

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2026.74.077>

АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ І АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ РОЗРОБКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З BLDC ДВИГУНАМИ

Л.І. Мазуренко*,¹ докт. техн. наук, **В.В. Гребеніков****,² докт. техн. наук, **О.В. Джура*****,³ канд. техн. наук, **М.О. Шихненко******,⁴ канд. техн. наук, **П.П. Подейко*******,⁵ канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: ¹3662491@gmail.com, ²elm1153@gmail.com, ³suoma1715@gmail.com, ⁴shyknhehko@gmail.com,
⁵pavlopodeiko@gmail.com

Статтю присвячено огляду програмних і апаратних засобів розробки цифрових систем керування для електроприводів із безколекторними двигунами постійного струму (БДПС) та аналізу їхніх основних можливостей і характеристик. Викладено рекомендовані авторами основні етапи розробки систем керування БДПС. На основі наукових публікацій та інформації виробників, що спеціалізуються в розробці та виготовленні мікроконтролерів і цифрових пристроїв, здійснено огляд сучасних апаратних засобів макетування систем керування БДПС, таких як стартові (оціночні) плати (набори), демонстраційні плати розробника і т. ін.. Розглянуто спеціалізовані програмні засоби, призначені для розробки електричних схем та керуючих програм цифрової частини систем керування БДПС. Проаналізовано використання програмних засобів імітаційного моделювання в наукових дослідженнях електроприводів із БДПС для налаштування алгоритмів керування та вибору параметрів регуляторів перед створенням прототипу макетного зразка системи керування БДПС. Наведено рекомендації щодо використання розглянутих у роботі програмних і апаратних засобів розробки систем керування електроприводів із БДПС у наукових теоретичних дослідженнях і експериментальних розробках. Бібл. 29, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: безколекторний двигун постійного струму, система керування, мікроконтролер, програмне забезпечення, апаратні засоби.

На сучасному етапі спостерігається суттєвий інтерес до питань розробки та розширення областей застосування електроприводів із так званими безколекторними двигунами постійного струму (БДПС), які більш відомі в англomовному варіанті Brushless Direct Current (BLDC) motor.

У конструкції БДПС наявний ротор із постійними магнітами та статор з обмоткою, що живиться від джерела постійного струму через DC/AC перетворювач. Основною відмінністю БДПС від синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ) є форма зворотної ЕРС, яка в СДПМ синусоїдальна, а в БДПС двигуні – трапецеїдальна. Це переважно є наслідком різної форми магнітів та різного розподілу обмотки в пазах статора СДПМ і БДПС. У СДПМ частіше використовується розподілена, а в БДПС – зосереджена обмотка. Живлення БДПС відбувається шляхом послідовної подачі напруги змінної полярності на наступні дві з трьох фаз через кожні 60 електричних градусів. Водночас за шестиступінчастого алгоритму перемикання кожна з фаз перебуває розімкнутою 120° впродовж періоду електричної частоти струму статора. У трифазному СДПМ одночасно живляться змінним струмом усі три фази. Відповідно й алгоритми керування СДПМ та БДПС суттєво відрізняються.

Серед переваг електроприводів із БДПС над електроприводами з СДПМ і векторним керуванням відзначають нижчу вартість завдяки дешевшим датчикам положення та більш прості алгоритми керування. БДПС здебільшого використовуються в електроприводах автомобілів і насосів, у прокатному виробництві, у безпілотних літальних апаратах, у робототехніці та побутовій електроніці. В електроенергетиці, зокрема в вітроенергетиці, знаходять застосування синхронні машини на постійних магнітах, що отримали в англomовній літературі назву Permanent Magnet Synchronous Machines (PMSM) [1, 2].



БДПС із зовнішнім ротором (Outrunner) застосовуються в комерційних БПЛА, оскільки така конструкція забезпечує високий питомий крутний момент завдяки збільшеному діаметру ротора, ефективному охолодженню та простоті виконання.

Система керування приводів БДПС може бути як безсенсорна, так і з використанням оптичних енкодерів та датчиків положення Холла.

