київ : Інститут електродинаміки НАН України, 2003. – 74 с.

2. Михальський В.М. Перетворювачі частоти, напруги та струму з векторною широтно-імпульсною модуляцією / В.М. Михальський, В.М. Соколов // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – Вип. 20. – С.65–67.

3. Чехет Э.М. Матричные преобразователи для электромеханических систем переменного тока / Э.М. Чехет, В.М. Михальский, С.М. Пересада, В.Н. Соколов, И.А. Шаповал // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч. 1. – С.92–103.

4. Чехет Э.М. Тенденции развития матричных преобразователей для асинхронного электропривода / Э.М. Чехет, В.Н. Соколов, В.М. Михальский, И.А. Шаповал, С.И. Полищук // Вестник НТУ "ХПИ". Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 2005. – Вып. 45. – С. 32–37.

5. Пат. 58613 Україна, МПК7 H01P27/00, G05B19/08. Спосіб комутації струму ключами двосторонньої провідності (варіанти) / Е.М. Чехет, В.М. Соколов, В.М. Михальський; Заявник і патентоутримувач Чехет Е.М., Соколов В.М., Михальський В.М. – № 2001031933; Заявл. 22.03.01; Опубл. 15.08.03, Бюл. № 8.

6. Чехет Е.М. Матричні перетворювачі для електромеханічних систем змінного струму / Е.М. Чехет, В.М. Михальський, В.М. Соколов, І.А. Шаповал // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАНУ. – 2007. – № 1(16). Ч. 2. – С. 76–85.