

УДК 621.3.07

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/13>**Доценко Г.Г.**

Херсонська державна морська академія

Наговський Д.А.

Херсонська державна морська академія

РЕАЛІЗАЦІЯ БЛОКА ПРОСТОРОВО-ВЕКТОРНОЇ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ СУДНОВИХ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПРИВОДІВ

В роботі проаналізовано типову модель високошвидкісних суднових електроприводів, а також розглянуті питання застосування просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ПВШІМ) для керування роботою інвертора для високошвидкісних приводів.

В даний час найбільш ефективним методом управління напівпровідниковими перетворювачами є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Застосування ШІМ є прагненням до підвищення коефіцієнту корисної дії при управлінні електроприводами. ШІМ широко реалізована в автомобільних та суднових інверторах, в зарядних пристроях і таке інше. Основною проблемою в подібних системах є питання якості та ефективності процесу векторного регулювання, які майже повністю залежать від швидкодії цифрової системи керування.

Традиційні методи ШІМ засновані на порівнянні сигналу завдання із сигналом лінійної розгортки у результаті чого в обмотках синхронного двигуна (СД) формується послідовність прямокутних імпульсів, скважність яких змінювалася відповідно до сигналу завдання. Однак через вплив електромагнітних процесів (насамперед ЕРС обертання) характер зміни струмів в обмотках не має однозначного зв'язку із законом зміни сигналу керування та сильно залежить від режиму роботи синхронного двигуна.

Завдяки використанню просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції, яка забезпечує більш плавне керування напругою і струмом, що дозволяє точніше регулювати швидкість двигуна. Це особливо важливо в системах з високими вимогами до стабільності швидкості.

У високоточних промислових приводах просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція може забезпечити стабільність швидкості з відхиленням не більше 2–3%. У приводах з підтримкою відношення U/f важливо зберігати постійне співвідношення між напругою і частотою для забезпечення стабільної роботи двигуна. Просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція дозволяє краще підтримувати це співвідношення завдяки плавному регулюванню напруги, що знижує відхилення до 2–5%. Це особливо важливо для великих і високошвидкісних суднових електроприводів.

Ключові слова: синхронний двигун (СД), головна електрична установка (ГЕУ), головний електричний двигун (ГЕД), просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція (ПВШІМ), широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), інвертор.

Постановка проблеми. Українська суднобудівна галузь має серйозний експортний потенціал, який впливає на розвиток вітчизняної економіки. Водночас в країні внаслідок браку коштів, як з державного бюджету, так і власних коштів підприємств, спостерігається недостатність відповідних досліджень, відсутність узгодженої співпраці науково-дослідних і проектних організацій та підприємств галузі, що негативно впливає на конкурентоспроможність і якість вироблюваної вітчизняними підприємствами продукції.

Основною вимогою до електрообладнання електроенергетичних систем є надійність його роботи в складних умовах мореплавства. Це пояс-

нюється, з одного боку, тим, що основні суднові механізми забезпечені електричною енергією, і тому надійна робота електроустаткування обумовлює як необхідність нормальну їх експлуатацію, так і цілісність судна в цілому; з іншого боку, судно має високу автономність і надовго відривається від баз постачання та ремонтних майстерень, часто має обмежену кількість кваліфікованого обслуговуючого персоналу.

Переваги дизель-електричної силової енергетичної установки з головною електричною установкою (ГЕУ) стосовно до відомих і побудованих на даний момент типів суден, істотно залежать від їх індивідуальних експлуатаційних профілів і їх

цільового призначення, тобто знижений пропульсивний шум і коливання. Наприклад малообертовий головний електричний двигун (ГЕД) дозволяє передачу механічного моменту прямо на гвинт без необхідності застосування редуктора, а капсульні ГЕД більшу частину спектра шуму утворюють за межами корпусу [1].

Сучасний рівень розвитку силових напівпровідникових перетворювачів електроенергії характеризується широким впровадженням мікропроцесорного управління, що сприяє підвищенню ефективності роботи систем в цілому. В даний час найбільш ефективним методом управління напівпровідниковими перетворювачами є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ).

Застосування ШІМ є прагнення до підвищення коефіцієнту корисної дії при побудові вторинних джерел живлення електронної апаратури та інших вузлах. ШІМ широко реалізована в зварювальних апаратах, в автомобільних та суднових інверторах, в зарядних пристроях і таке інше. Основною проблемою в подібних системах є питання якості та ефективності процесу векторного регулювання, які майже повністю залежать від швидкодії цифрової системи керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливостям імплементации блоку просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції в програмованій логічній інтегральній схемі (ПЛІС) (англ. programmable logic device, PLD) присвячено багато досліджень, які стосуються реалізації як систем керування трифазними інверторами напруги [1; 2], так і систем керування індукційного двигуна (ІД) [3–4, 6–9]. Зазвичай пропонуються структури блоків ПВШІМ, в яких функції координатних перетворень реалізовано на основі суматорів, компараторів і зсувних регістрів.

