

УДК 621.313

doi:10.20998/2413-4295.2026.01.06

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

О. А. СМІЯН, Л. В. ФЕТЮХІНА, О. А. БУТОВА\*

кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА  
\*e-mail: Olha.Butova@khp.edu.ua

**АНОТАЦІЯ** З початком масового використання електродвигунів, колекторні та асинхронні двигуни чітко закріпились у якості найпоширеніших. Колекторні двигуни є зручними для використання у малих та компактних пристроях, тоді як асинхронні двигуни є потужними, надійними та легкими для впровадження, зберігаючи досить просту конструкцію. Разом з тим розвиток матеріалознавства призвів до створення потужних та стійких до зовнішніх умов неодимових магнітів, що докорінно змінюють ситуацію. Вони дозволяють застосувати іншу будову ротора, ніж у асинхронних двигунів, формуючи синхронний двигун та відкриваючи шлях до його застосування у нових сферах. Незмінною перевагою синхронних двигунів є можливість точного та передбачуваного керування їх характеристиками – такими як положення ротора та/або частота обертання. Враховуючи це вони завжди мали і наразі займають досить широку нішу у сфері створення високоточного спеціалізованого обладнання. Особливу роль ця точність відіграє у медичному обладнанні, наприклад у системах МРТ, системах вентиляції легень, маніпуляторах, перистальтичних насосах, хімічних центрифугах. У зв'язку з цим, метою цієї роботи є створення системи керування режимами та частотами роботи синхронного двигуна з постійними магнітами та проведення прикладних випробувань. Це потрібно для виявлення та дослідження особливостей роботи такої системи, щоб мати необхідні дані для покращення та вдосконалення подібних систем. Особливу увагу було приділено способам реалізації методу широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) сигналів у програмній частині пристрою, а саме способу визначення та встановлення тривалості поточного імпульсу. Запропоновано систему керування двофазним синхронним двигуном з постійними магнітами на базі мікроконтролера STM32 та повномостових інверторів, що забезпечує високу точність позиціонування. За результатами експериментальних досліджень зроблено аналіз причин спотворення вихідного сигналу та обгрунтовано концепцію активного розрядження котушок статора під час пауз ШИМ для підвищення стабільності роботи приводу.

**Ключові слова:** синхронний двигун; повномостовий інвертор; широтно-імпульсна модуляція; система керування; мікроконтролер.

## CONTROL SYSTEM FOR SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

O. SMIAN, L. FETIUKHINA, O. BUTOVA

Department of industrial and biomedical electronics, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** With the beginning of the mass use of electric motors, collector and asynchronous motors have clearly established themselves as the most common. Collector motors are convenient for use in small and compact devices, while asynchronous motors are powerful, reliable and easy to implement, while maintaining a fairly simple design. At the same time, the development of materials science has led to the creation of powerful and resistant to external conditions neodymium magnets, which drastically changes the situation. They allow the use of a different rotor structure than in asynchronous motors, forming a synchronous motor and opening the way to its application in new areas. The constant advantage of synchronous motors lies in the ability to precisely and predictably control their characteristics - such as rotor position and/or speed. Considering the latter, they have always had and currently occupy a fairly wide niche in the field of high-precision specialized equipment. This precision plays a particularly important role in medical equipment, such as MRI systems, lung ventilation systems, manipulators, peristaltic pumps, and chemical centrifuges. In this regard, the objective of this project is to develop a control system for the operating modes and frequencies of a permanent magnet synchronous motor and to conduct applied testing. This is necessary to identify and study the features of the operation of such a system in order to have the necessary data for improving and upgrading such systems. Special attention was paid to the methods of implementing the method of pulse-width modulation (PWM) of signals in the software part of the device, namely the method of determining and setting the duration of the current pulse. A control system for a two-phase permanent magnet synchronous motor based on an STM32 microcontroller and full-bridge inverters is proposed, which ensures high positioning accuracy. Based on the results of experimental studies, an analysis of the causes of output signal distortion was performed, and the concept of active discharge of the stator coils during PWM pauses was justified to improve the stability of the drive operation.

**Key words:** synchronous motor; full-bridge inverter; pulse-width modulation; control system; microcontroller.

### Вступ

Сучасний етап розвитку технологій характеризується стрімким підвищенням вимог до точності, якості та функціональних можливостей обладнання в різних галузях. Особливого значення це

набуває в медицині, де від прецизійності роботи механізмів безпосередньо залежить життя та здоров'я пацієнтів. Високі технічні характеристики синхронних двигунів з постійними магнітами (PMSM) зумовлюють їхню популярність у медичній сфері, зокрема в системах ШВЛ (штучна вентиляція легень),

магнітно-резонансних томографах та хірургічних маніпуляторах (наприклад, системи «Da Vinci»), лабораторних центрифугах та перистальтичних насосах, де особливо важливими є стабільне обертання та точне позиціонування [1,2].

У сучасних наукових роботах, присвячених еволюції електроприводів, значна увага приділяється порівняльному аналізу безколекторних двигунів постійного струму (BLDC) та PMSM, оскільки обидва типи базуються на використанні потужних неодимових магнітів для покращення основних технічних характеристик [3].