Якщо система керування трифазного БДПС виконується на основі датчиків положення (ДП), то зазвичай, встановлюють три датчики Холла на відстані 60 або 120 електричних градусів у пазах статора між фазами обмотки (рис. 1а, датчики HS1, HS2, HS3). Датчики Холла можуть бути як аналоговими, так і цифровими, причому частіше застосовуються цифрові. Як одні, так і інші мають три виводи, два з яких – виводи живлення, а третій – вивід вихідного сигналу.

Попередню перевірку роботи та контроль точності встановлення датчиків положення виконують у генераторному режимі роботи БДПС. Якщо датчики встановлені та підключені вірно, то фронти вихідних сигналів датчиків будуть співпадати з моментами переходу через нуль відповідних лінійних напруг при з'єднанні фаз у зірку (рис. 1б). За допомогою трьох датчиків Холла можливо визначити, в якому з шести секторів знаходиться ротор електричної машини.

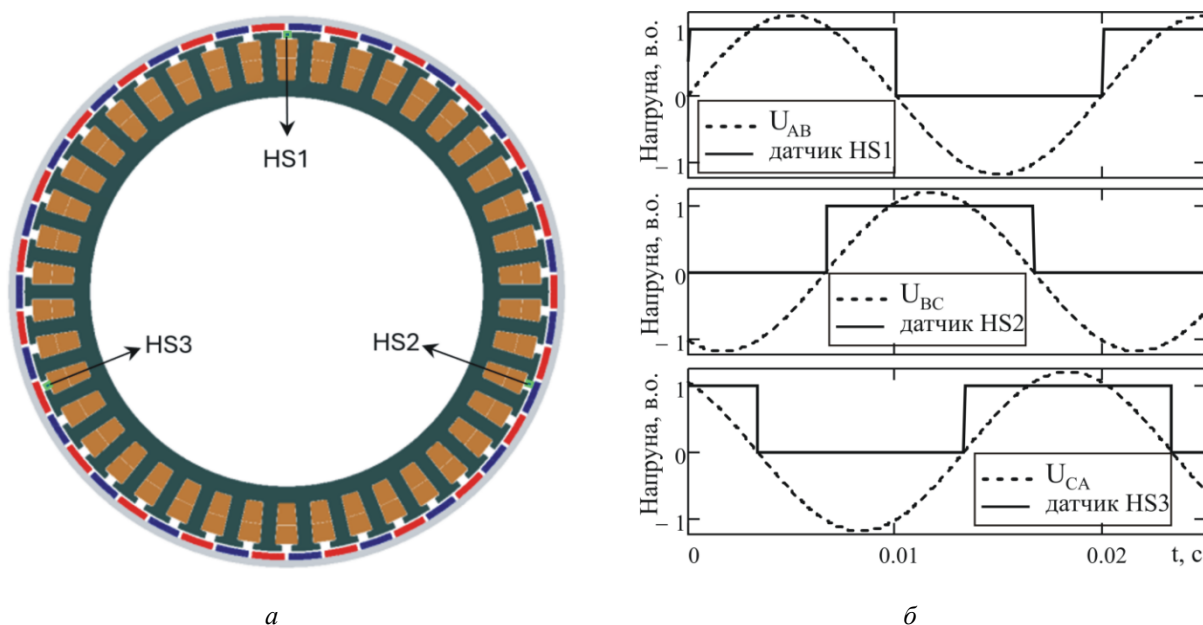


Рис. 1. Розташування ДП в БДПС (а) та часові осцилограми напруг ДП і БДПС у режимі генератора (б)

Розробка сучасних конкурентоспроможних електроприводів на основі БДПС значною мірою залежить від застосування спеціалізованих програмних та апаратних засобів розробки, призначених для створення, тестування та відлагодження алгоритмів роботи систем керування електроприводами.