Суднові головні електричні двигуни (ГЕД) живляться змінною напругою як по амплітуді так і по частоті від інвертора. В якості інвертора, застосовують автономний інвертор напруги (АІН) (voltage source inverter – VSI) у тому розумінні, що цей інвертор отримує живлення від джерела постійної напруги (DC). Ця постійна напруга забезпечується некерованим діодним випрямлячем і конденсатором (конденсатор напруги DC шини).

Робота АІН (VSI), може бути заснована на двох типах модуляції, гістерезисній модуляції та просторово-векторної модуляції (ПВМ) (space vector pulse width modulation – SVPWM) або інакше – векторної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Метод ШІМ був розроблений у середині 90-х років у зв'язку розширенням можливостей

систем мікропроцесорного керування. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ – англ. pulse-width modulation, PWM), або модуляція за тривалістю імпульсів (англ. pulse-duration modulation, PDM) – процес керування шириною (тривалістю) високо-частотних імпульсів за законом, який задає низько-частотний сигнал.

Традиційні методи ШІМ засновані на порівнянні сигналу завдання із сигналом лінійної розгортки (пилкоподібна напруга) у результаті чого в обмотках СД формується послідовність прямокутних імпульсів, скважність яких змінювалася відповідно до сигналу завдання. Однак через вплив електромагнітних процесів (насамперед ЕРС обертання) характер зміни струмів в обмотках не має однозначного зв'язку із законом зміни сигналу керування та сильно залежить від режиму роботи синхронного двигуна.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка алгоритмів побудови блоку просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ПВШІМ) у складі контролера керування роботою інвертора для суднових високошвидкісних приводів.

Виклад основного матеріалу. Алгоритм керування ключами ШІМ заснований на формуванні на кожному тимчасовому інтервалі необхідного положення вектора напруги в просторі [4–8]. У випадку аналогового джерела живлення для рішення цього завдання досить сформулювати в кожній обмотці напругу, що відповідає проекції заданого вектора на вісь обмотки. В імпульсних джерелах живлення, до яких відноситься і автономний інвертор (рис. 1 а), можливе формування тільки восьми станів (положень) вектора напруги (рис. 1 б), включаючи два нульові, що сформовані при замиканні непарних ($u\theta$) і парних ($u7$) ключів інвертора. Ці вектори називають базовими векторами.

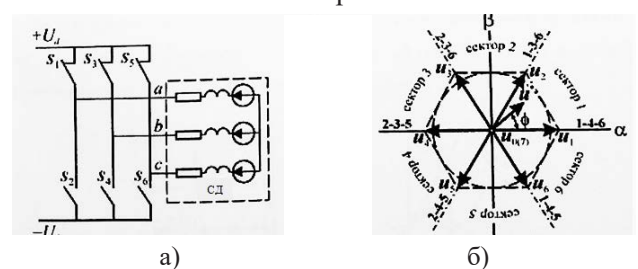


Рис. 1. Автономний інвертор та векторна діаграма напруг

Модуль ненульового базового вектора можна визначити, користуючись поняттям узагальненого вектора. Нехай задано замкнутий стан ключів, наприклад, 1-4-6. В силу симетрії обмоток і з урахуванням напрямку (в фазі а від початку до кінця,

у фазі b та у фазі c від кінця до початку) напруги на них складуть:

$$U_a = \frac{2U_d}{3}, U_b = U_c = \frac{U_d}{3} \quad (1)$$

З рівнянь (1) модуль вектора напруги або базового вектора буде дорівнювати:

$$|u| = U_0 = U_d \frac{2}{3} \left[\frac{2}{3} - \frac{1}{3} \left(\frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = \frac{2}{3} U_d$$

Очевидно, що для всіх інших станів ключів ми одержимо той же результат.

Формування вектора із заданим середнім значенням модуля та просторового кута (див. рис. 2) відбувається почерговим формуванням базових векторів які утворюють границі сектора, у якому перебуває результуючий вектор, а також нульового вектора.