Технологія BLDC характеризується використанням однополярного струму, що відіграє особливо важливу роль у пристроях, що мають акумуляторне джерело живлення або обмежених у виборі компонентної бази. Основною перевагою цього метода є досягнення чітко контрольованої частоти обертання валу без використання ковзного контакту. Водночас у технології PMSM зазвичай використовується більша кількість пар магнітів, а сигнал подається максимально наближений до двополярної синусоїди. Таким чином досягається один з найбільш точних режимів роботи електродвигуна [3,4].

Однією з головних проблем у PMSM є нелінійна зміна параметрів системи які спричинені магнітним насиченням, перехресним зв'язком та коливаннями температури, що може призвести до появи пульсацій моменту та погіршення роботи системи. Такі деструктивні чинники провокують виникнення пульсацій крутного моменту, що суттєво погіршує динамічні характеристики електроприводу та точність його позиціонування [5]. Ефективна експлуатація PMSM потребує впровадження інноваційних методів регулювання потужності, де пріоритетним завданням є точне обмеження струму у вихідному колі. Це дозволяє компенсувати нелінійності та забезпечити стабільність роботи системи в умовах змінного навантаження.

Однак історично, базові методи, такі як використання параметричних ланцюгів (резисторів та транзисторів у лінійному режимі), хоч і є простими у впровадженні, але мають термічну нестабільність характеристик – низьку ефективність через суттєві втрати потужності на тепло та нестабільність характеристик при зміні температури. Дрейфи цих двох факторів почнуть накладатись одне на одного, тому цей підхід з параметричними чи подібними ланцюгами не здатний забезпечити стабільну роботу прецизійного обладнання. Тому існує необхідність переходу до більш досконалих імпульсних методів керування, які мінімізують теплові втрати та гарантують сталість вихідних параметрів системи [6].

Сучасні високопродуктивні системи керування електроприводами базуються на застосуванні перетворювальних структур на базі інверторних схем та вдосконалених методів керування для досягнення високої динаміки, точності позиціонування та

енергоефективності. Класичний метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), заснований на зміні тривалості імпульсів при фіксованій частоті перемикання, керує середньою потужністю, що подається на навантаження, та є енергоефективним за рахунок мінімізації втрат у силових ключах, які перебувають переважно в повністю відкритому або закритому стані. Використання специфічних алгоритмів керування коефіцієнтом заповнення сигналу напруги дозволяє встановити чітку лінійну залежність між параметрами сигналу та швидкістю обертання двигуна.

Наразі для керування PMSM використовуються декілька методів, що забезпечують високу точність, ефективність і динамічну реакцію. Основними методами є векторне управління (Field Oriented Control, FOC), пряме управління моментом (Direct Torque Control, DTC), скалярне управління (вольт-частотне, V/f) та методи без датчиків (sensorless), що використовують ШІМ (наприклад, просторо-векторна SVPWM) для формування синусоїдальних струмів [7-10].

ШІМ керування широко застосовується в приводах PMSM і класифікується на безперервні ШІМ та дискретні ШІМ (DPWM). Безперервні ШІМ більш поширені в приводах PMSM, проте їхні характеристики помітно погіршуються в області високого індексу модуляції порівняно з DPWM [11].

Завдяки використанню спеціальних мікроконтролерних алгоритмів, ШІМ, як найпоширеніша технологія, дає змогу формувати аналогові сигнали довільної конфігурації, у тому числі ідеальну синусоїду. Це безпосередньо впливає на підвищення точності регулювання та надійності роботи електродвигунів [12-15].

Таким чином, дослідження та вдосконалення методів управління синхронними двигунами з постійними магнітами, зокрема на основі ШІМ, є актуальним науково-технічним завданням. Його вирішення прямо впливає на підвищення точності, надійності та енергоефективності медичної апаратури нового покоління. Однак для досягнення максимальної продуктивності конкретного пристрою необхідно проводити комплексну оптимізацію параметрів системи керування з урахуванням динаміки навантаження та особливостей виконання технологічних операцій.

### Мета роботи

Метою є розробка системи керування режимами та частотами роботи синхронного двигуна з постійними магнітами, а також проведення її прикладних випробувань для отримання даних, необхідних для вдосконалення подібних систем. Задачі дослідження включають в себе проектування регульованого повномостового інвертора, реалізацію програмних методів ШІМ та верифікацію роботи алгоритмів на фізичному прототипі в умовах, наближених до реальної експлуатації, а також

виявлення особливостей взаємодії системи керування з високоіндуктивним навантаженням для формування рекомендацій щодо підвищення точності та надійності прецизійного обладнання, зокрема у медичній галузі.

### Виклад основного матеріалу

Розробка була спрямована на створення регульованого інвертора, що поєднує інвертор, систему керування та програмні алгоритми для максимально точного моделювання сигналів. Вибір типу інвертора в наданому завданні здебільшого базується на формі сигналів, що задані умовами (рис. 1), де А та В – фази статора, Т – період сигналу.

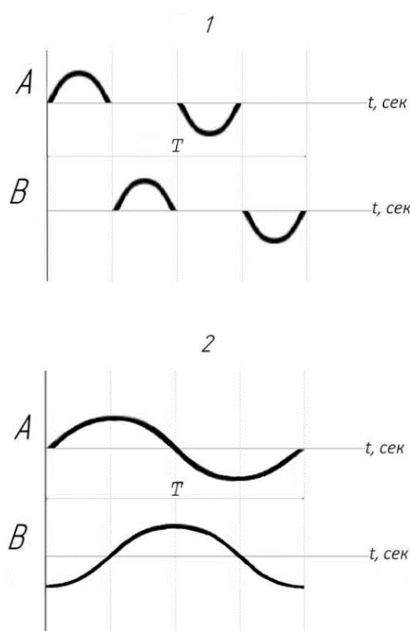


Рис. 1 – Варіації сигналів «1» та «2», що можуть подаватись на двигун

Через особливості форми сигналу «1» для виконання завдання необхідно реалізувати саме повномостовий інвертор. Враховуючи те, що фаз у статора дві – то й у пристрої має стояти два окремих інвертори.