Метою статті є огляд та аналіз програмних та апаратних засобів розробки систем керування електроприводів із БДПС для дослідницьких та навчальних проєктів. Проведені дослідження дають змогу визначити наявні, зокрема безкоштовні, сучасні програмні та апаратні засоби розробки систем керування електроприводів із БДПС різних виробників та надати рекомендації щодо їхнього вибору та застосування для дослідницьких та навчальних проєктів.

Порядок розробки систем керування БДПС. Наведені в табл. 1 основні етапи розробки систем керування (СК) електроприводів із БДПС можуть бути застосовані також у разі розробки систем керування електроприводів з іншими типами двигунів. Зробимо стислий огляд.

Таблиця 1

Номер етапу	Назва етапу розробки СК електропривода з БДПС
1	Розробка блок-схеми алгоритму роботи системи керування
2	Розробка імітаційної моделі
3	Розробка принципової електричної схеми
4	Розробка програмного середовища розробника
5	Виготовлення макетної плати
6	Програмування МК
7	Фізичне макетування
8	Виготовлення конструкторської документації

Перед тим як приступити власне до розробки системи керування, слід задати або розрахувати всі параметри та характеристики двигуна. Також повинна бути розроблена принципова електрична схема інвертора, яка включає силові елементи і драйвери ключів.

На першому етапі розробки системи приймається рішення щодо вибору або розробляється блок-схема алгоритму керування.

На другому етапі доцільно розробити комплексну імітаційну модель, яка включає силову частину електропривода та систему керування. Така модель дає змогу попередньо оцінити працездатність та ефективність розробленої блок-схеми алгоритму керування, а також зменшити час експериментальних досліджень.

Як ілюстрацію наведено результати розрахунків БДПС. Основні розміри досліджуваного електродвигуна (рис. 1 а) такі: кількість пар полюсів – 23; число пазів – 42; зовнішній діаметр – 170 мм; внутрішній діаметр ротора – 161,3 мм; товщина пакета статора – 25 мм; робочий зазор – 0,6 мм; розміри магнітів – $2 \times 10 \times 25$ мм. Модель двигуна розрахована в програмі Simcenter MotorSolve. Положення ротора, за якого відбувається комутація обмоток статора, задається кутом випередження комутації, що дорівнює куту між МРС (магніторухійною силою) статора і полем ротора. Слід зазначити, що робочі характеристики електродвигуна значною мірою залежать від кута випередження.

На рис. 2 наведено робочі характеристики розрахованого двигуна – залежності електромагнітного моменту $M(n)$ (рис. 2 а) та вихідної механічної потужності $P_{out}(n)$ (рис. 2 б) від частоти обертання ротора для кількох значень кута випередження ($\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 22^\circ$, $\gamma = 45^\circ$).

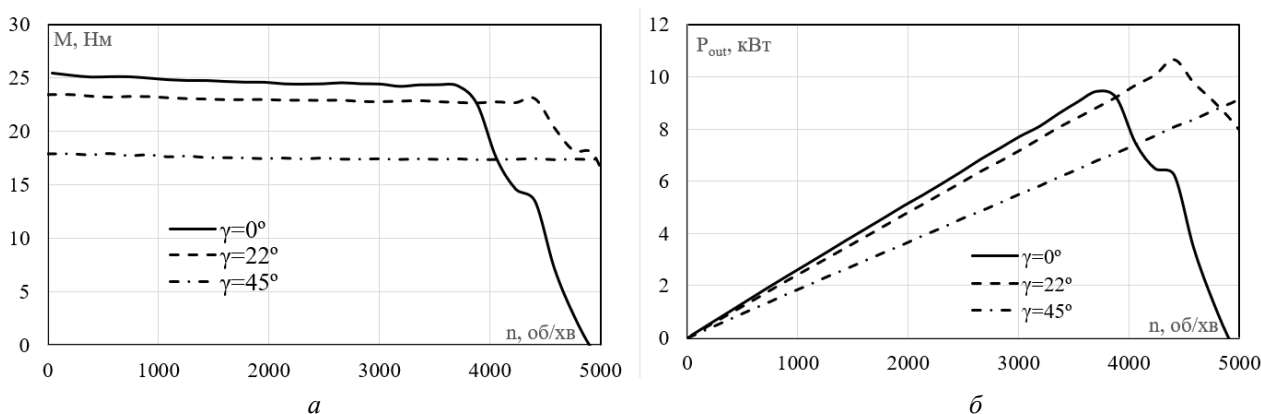


Рис. 2. Робочі характеристики БДПС: залежність електромагнітного моменту (а) та вихідної потужності (б) від частоти обертання ротора для кількох значень кута випередження ($\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 22^\circ$, $\gamma = 45^\circ$).