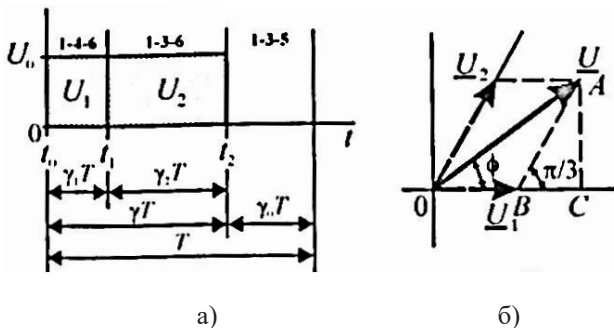


Рис. 2. Формування вектора із заданим середнім значенням модуля та просторового кута

Визначимо тривалість цих інтервалів, вважаючи що модулі граничних векторів дорівнюють середнім значенням. Нехай потрібно сформувати вектор u . Він перебуває в першому секторі, обмеженому базовими векторами $u1$ та $u2$. На першому інтервалі $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ (рис. 2, а) формується вектор $u1$ (ключі 1-4-6), на другому інтервалі $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ вектор $u2$ (ключі 1-3-6), і нарешті, замикаються ключі 1-3-5 і формується коротке замикання стартера синхронного двигуна.

Тоді середні значення граничних векторів будуть дорівнювати:

$$U_1 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_1} U_m dt = U_m \frac{t_1 - t_0}{T} = \gamma_1 U_m = \gamma_1 \gamma_m U_0 = \gamma_1 U_0$$

$$U_2 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} U_m dt = U_m \frac{t_2 - t_1}{T} = \gamma_2 U_m = \gamma_2 \gamma_m U_0 = \gamma_2 U_0,$$

де γ_1, γ_2 – відносні тривалості комутації $\left(\frac{\Delta t_n}{T} \right)$ при заданому модулі результуючого вектора $U_m = \gamma_m U_0$ з відносним значенням $0 \leq \gamma_m \leq 1$;

$\gamma_1 = \gamma_1 \gamma_m, \gamma_2 = \gamma_2 \gamma_m$ – відносні тривалості комутації при заданому модулі базового вектора U_0 .

Відносні тривалості комутації будуть дорівнювати:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \gamma_m \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\left(\frac{\pi}{6} + \phi\right) = \gamma_m \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \phi\right) \\ \gamma_2 &= \gamma_m \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\phi \end{aligned} \quad (2)$$

Знаючи відносні тривалості комутації можна знайти відносну тривалість паузи як:

$$\gamma_0 = 1 - \gamma_1 - \gamma_2 = 1 - \gamma,$$

де $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 = \gamma_m \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\left(\frac{\pi}{6} - \phi\right)$ – сумарна відносна тривалість формування ненульових векторів.

Визначимо тепер модуль результуючого вектора через відносні тривалості за рівняннями (2). Із трикутника OAB (рис. 2, б):

$$\begin{aligned} OA = |U| &= \sqrt{(OB + AB \sin \frac{\pi}{6})^2 + (AB \cos \frac{\pi}{6})^2} = \sqrt{(U_1 + \frac{U_2}{2})^2 + (U_2 \frac{\sqrt{3}}{2})^2} = \\ &= U_0 \sqrt{(\gamma_1 + \frac{\gamma_2}{2})^2 + (\gamma_2 \frac{\sqrt{3}}{2})^2} = U_0 \gamma_m \end{aligned}$$

Таким чином, при прийнятих умовах формування результуючого вектора, його модуль не залежить від аргументу ϕ (рис. 3, а), а годограф являє собою окружність (рис 3, б). Максимальний модуль будь-якого вектора напруги дорівнює модулю базового вектора $U_{max} = U_0$.

$$|U_{max}| = U_{max} = U_0 \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{U_d}{\sqrt{3}} \approx 0.577 U_d$$

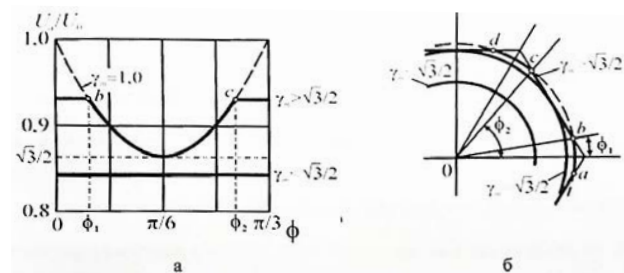


Рис. 3. Функція модуля результуючого вектора від кута – а), її годограф – б)

Базову площу векторів необхідно розбивати на сектори, число яких $N = 6$, або кратне 6. Це число визначає крок формування або кількість результуючих векторів, що у свою чергу визначає гармонійний склад вихідної напруги.

Для кожного з N секторів визначено відносні тривалості інтервалів. За допомогою лінійного розгорнення аналогічному розгорненню ШІМ формуються тимчасові інтервали та здійснюється комутація. На рис. 4 показано один з можливих алгоритмів роботи ШІМ із симетричним і несиметричним сигналом розгортки.