Аналіз загальної структури розробленої системи керування синхронним двигуном базується на блок-схемі, наведеної на рис. 2. Основними функціональними вузлами пристрою, що працюють у режимі високого навантаження, є інвертори, які забезпечують формування вихідних сигналів необхідної форми та частоти. Відповідно, критично важливими елементами силового ланцюга є напівпровідникові ключі (транзистори та діоди), оскільки саме їхні технічні характеристики визначають граничну потужність навантаження, яку

здатна підтримувати система (згідно з технічним завданням – до 2 кВт при струмі 20 А).

Незважаючи на те, що застосування методу ШІМ характеризується високою енергоефективністю, процес комутації великих струмів супроводжується виділенням суттєвої кількості теплової енергії у силових ключах. З метою забезпечення надійності системи та запобігання тепловому дрейфу характеристик логічних компонентів, конструкцією передбачено комплекс заходів терморегуляції. Він включає в себе встановлення індивідуальних радіаторів на транзистори, перфорацію корпусу та встановлення кулерів на корпус для формування системи активного повітряного охолодження для інтенсивного відведення тепла.

Враховуючи експериментальний характер розробки та необхідність проведення верифікаційних випробувань, у пристрої реалізовано модульний підхід до з'єднань. Зокрема, підключення джерела постійного струму та обмоток статора двигуна здійснюється через силові клемми. Така конструктивна реалізація забезпечує гнучкість при налагодженні системи, дозволяє оперативно інтегрувати вимірювальне обладнання для зняття характеристик, а також спрощує процес тестування різних конфігурацій підключення та заміни окремих компонентів системи.

Проектування апаратної частини системи керування базується на необхідності забезпечення стабільної роботи приводу при пікових навантаженнях до 2 кВт (100 В, 20 А). Для підвищення надійності та безпеки експлуатації в медичних умовах – вибір усіх ключових компонентів здійснювався з урахуванням 50% запасу за характеристиками. Робочий температурний діапазон системи визначено відповідно до стандартних умов приміщення ( $T_{amb} = 25^\circ$ ), проте параметри напівпровідникових елементів розраховані на значно ширший діапазон зовнішніх умов.

Вибір частоти ШІМ ( $f_{PWM}$ ) є критичним фактором, від якого залежать пульсації напруги та акустичний шум. Мінімально допустима частота ( $f_{PWMmin}$ ) розраховується на основі параметрів обмоток статора ( $L=12,12$  мГн,  $R=1,3$  Ом) за формулою, що враховує сталу часу ланцюга.

Для реалізації заданих форм сигналів, зокрема варіанту з паузами між півхвилями, обрано структуру повномостового інвертора (H-мосту). На відміну від однотактних або напівмостових схем, повномостова топологія забезпечує: повну амплітуду вихідної напруги, величина якої дорівнює величині напруги живлення (100 В); свободу генерації двополярних сигналів будь-якої складності; відсутність ризику перенасичення конденсаторів або трансформаторів при низьких частотах вихідного сигналу (0,5-5 Гц).

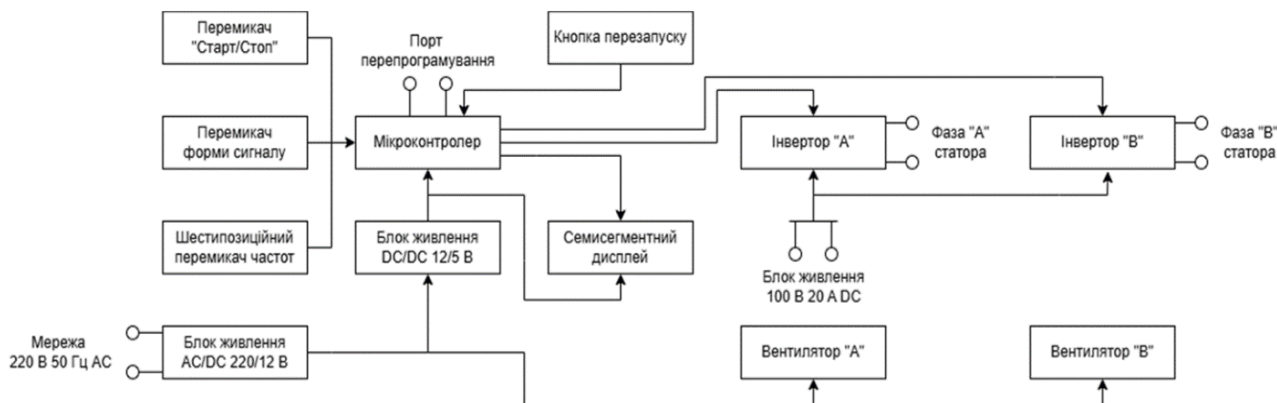


Рис. 2 – Блок схема пристрою керування роботою синхронного двигуна з двома фазами статора

Силова частина реалізована на базі N-канальних MOSFET-транзисторів IRFP250NPbF, що керуються драйверами IR2110. Схема керування, що створена на основі мікроконтролера STM32F103CBT6, має декілька механізмів захисту від перенавантаження чи іншого роду збоїв у роботі.

