

# ОГЛЯД МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ МЕРТВОГО ЧАСУ ІНВЕРТОРА НАПРУГИ

Отрошко А.О., студ., Пижов В.М., к.т.н., доц.

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

**Вступ.** Під час практичної реалізації алгоритмів формування ШІМ (широотно-імпульсна модуляція) стикаються з необхідністю введення мертвого часу для ключів інвертора для запобігання короткого замикання у стійці інвертора, що призводить до зміщення кінцевого часу закриття та відкриття. Така зміна в сигналі ШІМ призводить до зниження амплітуди вихідної напруги інвертора, підвищення складу вищих гармонік. В електромеханічних системах з двигунами змінного струму наявність мертвого часу призводить до погіршення показників якості керування, і навіть до втрати стійкості. Не зважаючи на значну кількість публікацій за тематикою компенсації мертвого часу інвертора, повного вирішення цієї проблеми до цього часу не знайдено.

**Мета роботи.** Метою даної статті є огляд існуючих методів компенсації мертвого часу інвертора, а також порівняння їх ефективності.

**Матеріали і результати досліджень.** В основі *першої групи* методів лежить принцип розімкненої прямої компенсації (open-loop feedforward control). Алгоритм керування інвертором пропонується реалізувати за допомогою коригуючої ланки, яка вводиться перед об'єктом керування і створює компенсуючий вплив на блок генерації ШІМ для інвертора.

Типовим для даної групи методів є метод, який описано в роботі [1]. Тут похибку відпрацювання напруги пропонується представити як нелінійність, що введена в об'єкт керування, і потім компенсувати її за допомогою введення нелінійності в алгоритм керування.

Вплив мертвого часу на вихідний сигнал можна проілюструвати за допомогою часових діаграм, зображених на рис. 1.

На рисунку введені наступні позначення:  $T_d$  – мертвий час,  $e$  – похибка відпрацювання напруги,  $V_i(t)$  – завдання напруги,  $V_c(t)$  – опорна напруга,  $V_1(t)$  та  $V_2(t)$  – сигнали перемикання верхнього та нижнього ключів стійки згідно ідеальної ШІМ,  $V_{g1}(t)$  та  $V_{g2}(t)$  – сигналу керування з урахуванням мертвого часу,  $V_a(t)$  – значення вихідної напруги,  $E = \frac{V_{dc}}{2}$ , де  $V_{dc}$  - напруга ланки постійного струму.

В залежності від напрямку струму в одній з фаз вихідної напруги, сигнал напруги, що прикладається до навантаження, буде включати в себе додатну або від'ємну похибку. Середнє значення цієї похибки можна визначити згідно залежності (1), [1]:

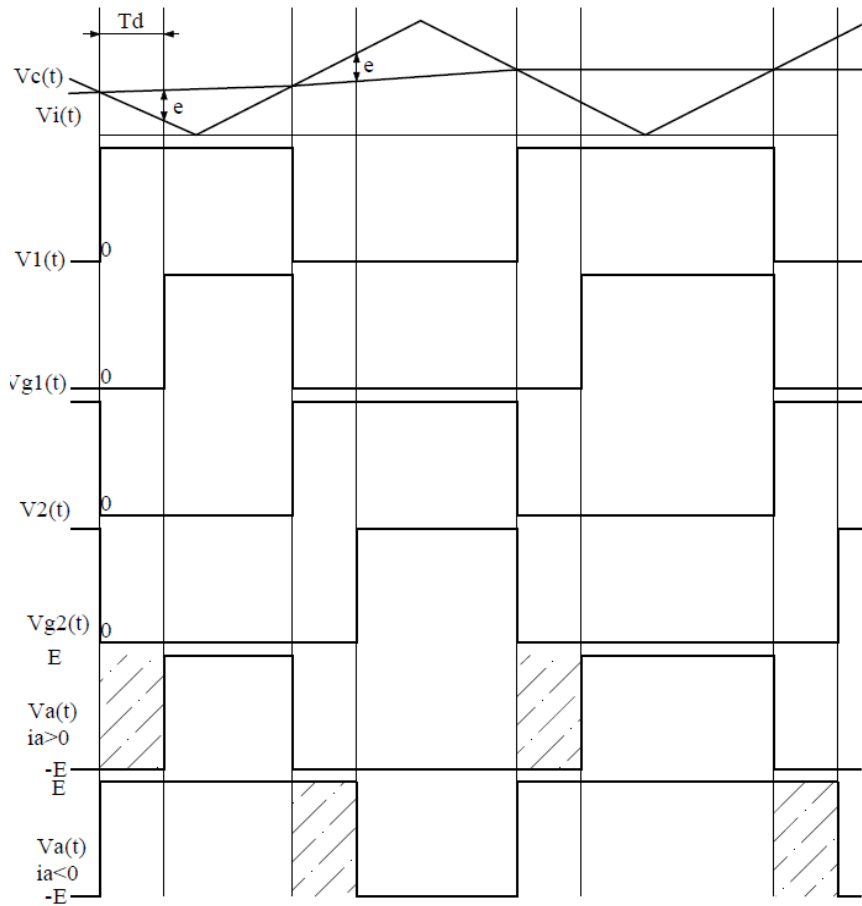


Рисунок 1 – Часові діаграми сигналів ШІМ

$$e = T_d \frac{2V_c}{T_c / 2} = 4f_c T_d V_c \quad (1)$$

де  $T_d$  - мертвий час інвертора,  $V_c$  - амплітуда опорної напруги,  $f_c, T_c$  - частота та період опорної напруги.

Протягом періоду струму, вплив мертвого часу можна представити як нелінійну функцію типу реле з гістерезисом, що зображено на рис. 2.

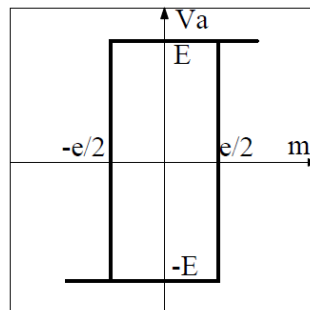


Рисунок 2 – Нелінійність інвертора з урахуванням мертвого часу

На рисунку введено позначення:  $\delta(t) = Vi(t) - Vc(t)$ ;  $f(\delta)$  - блок прямої компенсації;  $\varepsilon(t) = Vi(t) - f(\delta) - Vc(t)$ ;  $m = \varepsilon + \frac{e}{2}$ , при  $i_a < 0$ ;  $m = \varepsilon - \frac{e}{2}$ , при  $i_a > 0$ ;  $i_a$  - струм навантаження.

Тому для компенсації в [1] пропонується ввести гістерезисну нелінійність  $f(\varepsilon)$ , що буде оберненою до наведеної на рис. 2 так, як показано на рис. 3.

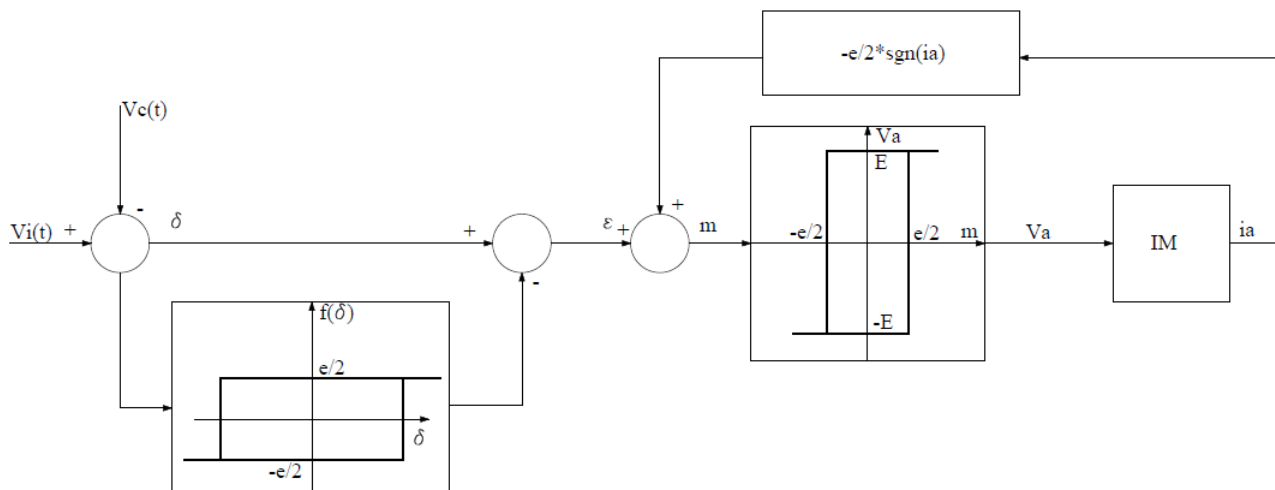


Рисунок 3 – Схема запропонованого методу компенсації

Також для компенсації використовують інші нелінійності такі як: зона нечутливості, знакозмінна функція (sign) або експериментально отримана нелінійність, що може базуватися на даних про значення похибки струму [2]. Зазвичай, найкращих результатів можна досягнути використовуючи емпіричні нелінійності які отримуються при певних режимах роботи конкретного інвертора.