У цьому випадку в межах кожного сектора базових векторів буде формуватися шість результуючих з інтервалом в 10° .

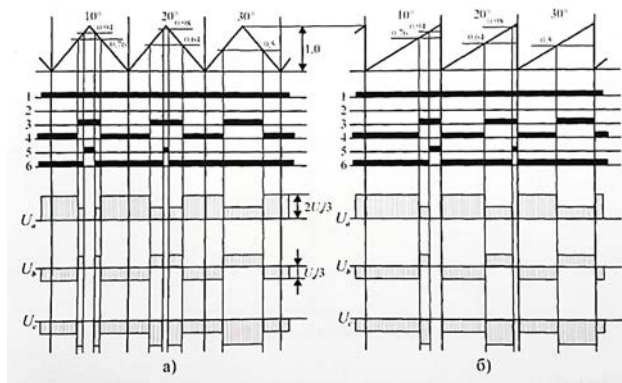


Рис. 4. Алгоритм роботи ШІМ із симетричним а) і несиметричним б) сигналом розгортки

На рис. 4 показані розрахункові рівні сигналів, стану ключів інвертора й вихідні фазні напруги для $\varphi=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$.

Іншими словами, процес модуляції розділяється на три тимчасових інтервали [10]. У першому інтервалі замикаються ключі, що відповідають стану вектора початкової границі сектора; у другому – вектору кінцевої границі сектора та в третьому замикаються або всі непарні, або всі парні ключі, формуючи нульовий вектор.

На рис. 5. наведено схему силових ключів 3-фазного автономного інвертора напруги (АІН). А всі можливі вісім базових векторів ШІМ при комутації відповідних силових ключів АІН наведені в таблиці 1, де 1/0 = влк./вимк. стан ключів АІН; +Vdc – напруга на "+" – шині постійного струму; -Vdc – напруга на "-" – шині постійного струму.

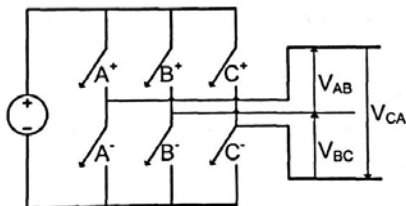


Рис. 5. Схема ключів 3-фазного автономного інвертора напруги

Можливі методи управління, які забезпечать таке виконання ШІМ: керування електроприводом підтримкою відношення U/f , відоме як Open-Loop Volts/Hertz Control, та регулювання швидкості в замкнутій системі автоматичного керування з компенсацією ковзання, відомий як Closed-Loop Speed Control with Slip Compensation.

Керування електроприводом підтримкою відношення U/f – цей метод широко застосовується у розімкнених системах автоматичного керування. Магнітний потік статора електродвигуна пропорційний відношенню напруги статора до його частоти.

$$\phi(t) = \int u(t) dt,$$

де $u(t) = \sqrt{2} \cdot V \sin(\omega \cdot t)$, тому

$$\phi(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\omega} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Так як двигун живиться від АІН змінною напругою зі змінною частотою, то при підтримці обертаючого моменту на рівні номінального та для виключення насичення заліза магнітної системи, необхідно зберігати постійним відношення В/Гц. Типова характеристика U/f показана на рис. 6, а.

На рис. 6, б наведена функціональна схема АІН. У зоні нульової частоти, на обмотки статора подається напруга на рівні $V0$ (бустерна напруга – voltage boost), необхідна для компенсації спадання напруги на активному опорі обмоток статора на низькій частоті.

Керування за законом $U/f = const$ використовується в електроприводах з низькими вимогами до динамічних показників, такими як насоси або вентилятори, де малі варіації частоти обертання ротора з навантаженням припустимі.

Регулятор напруги (РН) шини DC (DC Bus Voltage Regulator) побудовано за принципом ПІ-регулятора. На рис. 7 показаний РН шини DC.

Вхідними сигналами для регулятора напруги шини DC є бажане значення напруги на шині DC (V_{bus}^*) та дійсне значення напруги на шині DC (V_{bus}).