частоти обертання ротора для трьох значень кута випередження комутації $\gamma = 0^\circ$, 22° та 45° . Зі збільшенням γ від 0 до 45° рівень електромагнітного моменту в зоні постійного моменту знижується з $\approx 25,5$ Н·м до ≈ 18 Н·м (приблизно на 30 %), однак межа зони постійного моменту зміщується в область вищих частот обертання: за $\gamma = 0^\circ$ спад моменту настає за $n \approx 3700$ об/хв із максимумом потужності $P_{max} \approx 9,5$ кВт; за $\gamma = 22^\circ$ – за $n \approx 4400$ об/хв з $P_{max} \approx 10,7$ кВт; за $\gamma = 45^\circ$ зона постійного моменту охоплює весь досліджуваний діапазон до 5000 об/хв за $P_{out} \approx 9$ кВт. Це наочно демонструє, що робочі характеристики БДПС визначаються не ли-

ше конструктивними параметрами двигуна, але й параметрами алгоритму керування, який реалізується системою керування: кут випередження γ як керуючий параметр дає змогу цілеспрямовано перерозподіляти співвідношення «момент – швидкість» відповідно до вимог конкретного застосування, що обумовлює необхідність комплексного підходу до проектування привода — спільної розробки двигуна та його системи керування.

На третьому етапі приймається рішення щодо елементної бази та розробляється принципова електрична схема системи керування.

Оскільки практично всі сучасні системи керування БДПС містять мікроконтролери (МК), то на четвертому етапі обирається програмне середовище, що дає змогу створити, відлагодити та компілювати керуючу програму контролера.

На п'ятому етапі виготовляється (обирається) макетна плата системи керування.

На шостому етапі розроблена керуюча програма заноситься до енергонезалежної пам'яті МК.

На сьомому етапі здійснюється фізичне макетування електропривода з розробленою платою керування. Водночас можуть вноситись певні зміни в керуючу програму та електричну принципову схему системи керування.

Після успішних експериментальних досліджень на восьмому етапі виготовляється комплект конструкторської документації на системи керування.

Розглянутий порядок є орієнтовним і може змінюватись залежно від порядку черговості окремих етапів та застосування програмних і апаратних засобів.

Апаратні засоби макетування і розробки систем керування БДПС. При макетуванні систем керування БДПС, структурну схему якої показано на рис. 3, на початковому етапі можуть бути використані різноманітні комплекти розробників та оціночні плати. Завдяки цьому розробник може максимально швидко перейти до етапу розробки і відлагодження алгоритму керування, використовуючи стандартні рішення. За відсутності вищезазначених засобів, макетний зразок системи керування створюється з дискретних електронних елементів та макетної плати або ж розробленої та виготовленої друкованої плати.

Алгоритм керування БДПС з одним замкнутим контуром керування швидкістю можна розділити на три блоки, а саме: блок керування швидкістю, в якому реалізовано контур регулювання частоти зі зворотним зв'язком, блок керування ШІМ-сигналом та блок розрахунку сигналу керування затворами транзисторів інверторів [3]. Подібні алгоритми в сучасних сис-