Методи, що базуються на принципі розімкненої прямої компенсації, можна охарактеризувати як прості у реалізації, які не потребують встановлення датчиків. В той же час, зміна параметрів об'єкту керування призводить до погіршення ефективності компенсації. Це означає, що дані методи можуть використовуватися лише для компенсації мертвого часу при тривалому режимі роботи електроприводу. Застосування методів з розімкненою прямою компенсацією дозволяє знизити похибку відпрацювання вихідної напруги інвертора в тривалому режимі роботи у 2-4 рази [1, 2].

Друга група методів компенсації базується на інформації про струм, що протікає в навантаженні. На рис. 4 приведено алгоритм компенсації згідно з [3].

Значення часу компенсації визначається на основі параметрів силових ключів і визначається згідно (2), що наведено в [3].

$$T_{com} = t_{on} - t_{off} + \frac{(V_{ce} + V_d)T}{2V_{dc}} \quad (2)$$

де  $t_{on}, t_{off}$  - час затримки при увімкненні та вимкненні відповідно;  $V_{ce}, V_d$  - падіння напруги на ключі та зворотному діоді;  $T$  - період перемикування ключів.

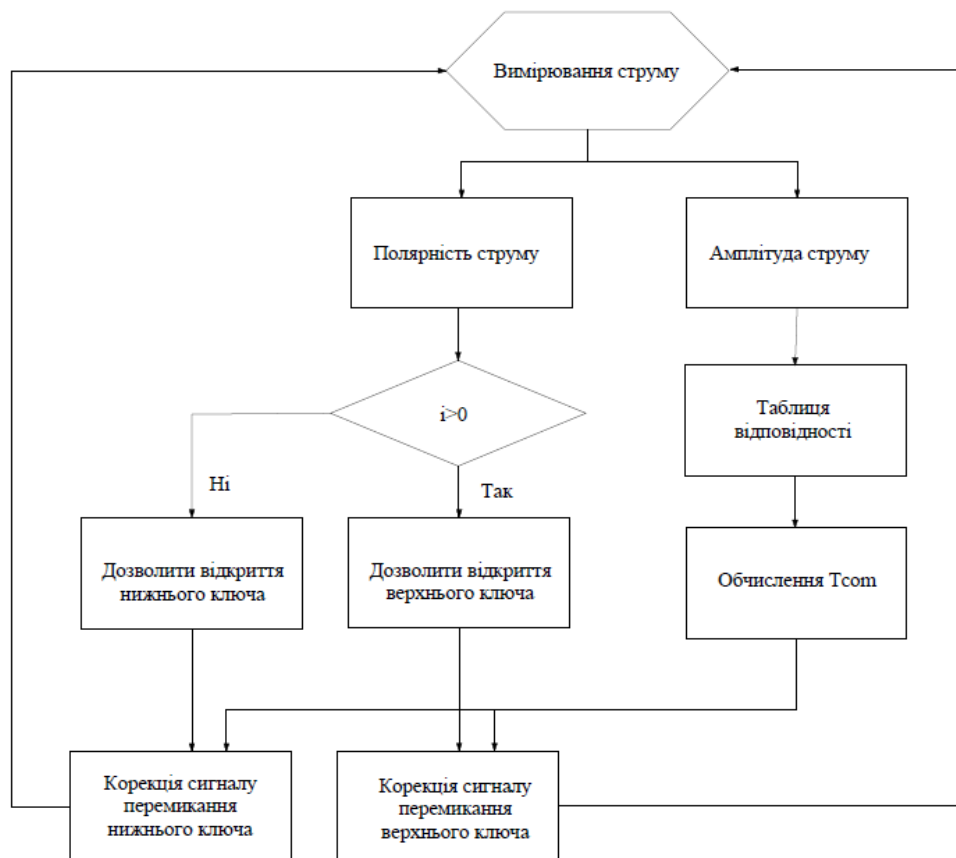


Рисунок 4 – Алгоритм компенсації мертвого часу із використанням зворотного зв'язку за струмом

Вираз (2) містить величини  $t_{on}, t_{off}$  та  $V_{ce}, V_d$ , точне визначення яких є ускладненим через їх залежність від режимів роботи силових ключів. Тому ці величини пропонується визначати за таблицею відповідності на основі інформації про амплітуду струму. Таблиця відповідності може бути отримана експериментально. Отримані величини  $t_{on}, t_{off}, V_{ce}, V_d$  використовуються при обчисленні часу компенсації, який додається до сигналу завдання блоку генерації ШІМ.