Таблиця 1

Базові вектори і відповідні їм комутації силових ключів АІН при ШІМ

Базовий вектор	A+	B+	C+	A-	B-	C-	VAB	VBC	VCA	Вектор
V0(000)	0	0	0	1	1	1	0	0	0	нульовий
V1(100)	1	0	0	0	1	1	+Vdc	0	-Vdc	активний
V2(110)	1	1	0	1	0	1	0	+Vdc	-Vdc	активний
V3(010)	0	1	0	1	0	1	-Vdc	+Vdc	0	активний
V4(011)	0	1	1	1	0	0	-Vdc	0	+Vdc	активний
V5(001)	0	0	1	1	1	0	0	-Vdc	+Vdc	активний
V6(101)	1	0	1	0	1	0	+Vdc	-Vdc	0	активний
V7(111)	1	1	1	0	0	0	0	0	0	нульовий

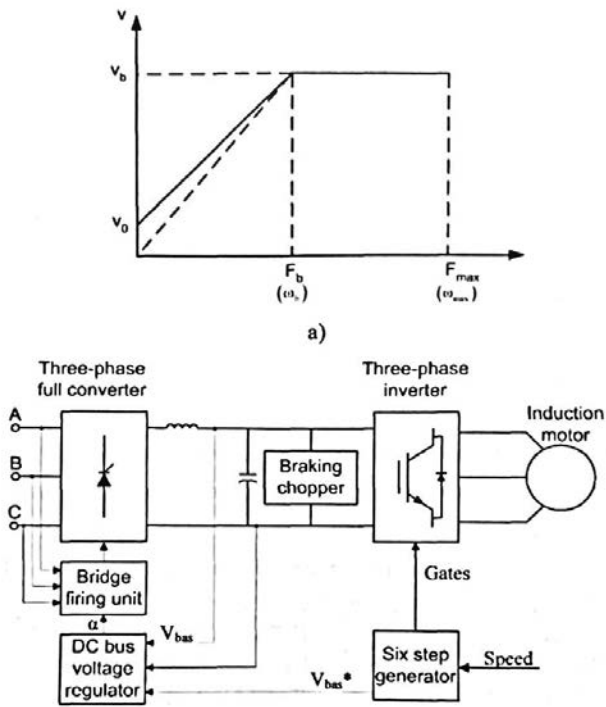


Рис. 6. Типова характеристика U/f (а) та функціональна схема АІН з регулюванням співвідношення (б)

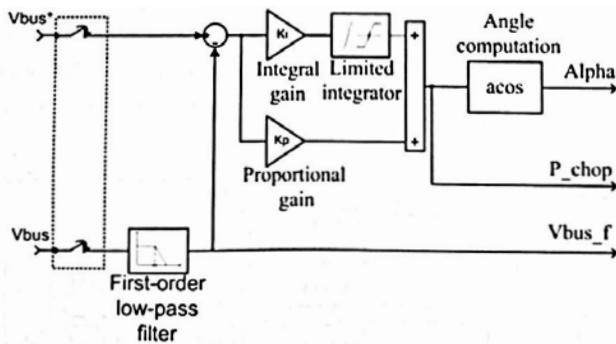


Рис. 7. Регулятор напруги шини DC

Вихідними сигналами є сигнал пропорційний куту відкриття ключів випрямляча (Alpha), сигнал керування гальмівним ключем (P_chop), та сигнал завдання для вихідної напруги інвертора (V_{bus_f}). Процес регулювання напруги наведено на рис. 8.

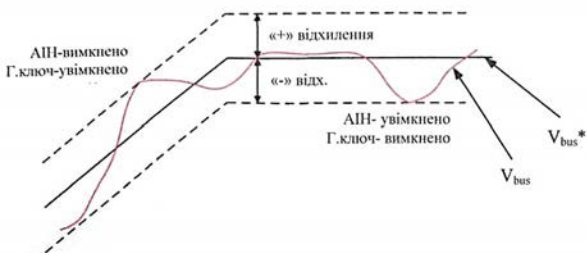


Рис. 8. Процес регулювання ланки постійного струму в АІН

Коли напруга шини зменшується, РН знижує установку кута відмикання випрямляча. Коли напруга шини збільшується, РН збільшує установку кута відмикання випрямляча.

Гальмівний ключ (Braking Chopper) працює із застосуванням гістерезисної логіки. Якщо напруга досягає верхньої гістерезисної межі, РН переходить у гальмовий режим, при цьому тиристорний випрямляч – вимикається і активізується ключ.

У режимі гальмування пропорційна дія РН залишається активною, але інтегральна складова відсутня тому, що динамічні характеристики ключа дуже високі, і інтегральна складова марна.

Коли напруга шини досягає гістерезисної нижньої межі, гальмівний ключ – вимикається, а тиристорний міст активується.