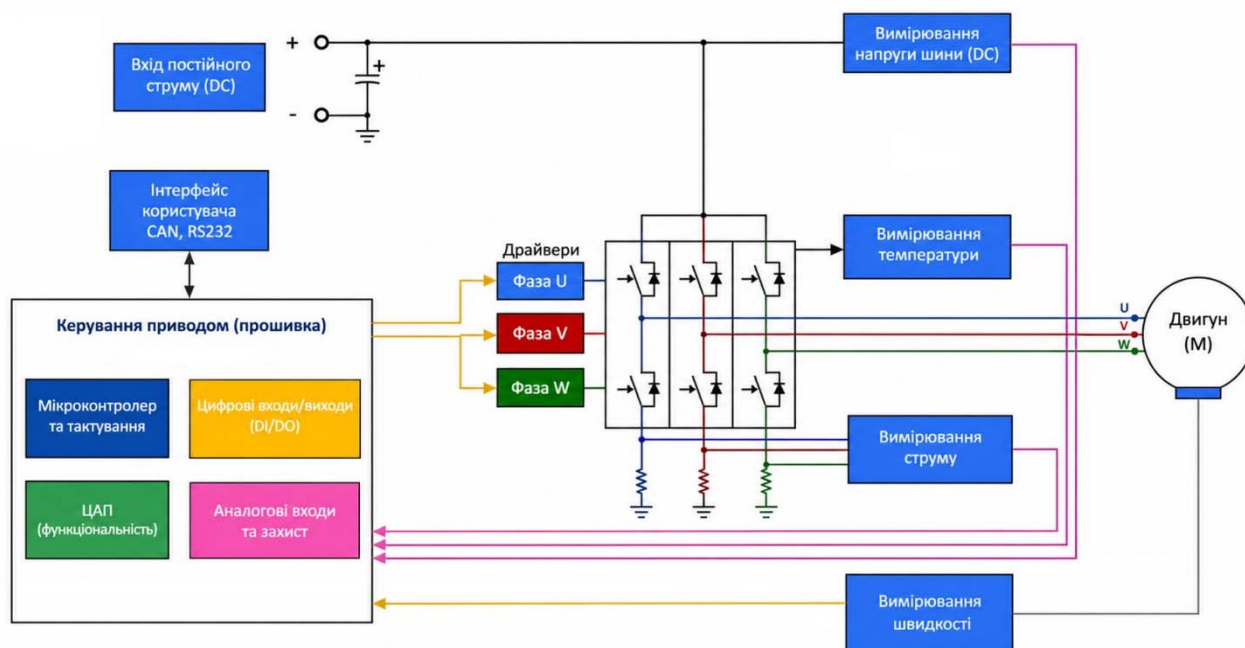


Рис. 3. Спрощена структурна схема системи керування БДПС

темах зазвичай реалізуються, як було зазначено вище, мікроконтролерами. Відповідно, у наукових проєктах при проведенні експериментальних досліджень використовують системи керування, розроблені на основі власних схемних рішень із різноманітними мікроконтролерами та комплектів розробників і оціночних плат, що створені для розробки систем керування двигунами.

Так, в [4] авторами проведені експериментальні дослідження малопотужного електропривода з БДПС за тривалості провідного стану ключів інвертора 120, 150, 180°, а також за синусоїдальної ШІМ. Положення ротора оцінювалось за формою сигналу зворотної ЕРС розімкнутої фази. Основою представленої в роботі системи керування БДПС є плата Arduino Nano, що містить 8-бітний мікроконтролер ATmega328P із тактовою частотою 16МГц, продуктивність якого складає 1MIPS (1 мільйон операцій у секунду) на 1МГц частоти. Інвертор електропривода було реалізовано на двох драйверах L298N, кожен з яких містить два транзисторних Н-моста зі спільною плюсовою шиною живлення.

В іншій роботі [5] розроблений макетний зразок трифазного інверторного моста електропривода БДПС із драйвером високої напруги було підключено до виготовленої плати мікроконтролера через оптодрайвери для забезпечення ізоляції між силовою та керуючою сторонами. Тестувалась робота системи з двома 8-бітними контролерами PIC18F4431 та PIC18F2431 за наявності датчиків положення ротора і ШІМ сигналів керування. У цьому дослідженні, як і в попередньому, застосовувалось скалярне керування двигуном.