Згідно до алгоритму, що наведений на рис. 4, коректна робота методу компенсації залежить від визначення моменту зміни полярності з високою точністю. Зазвичай для визначення полярності струму використовуються компаратори у яких до одного з входів під'єднано сигнал нульової напруги, а до другого сигнал з датчика струму. Проте через зміщення нульової напруги та наявності коливальних у сигналі з датчика струму, робота такої схеми не завжди є коректною. Тому проблему визначення напрямку протікання струму намагаються вирішувати за допомогою різного роду спостерігачів.

Для формування сигналу компенсації може використовуватися і більш детальний аналіз сигналу струму. Наприклад, в [4] система компенсації базується на аналізі гармонійного складу сигналу з датчика струму. Схема компенсації наведена на рис. 5, де позначено:  $U_{ref}$  – завдання напруги,  $U_{comp}$  – компенсаційна напруга, ІМ (Induction Motor) – асинхронний двигун, HD (Harmonic Distortion) – функція гармонійного спотворення струму.

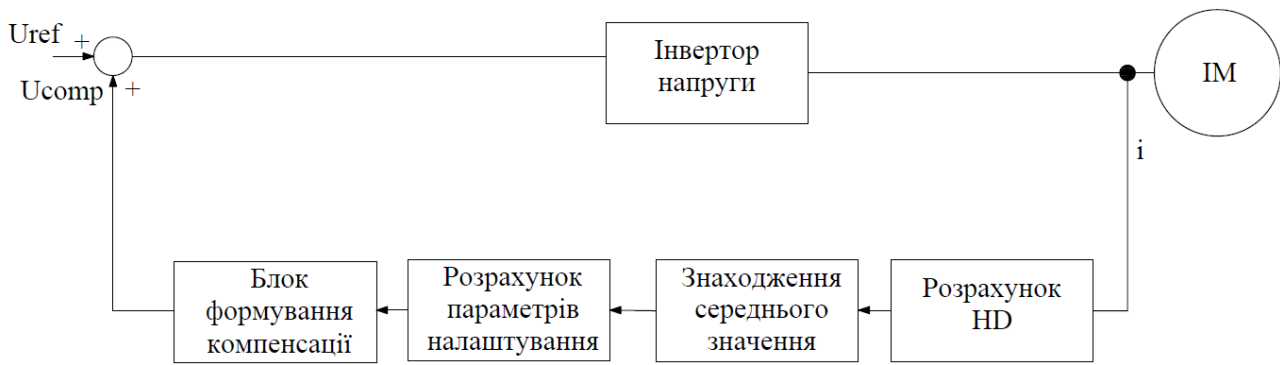


Рисунок 5 – Модель компенсації мертвого часу з аналізом гармонійного складу сигналу струму

Компенсаційна напруга визначається за наступним виразом, [4]:

$$U_{comp}(i) = \begin{cases} -\frac{\Delta T}{T_c} V_{dc} - \frac{C_{TD} V_{dc}^2}{T_c i}, & i \leq -\frac{2C_{TD}}{\Delta T} V_{dc} \\ \frac{\Delta T^2}{4C_{TD} T_c} i, & -\frac{2C_{TD}}{\Delta T} V_{dc} < i < \frac{2C_{TD}}{\Delta T} V_{dc} \\ \frac{\Delta T}{T_c} V_{dc} - \frac{C_{TD} V_{dc}^2}{T_c i}, & i \geq \frac{2C_{TD}}{\Delta T} V_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

де  $U_{comp}$  - значення компенсаційної напруги,  $T_c$  - період опорної напруги,  $\Delta T$  і  $C_{TD}$  є параметрами налаштування системи.

Вимірний сигнал струму розкладається на гармонічні складові за допомогою дискретного перетворення Фур'є. Далі знаходиться значення функції HD згідно з формулою (4), яку наведено у [4]:

$$HD(\Delta T, C_{TD}) = \frac{I_5^2 + I_7^2}{I_1^2}, \quad (4)$$

де  $I_1, I_5, I_7$  - амплітуди 1, 5 та 7 гармонік струму, відповідно.