**Гальванічна розв'язка:** використання оптопар між мікроконтролером та драйвером для повної ізоляції 100 В силовій частині від логічного блоку мікроконтролера.

**Апаратна логіка захисту:** впровадження вхідного логічного каскаду на біполярних транзисторах, що унеможливує подачу комбінацій сигналів, які призводять до короткого замикання («наскрізних струмів»).

**Струмівий моніторинг:** інтеграція датчика Холла ACS723, який фіксує значення струму у вихідному колі кожні 5 мкс, та автоматичне відключення системи при перевищенні порогу 20 А.

Для забезпечення стабільної роботи силових ключів у конструкції передбачено систему активного охолодження, що включає в себе радіатори D01PA та кулери, здатні розсіювати до 60 Вт теплової потужності, що вдвічі перевищує розраховані втрати перемикачів та провідності (30 Вт).

Процес програмного формування ШІМ-сигналів у системі керування синхронним двигуном на основі мікроконтролера спрямований на забезпечення 12 варіацій вихідного сигналу, що поєднують дві форми та шість частот (від 0,5 до 5 Гц). Для забезпечення безперебійної роботи та запобігання збоєм через тривалі обчислення, замість прорахунку складних формул протягом кожного імпульсу, застосовується набір попередньо обчислених масивів даних. Для отримання кінцевого значення тривалості імпульсу використовувалось два методи.

Метод програмного розрахунку точок полягає в тому, що всі необхідні обчислення параметрів синусоїди виконуються мікроконтролером на етапі ініціалізації обраного режиму.

Цей метод полягає у використанні формули, завдяки якій обчислюється кожна точка напряду програмою. В такому варіанті для формування різних частот вихідного сигналу можна робити перерахунок відносно різної кількості точок масиву або різних частот ШІМ. Залежно від умов використання можна мінімізувати або час запису тривалості імпульсу у регістр таймера, або обсяг пам'яті, необхідний для роботи програми.

Для підвищення швидкодії обчислень під час ініціалізації обраного режиму запускається цикл з розрахунку та занесення у масив точок синусоїди з урахуванням обраної частоти, кількості точок та форми сигналу. Після запису усіх точок у масив – для генерації сигналу достатньо лише напряду проходити ці точки одна за одною. Під час кожного перемикачів частоти чи форми сигналу – масив перераховується. Такий підхід можна вважати «золотою серединою», адже у більшості випадків винесення великих обрахунків у етап ініціалізації та змін режимів, а також частий перезапис пам'яті, не є критичними проблемами, а з точки зору стабільності роботи та легкості впровадження він є найкращим.

У випадку мінімізації обсягу пам'яті – кожна точка прораховується протягом кожного окремого імпульсу, використовуючи лічильник поточного кроку. Слід зазначити, що цей варіант займає на порядок більше тактів процесора, а тому має жорсткі обмеження щодо частот ШІМ та довжин імпульсів, до яких він може застосовуватись. Разом з тим він не потребує виділення пам'яті мікроконтролера для запису масиву точок.

У випадку синусоїдального сигналу, який задано в умовах роботи – цей метод реалізується формулою:

$$Impulse\_length\_ARR[i] = \sin\left(\pi * \frac{i}{N_{ARR}}\right) * T_{PWM}, \quad (1)$$

де  $Impulse\_length\_ARR[]$  – масив точок, що застосовуються для генерації вихідного сигналу;  $i$  – лічильник, який збільшується на один крок в

кожній ітерації, та використовується як вказівник на точку у масиві;  $N_{ARR}$  – кількість точок у масиві, яка у нашому випадку у два рази менше за  $N$  – кількість точок, застосованих для генерації вихідного сигналу;  $T_{PWM}$  – тривалість періоду ШІМ.

Мінімальна рекомендована частота ШІМ для обраного двигуна має бути хоча б у 80-85 разів вищою за частоту вихідного сигналу, щоб мінімізувати спотворення вихідного сигналу. В цьому випадку буде використовуватись масив зі 100 точок, завдяки якому формується лише півперіод синусоїди. Оскільки обидва півперіоди синусоїди ідентичні в усьому, крім полярності, можливо проходити масив один раз для генерації позитивної півхвилі, і другий раз для негативної. Таким чином, система підтримує частоту ШІМ у 200 разів вищу, за вихідний сигнал, тобто 200 точок на один період сигналу, оскільки кожна зі ста записаних точок масиву використовується двічі під час генерації синусоїди. При максимальній частоті сигналу 5 Гц фактична частота ШІМ становить 2 кГц, що дозволяє уникнути високочастотного шуму в діапазоні 8-20 кГц, який є дискомфортним для людського вуха.

Метод пропуску точок дозволяє змінювати частоту вихідного сигналу при збереженні фіксованої частоти ШІМ та незмінного масиву даних.

Зміна частоти досягається шляхом рівномірного розподілу пропусків точок у масиві (змінюючи кроку індексу  $i$ ), що дозволяє проводити тонке налаштування системи з мінімальними змінами модулів чи керуючих масивів даних.