Відомим є дослідження, в якому для апаратної реалізації векторної системи керування БДПС із контурами регулювання швидкості обертання і струму було використано 32-бітний мікроконтролер STM32F103RBT6, який має 128KB пам'яті програм, 16-канальний 12-бітний АЦП, удосконалений таймер із комплементарним ШІМ-виходом та допускає максимальну тактову частоту 72MHz [6]. Силова частина електропривода авторами реалізовувалась на основі модуля керування – інтелектуального силового модуля IRAM136-1061A, що об'єднує шість високо- та низькопотужних IGBT транзисторів та має власну функцію захисту, включаючи тепловий захист, захист за струмом, від низької напруги та несправностей. Для визначення та розрахунку швидкості використовувався інкрементальний енкодер.

Ще одна апаратна реалізація векторної системи керування БДПС на основі 32-бітного мікроконтролера проведена в роботі [7]. Було використано доволі бюджетний (орієнтовна вартість 2-3 \$) мікроконтролер STM32F103C8T6 із ядром ARM Cortex-M3. Верифікацію роботи розробленої системи керування та оцінку продуктивності мікроконтролера STM32F103C8T6 було проведено з використанням 350-ватного БДПС на електричному велосипеді та порівняно з універсальним контролером. За результатами досліджень встановлено, що використання розробленої векторної системи керування, яка використовує алгоритм просторово-векторної ШІМ, дало змогу зменшити споживання енергії від батареї, пікові струми та пульсації моменту двигуна. Завдяки великим обчислювальним спроможностям МК STM32 може використовуватись як основний МК дрону [8], забезпечуючи керування електроприводом на основі поточних координат та команд оператора. Також слід зазначити, що сімейство МК STM32, як засвідчив аналіз, використовується в системах керування дронів частіше порівняно з іншими моделями 32-бітних МК.

У ще одному дослідженні [9] на основі 32-бітних МК було розроблено безсенсорну гібридну систему керування безщітковими двигунами постійного струму для використання в багатороторних літальних апаратах. Для верифікації результатів моделювання запропонований гібридний контролер реалізовано апаратно з використанням відладочної плати TI C2000 Piccolo Launchpad та плати розширення TI BOOSTXL-DRV8305EVM BoosterPack для розробки СК двигунів із постійними магнітами.

Для високовольтних електроприводів особливу увагу в роботі [10] приділено гальванічній розв'язці елементів системи керування від кіл із високою напругою інвертора, щоб уникнути імпульсних завад, які можуть спричинити порушення функціонування мікроконтролера. З цією метою було застосовано цифровий ізолятор ADUM1200. Датчики високої напруги з оптичними операційними підсилювачами використано для вимірювання напруги акумулятора та зворотної ЕРС. Сигнали з інших датчиків, таких як датчики положення Хол-

ла та датчики струму в двох фазах, в розробленій системі також надходять до системи керування через гальванічну розв'язку. Розроблена в роботі на основі мікроконтролера STM32F405RGT7 плата керування забезпечує перемикання ключів інвертора на основі алгоритму шестиступінчастої комутації та ШІМ. Система керування забезпечує регулювання частоти обертання завдяки контуру регулювання частоти з PID-регулятором та контуру регулювання струму. За результатами досліджень авторами досягнуто усунення пульсацій струму двигуна, що дало змогу рекомендувати розроблений контролер для застосування в електричних скутерах.

Відомими виробниками стартових (оціночних) плат для розробки систем керування БДПС є компанії Texas Instruments, STMicroelectronics, Microchip, NXP Semiconductors та Infineon Technologies.

Зокрема TI пропонує оціночні плати, виконані на основі 32-бітних мікроконтролерів сімейства TMS320 для розробки систем керування двигунами. Однією з таких плат є LAUNCHXL-F28027F. Ця плата побудована на основі 32-бітного мікроконтролера сімейства C2000™ Piccolo™ TMS320F28027F. Цей мікроконтролер працює на тактовій частоті до 60 МГц, має 64 КБ пам'яті програм, 12-бітні АЦП та вбудовану технологію InstaSPIN-FOC для керування двигуном [11]. Зазначимо, що InstaSPIN-FOC фактично є програмним забезпеченням, яке заноситься розробником (ТІ) в ROM пам'ять мікроконтролера. Із його допомогою проводиться оцінка потокозчеплення, кута, швидкості та моменту для подальшої реалізації бездатчикового векторного керування двигуном.