Потім знаходиться середнє значення функції HD за два сусідні такти. Наступним кроком є визначення таких значень аргументів функції  $\Delta T, C_{TD}$  при яких функція HD буде в локальному мінімумі. Пошук значень аргументів відбувається за допомогою методу градієнтного спуску. Останнім етапом є розрахунок  $V_{comp}$  згідно з (3). Розрахунок нових  $\Delta T, C_{TD}$  відбувається до тих пір, поки алгоритм градієнтного спуску не увійде у насичення, тобто поки не буде знайдено абсолютний мінімум функції HD.

Для побудови системи компенсації із зворотнім зв'язком необхідно встановлювати датчик струму, фільтрувати та апроксимувати сигнал з датчику, зменшувати час квантування сигналу, що призводить до підвищення вартості системи керування. Проте такі вкладення дозволяють зменшити похибку

відпрацювання вихідної напруги інвертора у 4-5 разів за методом [3] та у 10-20 для методу [4].

До *третьої групи* можна віднести методи, де корекція вихідної напруги відбувається за допомогою застосування нестандартних технічних та програмних засобів. Так, в статті [5] пропонується застосувати дванадцятьвекторну модель генерації ШІМ, в [6] використовувати два інвертори що працюють на одне навантаження по черзі, в [7] застосовувати два окремі джерела генерації ШІМ задля керування двома ключами на одній стійці, а у [8] генерувати ШІМ у формі трапецій, а не прямокутників.

Результати методів з третьої групи зазвичай приводяться у вигляді теоретичних моделей та графіків отриманих завдяки симуляції. Неможливість або економічна недоцільність їх застосування і є найбільш суттєвою проблемою таких методів.

**Висновки.** Методи компенсації впливу мертвого часу інвертора можна поділити на три умовні групи, найефективнішими з яких є методи із використанням зворотного зв'язку за струмом, найкращі з яких дозволяють знизити похибку відпрацювання напруги до рівня 10-20 разів нижче за незкомпенсовані системи. Це хоч і позитивно впливає на роботу електромеханічних систем з інверторами напруги, але повністю проблему компенсації наслідків ефекту мертвого часу не усуває. Тому існуючі схеми компенсації пропонується розвивати у наступних напрямках: підвищення точності оцінювання процесів в інверторі – уточнення математичних моделей фізичних елементів, уточнення оцінювання впливу паразитних елементів; підвищення надійності вузлів визначення полярності струму навантаження – застосування нових схем, високошвидкісних компараторів; заміна таблиць відповідності на нейронні мережі, задля швидкої і ефективної оцінки параметрів налаштування системи компенсації.

#### Перелік посилань

1. J.L. Lin, "A new approach of dead-time compensation for PWM voltage inverters," IEEE Trans. Circ. Systems., pp.476-483, 49/4, 2002.
2. Schellekens, J.M., Bierbooms, R.A.M., & Duarte, J.L., "Dead-Time Compensation for PWM Amplifiers using Simple Feed-forward Techniques," XIX International Conference on Electrical Machines, 52(6), pp. 323-329, 2010.
3. Z. Lin, F.L. Luo, "An accurate approach of dead-time compensation for three phase DC/AC inverter", ICIEA, 2009.
4. A. Cichowski, J. Niesznanski, "Self-tuning dead-time compensation method for voltage-source inverters", IEEE power electronics letters, 2005.
5. L. Mao, X. Wang, R. Na, Y. Cao, "Study of a Novel Dead-Time Compensation Method for SVPW," The 6th International Forum on Strategic Technology, pp.278-282, 2011.
6. R. Maheshwari, G. Gohil, L. Bede, S. Munk-Nielsen, "Effect of Dead-time Inteleaved PWM for Two Parallel-Connected Inverters", IEEE Trans. Circ. Systems., pp.71-77, 2014.
7. D.B.R. Weerakoon, B.L.L. Sandaruwan, R.T.T. De Silva, S.G. Abeyratne, D.B. Rathnayake, "A Novel Dead-Time Compensation Scheme for PWM VSI Drives", IEEE, 2016.
8. J.-W. Lim, H. Bu, Y. Cho, "Novel Dead-time Compensation Strategy for wide current range in three-phase inverter", IEEE power electronics letters, 2018.