Слід враховувати, що при такому підході, хоч частота генерації імпульсів ШІМ не змінюється, але, через використання меншої кількості точок для генерації саме одного періоду вихідного сигналу – якість сигналу зменшується. Тому при більш широкому діапазоні частот необхідно розбивати точки на групи, де один набір частот вихідного сигналу генерується за допомогою однієї частоти ШІМ і відповідного масиву, а другий набір частот вихідного сигналу генерується іншою частотою ШІМ та іншим масивом. Адаже при зміні частоти – масив точок також має бути змінений, бо змінюється період сигналу. Співвідношення частоти сигналу, частоти ШІМ та кількості використаних точок наведено у табл. 1.

Визначення та запис тривалості кожного імпульсу відбувається у обробнику переривань, який викликається в кінці кожного такту ШІМ.

### Обговорення результатів

Експериментальна апробація розробленої системи керування синхронним двигуном з постійними магнітами (PMSM) дозволила оцінити ефективність обраної апаратної топології та програмних алгоритмів формування сигналів.

Процес тестування охоплював етапи від комп'ютерного моделювання до випробувань фізичного прототипу в умовах, наближених до експлуатаційних.

Таблиця 1 – Частоти ШІМ, кількість використаних точок з масиву та крок збільшення вказівника масиву, відповідно до частоти сигналу для «режим 2»

Частота сигналу, Гц	0,5	1	2	3	4	5
Частота ШІМ, Гц	100	100	400	400	400	400
Кількість точок	200	100	200	133	100	80
Крок	1	2	1	1,5	2	2,5

Попереднє моделювання в середовищі Proteus (рис. 3) підтвердило логічну коректність алгоритмів комутації Н-мосту та формування двоканального модульованого сигналу.

На стадії фізичного прототипування за допомогою осцилографічних замірів було зафіксовано чітке формування позитивних та негативних півхвиль ШІМ-сигналу.

Впровадження «мертвої зони» (dead zone) між фазами комутації дозволило повністю виключити ризик виникнення наскрізних струмів у плечах інвертора та забезпечити стабільність силових ключів.

Незважаючи на коректну генерацію керуючих сигналів мікроконтролером, стендові випробування з підключеним двигуном та редукторною системою виявили суттєві відхилення у динаміці руху ротора. Замість очікуваного плавного обертання спостерігалися переривчасті коливальні рухи та фіксація магнітної шестерні у проміжних станах. Аналіз осцилограм під навантаженням показав значне викривлення форми вихідного сигналу, тобто фактична напруга на фазах статора втрачала синусоїдальний характер.

**Розрив кола розряду:** оскільки під час низького рівня ШІМ силова частина повністю розмикала ланцюг, струм не мав шляху для циркуляції, що призводило до шкідливих перенапруг та порушення формування струмової синусоїди. У моменти пауз ШІМ-сигналу енергія, накопичена в котушках статора, генерувала зворотні ЕРС, які конфліктували з основним сигналом.

Зовнішній вигляд прототипу показано на рис. 4. Для усунення виявлених дефектів пропонується перехід до активного «розрядження» котушок статора за допомогою замикання їх самих на себе під час пауз ШІМ. Для усунення проблеми з небажаною індуктивністю, потрібно протягом паузи ШІМ сигналу відкривати

транзистори, що з'єднані з загальною «землею» (ground). Таким чином утворюється замкнене коло, в якому наявні лише фаза мотору, захисний діод та відкритий транзистор. Завдяки цьому індуктивність буде не викривлювати вихідний сигнал, а навпаки доповнювати та вирівнювати його форму.

Прототип продемонстрував обмежену працездатність під навантаженням, отримані дані дозволили виявити критичні аспекти взаємодії ШІМ-інвертора з високоіндуктивним навантаженням та сформувані науково обґрунтовані результати для створення прецизійних систем керування нового покоління.