Генератор імпульсів (Six-Step Generator) містить шість компараторів, що виробляють імпульси для формування синусоїдальної напруги живлення двигуна. Допоміжна логіка (speed sign detection) дозволяє виконувати реверс двигуна, інвертуючи дві фази. На вхід генератора надходить сигнал від РН – V_{bus_f} та сигнал завдання швидкості двигуна S_p (Speed). На виходах генератора формуються сигнали керування гальмівним ключем V_{ctrl} , сигнал необхідної напруги шини DC – V_{bus}^* , який надходить до РН, та сигнали керування ключами.

Оскільки система розімкнена, то даний метод може бути використаний лише для пуску, тобто короткочасно, або в системах де не потрібно регулювання швидкості обертання.

Регулювання швидкості в замкнутій системі керування з компенсацією ковзання – цей спосіб полягає в регулюванні швидкості в замкнутій системі управління, з використанням стабілізації ковзання та підтримки співвідношення U/f . На рис. 9 зображено функціональну схему для такого способу управління електроприводом.

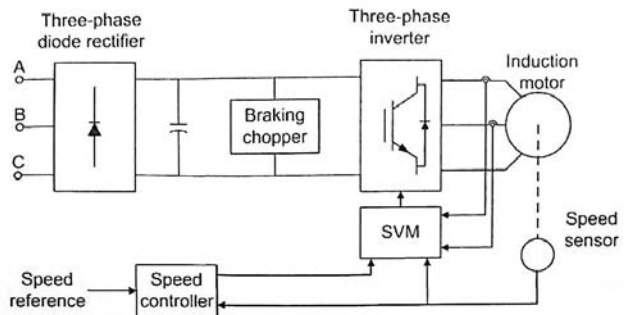


Рис. 9. Функціональна схема АІН з компенсацією ковзання та підтримкою співвідношення $U/f=const$

При цьому способі управління, задане ковзання сформоване ПІ-регулятором швидкості (РШ) (див.

рис. 10) зрівнюється з миттєвою частотою обертання ротора (вимірюється датчиком швидкості). Сигнал бажаної частоти перетворення від РШ, є вхідною величиною АІН для формування відповідної частоти вихідної напруги. Значення частоти використовується також для обчислення, відповідно до співвідношення U/f необхідного діючого значення напруги на виході перетворювача.

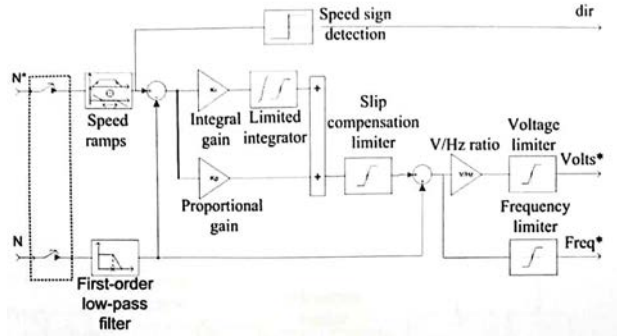


Рис. 10. Регулятор швидкості обертання асинхронного двигуна

Сам РШ складається з таких блоків: ФНЧ 1-го порядку (first-order low-pass filter), задатчика інтенсивності (speed ramps), підсилювача пропорційної складової (proportional gain), підсилювача інтегральної складової (integral gain), інтегратора з обмежувачем (limited integrator), компенсатора обмежувача ковзання (slip compensation limiter), детектора напрямку швидкості (speed sign detection) а також задатчика пропорції U/f та обмежувачів вихідних сигналів по напрузі та частоті для АІН.

Просторово-векторний модулятор (space vector modulator, SVM), містить сім блоків, показаних на рис. 11, а саме:

Трифазний генератор (three-phase generator) – генерує три синусоїди зі змінною частотою та амплітудою зрушених відносно один одного на кут 120° . Входами є частота та напруга інвертора;

Низькочастотний фільтр шини (low-pass bus filter) – використовується для обмеження швидких перехідних процесів при виміру напруги на шині DC. Цей сигнал використовується для обчислення вектора напруги живлення двигуна;

Альфа-бетта перетворювач (alpha beta transformation) – перетворює змінні трифазної системи у двофазну систему;

Альфа-бетта-векторний сектор використовується для визначення сектору на Альфа-бетта-площини, у якому лежить вектор напруги, Альфа-бетта-площина розділена на шість секторів по 60° ;

Генератор пилкоподібної напруги (ramp generator) – використовується для ШІМ керу-

вання. Використається як генератор розгортай для послідовності перемикачів;

Калькулятор часу перемикачів (switching time calculator) використовується, для обчислення моменту часу вмикання вектора напруги до двигуна. Вхід блоку – сектор, у якому лежить вектор напруги. Таким чином зручно керувати як швидкістю, так і прискоренням обертання ротору.