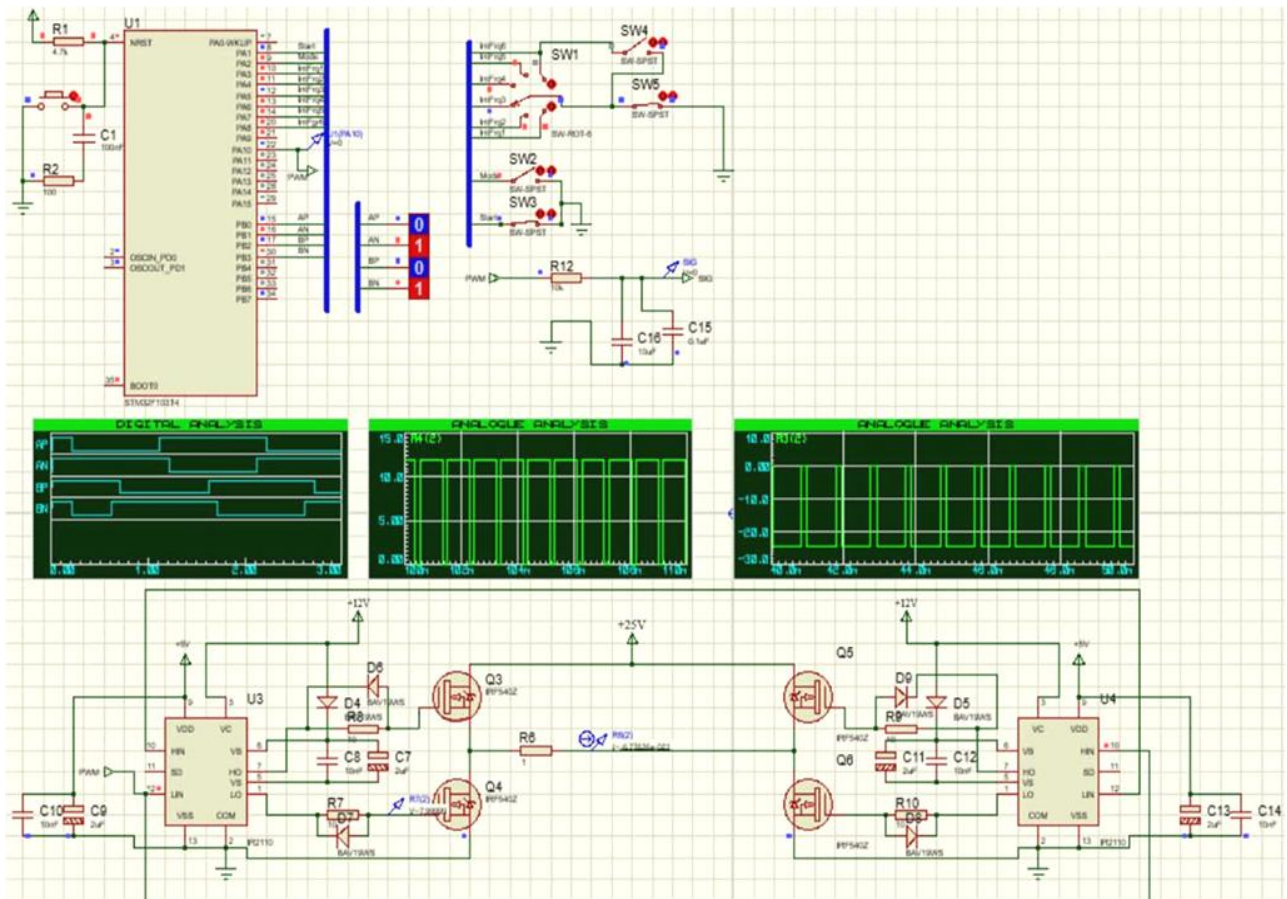


Рис. 3 – Моделювання пристрою у застосунку Proteus



Рис. 4 – Зовнішній вигляд прототипу з налагоджувальною платою STM32F103C8T6 та встановленим інвертором «А»

Ключові результати досліджень:

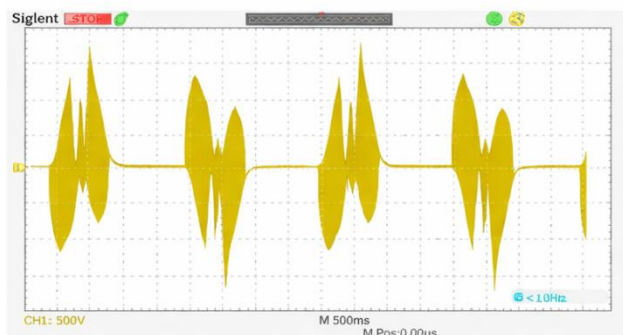
**Викривлення сигналу.** У котушках статора залишкові магнітні поля генерують зворотні струми та напруги (рис. 5). Через те, що під час низького рівня ШІМ коло навантаження залишається розімкненим, струм не має шляху для циркуляції, що призводить до шкідливих перенапруг та спотворення синусоїдальної форми сигналу.

**Осцилографічний контроль.** Показники осцилографа (рис. 5) підтвердили, що система коректно витримує періодичність та змінює полярність сигналу в кожному півперіоді, що свідчить про правильну логіку програмної частини.

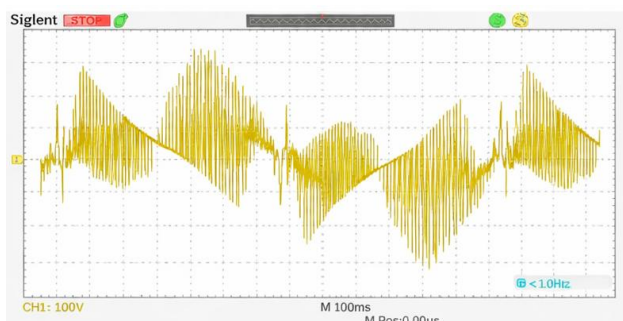
Однак через фактор залишкової індуктивності замість очікуваної синусоїди на виході був присутній струм критично спотвореної форми.

**Механічна реакція.** На високих частотах рух ротора був хаотичним, тоді як на низьких

частотах (режим «1») іноді вдавалося зафіксувати обертальні рухи, проте здебільшого система переходила в режим циклічних коливань.



а



б

Рис. 5 – Осцилограми сигналу на виході інвертора «А» при підключенні до навантаження;  
а – у режимі «1» з частотою 0,25 Гц  
б – у режимі «2» з частотою 1 Гц

Таким чином, результати підтвердили працездатність керуючої логіки, але вказали на необхідність введення етапу розряду індуктивного навантаження під час пауз ШІМ сигналу.

### Висновки

Розглянуто особливості використання PMSM для прецизійного обладнання, зокрема в медичній галузі, як найбільш ефективних завдяки їх високій точності позиціонування та стабільності роботи під навантаженням.

На основі проведеного дослідження було спроектовано та реалізовано систему керування PMSM, що базується на використанні мікроконтролера STM32F103CBT6 та двох повномостових інверторів. Вибір компонентної бази, включаючи транзистори IFRP250NPbF та драйвери IR2110, дозволив забезпечити роботу системи при потужності до 2 кВт (100 В, 20 А) з необхідним запасом надійності. Процес розробки супроводжувався багаторівневою верифікацією.