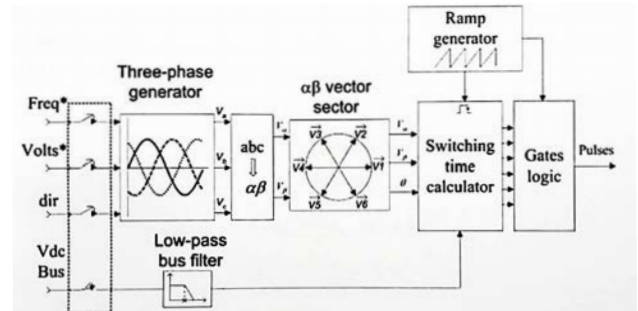


Рис. 11. Просторово-векторний модулятор

Отже, доцільно використовувати стандартну ШІМ з просторово-векторною модуляцією, схема цієї моделі показана на рис. 12.

В моделі АД живиться від АІН. ПІ-регулятор зі зворотнім зв'язком по швидкості використовується для створення магнітного потоку та формування заданого обертаючого моменту для блоку DTC.

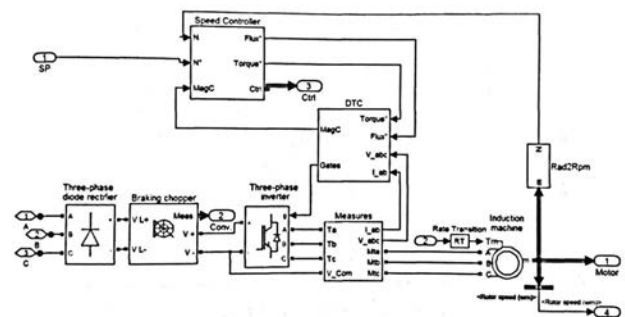


Рис. 12. Схема моделі управління за принципом ШІМ з просторово-векторною модуляцією

Блок DTC обчислює електромагнітний обертаючий момент, оцінює потік і порівнює їх з відповідними заданими значеннями. Сигнали з виходів компараторів зіставляються з таблицею комутації, що генерує перемикаючі імпульси для інвертора.

Силовa частина гальмівного блоку містить конденсатор великої ємності шини постійного струму а також ключ та активний опір для динамічного гальмування. Вмикання ключа приєднує гальмівний опір до ланки постійного струму АІН тим самим відбувається поглинання надлишкової енергії при уповільненні двигуна. Система керування гальмівним блоком є повністю самостійною

системою стабілізації напруги ланки постійного струму. Сигнал зворотного зв'язку що пропорційний діючій напрузі ланки постійного струму надходить на елемент зрівняння через фільтр низької частоти $1/z$ для знешкодження ВЧ компоненти (перешкод). У вузлі зрівняння сигнал зворотного зв'язку порівнюється зі значенням активації ключа. Якщо воно буде перевищено тобто напруга на шині DC зростатиме вище норми то сигнал помилки від підсилювача, надійде до нуля органа ($>=$) і відбудеться ШІМ модуляція цього сигналу відповідно до несучої частоти генератора пили (rampout). Водночас, відбувається контроль напруги на шині DC з боку однопозиційного перемикача з гістерезисною робочою характеристикою що дозволяє або забороняє модуляцію при незначних коливаннях напруги в межах допуску.

Таким чином, маємо результати, які представлені на рис. 13.

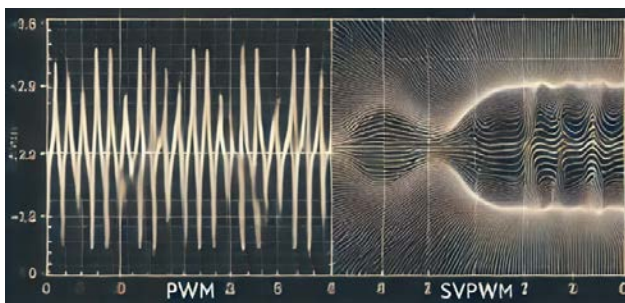


Рис. 13. ШІМ (зліва) та ПВШІМ (з права)

Як видно з рисунку 13, при використанні ШІМ спостерігається високий рівень гармоніки, що

негативно впливає на управління та електричну мережу при роботі з високо потужними двигунами а також низька якість синусоїдального виходу, що зменшує ККД а також підвищує температурний режим машини. Натомість, при використанні ПВШІМ ми бачимо більш плавний вихід та зменшення шумів.