Комп'ютерне моделювання в середовищі Proteus підтвердило коректність програмних алгоритмів формування двоканального ШІМ-сигналу та ефективність впровадження «мертвої зони» для захисту силових ключів від наскрізних струмів.

Апаратне тестування прототипу дозволило перевірити роботу логічних каскадів захисту, системи гальванічної розв'язки.

Експериментальна перевірка системи на випробувальному стенді з реальним двигуном та редукторною системою виявила значні відхилення у динаміці руху ротора, спричинені впливом залишкової індуктивності обмоток статора. Незважаючи на це, отримані результати мають науково-практичну цінність, оскільки вони дозволили зібрати масив унікальних експериментальних даних щодо взаємодії ШІМ-інверторів із високоіндуктивним навантаженням. На основі проведених досліджень було сформовано удосконалену концепцію керування, яка передбачає активне розрядження котушок статора під час пауз сигналів ШІМ.

Запропоновані технічні рішення та програмні алгоритми (зокрема методи програмного розрахунку та пропуску точок) складають підґрунтя для вдосконалення високоточного медичного обладнання, такого як томографи, хірургічні маніпулятори та перистальтичні насоси. Отримані експериментальні результати слугують базою для подальших розробок.

### Список літератури

1. Fairag M., Almahdi R. H., Siddiqi A. A., Alharthi F. K., Alqurashi B. S., Alzahrani N. G., Alsulami A., Alshehri R. Robotic Revolution in Surgery: Diverse Applications Across Specialties and Future. *Cureus*. 2024. 12. 16(1). P. e52148. doi:10.7759/cureus.52148.
2. Kladko D. V., Vinogradov V. V. Magnetosurgery: Principles, design, and applications. *Smart Materials in Medicine*. 2024. Vol. 5. P. 24-35. doi:10.1016/j.smaim.2023.06.008.
3. Sakunthala S., Kiranmayi R., Mandadi P. N. A study on industrial motor drives Comparison and applications of PMSM and BLDC motor drives. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS 2017)*. Chennai, India. P. 537-540. doi:10.1109/ICECDS.2017.8390224.
4. Mehmet Şen, Mümtaz Mutluer. A Review of BLCD Motors: Types, Application, Failure Modes and Detection. *Energies*. 2025. № 18(24). P. 1-35. doi:10.3390/en18246402.
5. Elkholy M. M., Algendy M. M., El-Hay E. A. Modern Control Techniques and Operational Challenges in Permanent Magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Review. *Automation*. 2025. № 6(4). 49. P. 1-28. doi:10.3390/automation6040049.
6. Mercorelli Paolo. Permanent Magnet Synchronous Motors for Track Applications. *Electronics*.