Висновки. Використання просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ПВШІМ) покращує точність регулювання швидкості до 10–20% у порівнянні з класичним ШІМ, дозволяє зменшити гармонічні спотворення до 50% у порівнянні з ШІМ, що значно знижує втрати і підвищує ефективність. Також, з використанням технології компенсації ковзання точність управління при використанні просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ПВШІМ) підвищується на 10%. Завдяки використанню просторово-векторної модуляції, ПВШІМ забезпечує більш плавне керування напругою і струмом, що дозволяє точніше регулювати швидкість двигуна. Це особливо важливо в системах з високими вимогами до стабільності швидкості. Наприклад, у високоточних промислових приводах ПВШІМ може забезпечити стабільність швидкості з відхиленням не більше 2–3%. У приводах з підтримкою відношення U/f важливо зберігати постійне співвідношення між напругою і частотою для забезпечення стабільної роботи двигуна. ПВШІМ дозволяє краще підтримувати це співвідношення завдяки плавному регулюванню напруги, що знижує відхилення до 2–5%. Це особливо важливо для великих і високошвидкісних приводів.

Список літератури:

1. Сайт спільного українсько-німецького підприємства «Електронтранс» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://eltrans.electron.ua>.
2. Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementation. User guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.microsemi.com/documentportal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-softwareimplementation-user-guide.
3. Texas Instruments High Voltage Motor Control and PFC Developer's Kit – Retrieved from. <http://www.ti.com/tool/TMDSHVMTRPFCKIT>.
4. Яценко С. І. Контролер для векторного керування індукційним двигуном на базі програмованої логічної інтегральної схеми / С. І. Яценко, В. П. Войтенко, Р. Д. Єршов // Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2017): науково-практична конференція (м. Чернігів, 1 грудня 2017 р.) : тези доповідей. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – С. 45–47.
5. Chen W. Design of an FPGA-based space vector PWM generator for three-phase voltage-sourced inverters / Chen W., Pien C., Feng Y. // Proc. IEEE Power Energy Conf., Dec. – 2008. – P. 584–588.
6. Yang G. The design of SVPWM IP core based on FPGA / Yang G., Zhao P., Zhou Z. // Proc. IEEE Embedded Softw. Syst. Symp. – 2008. – Jul. – P. 191–196.
7. Tzou Y. FPGA realization of space-vector PWM control IC for three-phase PWM inverters / Tzou Y., Hsu H.-J. // IEEE Trans. Power Electron. – 1997. – Vol. 12, no. 6. – Nov. – P. 953–963.
8. Rekha K. R. Vashishtha S. Survey on FPGA Based Space Vector PWM Motion Control / K. R. Rekha // IJAREEIE. – 2015. – Vol. 4, issue 1. – Jan. – P. 282–288.

9. Space Vector Modulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Space_vector_modulation.

10. How To Generate Sine Samples in VHDL. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surf-vhdl.com/how-to-generate-sine-samples-in-vhdl/>.

Doshchenko H.G., Nahovskyi D.A. IMPLEMENTATION OF THE SPACE-VECTOR PULSE-WIDTH MODULATION UNIT FOR SHIPS HIGH-SPEED DRIVES

The paper analyzes a typical model of high-speed marine electric drives, as well as considers the application of space-vector pulse width modulation (SPWM) to control the operation of the inverter for high-speed drives.

Currently, the most effective method of controlling semiconductor converters is pulse width modulation (PWM). The use of PWM is a desire to increase the efficiency when building secondary power sources for electronic equipment and other nodes. PWM is widely implemented in automotive and marine inverters, chargers, and so on. The main problem in such systems is the quality and efficiency of the vector control process, which are almost completely dependent on the speed of the digital control system.

Traditional PWM methods are based on the comparison of the task signal with the linear sweep signal, as a result of which a sequence of rectangular pulses is formed in the windings of the synchronous motor (SD), the duty cycle of which changes according to the task signal. However, due to the influence of electromagnetic processes (primarily the EMF of rotation), the nature of the change in the currents in the windings does not have an unequivocal relationship with the law of the change of the control signal and strongly depends on the mode of operation of the synchronous motor.

Thanks to the use of space-vector pulse-width modulation, which provides smoother control of voltage and current, which allows more precise regulation of motor speed. This is especially important in systems with high requirements for speed stability.

In high-precision industrial drives, space-vector pulse width modulation can ensure speed stability with a deviation of no more than 2–3%. In drives with U/f ratio support, it is important to maintain a constant ratio between voltage and frequency to ensure stable motor operation. Spatial-vector pulse-width modulation allows you to better maintain this ratio thanks to smooth voltage regulation, which reduces the deviation to 2–5%. This is especially important for large and high-speed marine electric drives.

Key words: *synchronous motor (SM), main electrical installation (MEI), main electric motor (MEM), space-vector pulse-width modulation (SVPWM), pulse width modulation (PWM), inverter.*