2023. № 2(15). 3285. P. 1-20. doi: 10.3390/electronics12153285.
7. Marian Gaiceanu. *Advanced Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor*. In book: *Electric Machines for Smart Grids Applications. Design, Simulation and Control*. 2018. P. 191-212. doi:10.5772/intechopen.80086.
  8. Yuxiang Xue, Hui Li, Yingzhe Wu, Lisheng Wang, Hengbin Zhang. A Novel Pulse Width Modulation Strategy Used for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia)*. 2024. P. 926-932. doi:10.1109/IPEMC-ECCEAsia60879.2024.10567459.
  9. Bevilaqua M. A., Nied A. de Oliveira, Labview J. FPGA FOC implementation for synchronous Permanent Magnet Motor Speed Control. *11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. Brazil*, 2014. P. 1-8. doi: 10.1109/INDUSCON.2014.7059427.
  10. Edwin Selva Rex C.R., et al. Speed Control of BLDC Motor Using Trapezoidal Commutation & PWM Technique. *4th IEEE Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. 2023. P. 1-5. doi: 10.1109/GCAT59970.2023.10353285.
  11. Klarmann K., Thielmann M., Schumacher W. Comparison of Hysteresis Based PWM Schemes  $\Delta\Sigma$ -PWM and Direct Torque Control. *Applied Sciences*. 2021. № 11(5). 2293. P. 1-20. doi:10.3390/app11052293.
  12. Ahmad Fudholi. Implementation of ARM STM32F4 microcontroller for speed control of BLDC motor based on bat algorithm. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2024. № 15(1). 127. P. 127-135. doi: 10.11591/ijpeds.v15.i1.pp127-135.
  13. Haoran Jin, Xiang'e Sun. Design of the Brushless DC Motor Driving System Based on STM32. *Open Access Library Journal*. 2017. Vol. 4 № 6. P. 1-9. doi:10.4236/oalib.1103703.
  14. Nam Duong Le, Le Quang Linh, Nguyen Tien Huy Cong, Phuong Vu, Tung Lam Nguyen. Field-programmable gate array-based field-oriented control for permanent magnet synchronous motor drive. *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control*. 2023. Vol. 21. № 2. P. 448-458. doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v21i2.23560.
  15. Samhar Saeed Shukir. Design a Half Bridge Inverter and a Full Bridge Inverter with Overload Protection Circuit Using IC555. *Industrial Engineering*. 2021. Vol. 5. № 1. P. 21-27. doi: 10.11648/j.ie.20210501.13.
  3. Sakunthala S., Kiranmayi R. and Mandadi P. N. A study on industrial motor drives: Comparison and applications of PMSM and BLDC motor drives. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS 2017)*, Chennai, India, pp. 537-540, doi:10.1109/ICECDS.2017.8390224.
  4. Mehmet Şen, Mümtaz Mutluer. A Review of BLCD Motors: Types, Application, Failure Modes and Detection. *Energies*, 2025, no. 18(24), pp. 1-35, doi:10.3390/en18246402.
  5. Elkholy M. M., Algendy M. M., El-Hay E. A. Modern Control Techniques and Operational Challenges in Permanent Magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Review. *Automation*, 2025, no. 6(4).49, pp. 1-28, doi:10.3390/automation6040049.
  6. Paolo Mercorelli. Permanent Magnet Synchronous Motors for Track Applications. *Electronics*, 2023, no. 2(15), 3285, pp. 1-20, doi:10.3390/electronics12153285.
  7. Marian Gaiceanu. *Advanced Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor*. In book: *Electric Machines for Smart Grids Applications. Design, Simulation and Control*, 2018, pp. 191-212, doi:10.5772/intechopen.80086.
  8. Yuxiang Xue, Hui Li, Yingzhe Wu, Lisheng Wang, Hengbin Zhang. A Novel Pulse Width Modulation Strategy Used for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia)*, 2024, pp. 926-932, doi:10.1109/IPEMC-ECCEAsia60879.2024.10567459.
  9. Bevilaqua M. A., Nied A. de Oliveira, Labview J. FPGA FOC implementation for synchronous Permanent Magnet Motor Speed Control. *11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. Brazil*, 2014, pp. 1-8, doi:10.1109/INDUSCON.2014.7059427.
  10. Edwin Selva Rex C.R., et al. Speed Control of BLDC Motor Using Trapezoidal Commutation & PWM Technique. *4th IEEE Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/GCAT59970.2023.10353285.
  11. Klarmann K., Thielmann M., Schumacher W. Comparison of Hysteresis Based PWM Schemes  $\Delta\Sigma$ -PWM and Direct Torque Control, *Applied Sciences*, 2021, no. 11(5), 2293, pp. 1-20, doi:10.3390/app11052293.
  12. Ahmad Fudholi. Implementation of ARM STM32F4 microcontroller for speed control of BLDC motor based on bat algorithm. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 2024, no. 15(1), 127, pp. 127-135, doi:10.11591/ijpeds.v15.i1.
  13. Haoran Jin, Xiang'e Sun. Design of the Brushless DC Motor Driving System Based on STM32. *Open Access Library Journal*, 2017, vol. 4, no. 6, pp. 1-9, doi: 10.4236/oalib.1103703.
  14. Nam Duong Le, Le Quang Linh, Nguyen Tien Huy Cong, Phuong Vu, Tung Lam Nguyen. Field-programmable gate array-based field-oriented control for permanent magnet synchronous motor drive. *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control*, 2023, vol. 21, no. 2, pp. 448-458. doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v21i2.23560.
  15. Samhar Saeed Shukir. Design a Half Bridge Inverter and a Full Bridge Inverter with Overload Protection Circuit Using IC555. *Industrial Engineering*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 21-27, doi:10.11648/j.ie.20210501.13.

#### References (transliterated)

1. Fairag M., Almahdi R. H., Siddiqi A. A., Alharthi F. K., Alqurashi B. S., Alzahrani N. G., Alsulami A., Alshehri R. Robotic Revolution in Surgery: Diverse Applications Across Specialties and Future. *Cureus*, 2024, no. 16(1), e52148, pp. 1-10, doi:10.7759/cureus.52148.
2. Kladko D. V., Vinogradov V. V. Magnetosurgery: Principles, design, and applications. *Smart Materials in Medicine*, 2024, vol. 5, pp. 24-35, doi: 10.1016/j.smaim.2023.06.008.

### Відомості про авторів (About authors)

**Сміян Олександр Валерійович** – Молодший сержант/оператор групи управління та координації відділу організації повітряної розвідки та застосування ударних БпАК, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», випускник 2025 року кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0006-3791-756X; e-mail: khmarolim@gmail.com

**Smiiian Oleksandr** – Junior Sergeant/Operator of the Control and Coordination Group of the Air Reconnaissance and Strike UAV Department; Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0006-3791-756X; e-mail: khmarolim@gmail.com

**Фетюхіна Людмила Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5778-7041; e-mail: Liudmyla.Fetiukhina@khpі.edu.ua

**Fetiukhina Liudmyla** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5778-7041; e-mail: Liudmyla.Fetiukhina@khpі.edu.ua

**Бутова Ольга Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1128-9722; e-mail: Olha.Butova@khpі.edu.ua

**Olha Butova** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, Department of industrial and biomedical electronics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1128-9722; Olha.Butova@khpі.edu.ua

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Сміян О. В., Фетюхіна Л. В., Бутова О. А. Система керування синхронним двигуном з постійними магнітами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2026. № 1 (27). С. 45-53. doi:10.20998/2413-4295.2026.01.06.

*Please cite this article as:*

Smiiian O., Fetiukhina L., Butova O. Control system for synchronous motor with permanent magnets. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2026, no. 1(27), pp. 45–53, doi:10.20998/2413-4295.2026.01.06.

*Надійшла (received) 29.01.2026  
Прийнята (accepted) 15.03.2026  
Опублікована (published) 02.04.2026*