Компанія STMicroelectronics випускає широкий ряд оціночних плат для розробки систем керування різними типами електродвигунів, зокрема БДПС. Однією з таких плат є EVSPIN32G4NH [12]. EVSPIN32G4. Це демонстраційна (оціночна) плата, в яку інтегровано напівмостовий трифазний інвертор на потужних MOSFET-транзисторах STL110N10F7 із драйверами затвора та один мікроконтролер змішаного сигналу STM32G431 (ядро 32-bit ARM® Cortex®-M4 MCU+FPU, тактова частота до 170 МГц, пам'ять програм 128 кБ). Інтегровані операційні підсилювачі для вимірювання струму, вимірювання напруги стік-витік кожного потужного MOSFET-транзистора та компаратори для захисту від перевантаження за струмом роблять її повністю інтегрованим рішенням для керування двигуном. Плата призначена для керування трифазними безщітковими двигунами постійного струму, підтримує бездатчикове керування та алгоритми керування на основі датчиків Холла та інкрементального енкодера. Плата містить вбудований програматор ST-LINK для програмування та відлагодження мікроконтролера. Крім того, наявний захист від теплових перевантажень, короткого замикання та перевантажень за струмом є досить корисним для початківців.

Альтернативою таким універсальним платам, як EVSPIN32G4NH, є комплект "Оціночна плата мікроконтролера + оціночна плата драйверів (інвертора)". Зокрема, виходячи з критеріїв вартості й доступності, можна запропонувати комплект "Оціночна плата мікроконтролера серії Nucleo + оціночна плата драйверів TMC6140-EVAL (інвертора)". Плати серії NUCLEO реалізовані на базі мікроконтролерів STM32 різних моделей. Вартість найпростіших за архітектурою плат цієї серії, як-от NUCLEO-G431KB, у прямих постачальників складає близько 19\$. Водночас зазначена плата (NUCLEO-G431KB), крім 32-бітного мікроконтролера STM32G431KBT6U, вже оснащена вбудованим відладчиком / програматором ST-LINK і роз'ємами ARDUINO® Nano V3 та Micro-AB USB. Щодо плати TMC6140-EVAL, то ця плата від компанії Analog Devices (раніше Trinamic Motion Control) являє собою трифазний мостовий інвертор з інтегрованими до плати драйверами ключів. Вона дає змогу живити трифазні низьковольтні двигуни, зокрема БДПС, за напруги 6...30 В постійного струму і діючого значення фазного струму до 32 А. Орієнтовна вартість цієї плати – від 100\$.

Також слід відзначити компанію Infineon, яка пропонує досить багато апаратних засобів розробки й макетування систем керування БДПС (наприклад, набір розробника EVAL-M1-101TF).

Програмні засоби (програмне забезпечення) для розробки алгоритмів керування БДПС. Вище зазначені виробники апаратних засобів макетування систем керування БДПС

пропонують розробникам власні спеціалізовані програмні засоби розробки алгоритмів керування БДПС. Зупинимось на деяких із них.

Доступний для завантаження на офіційному сайті компанії STMicroelectronics пакет програм X-CUBE-MCSDK (скорочено MCSDK - Motor Control Software Development Kit) призначений для розробки керуючих програм систем керування БДПС, виконаних на основі мікроконтролерів сімейства STM32. Цей пакет програм містить бібліотеку файлів «прошивки» (підпрограм, структур даних і макросів), які необхідні при програмній реалізації векторного та шестиступінчастого (скалярного) керування БДПС. Також цим пакетом надається робоче середовище розробки системи керування двигуном (motor control workbench) із графічним інтерфейсом користувача для налаштування параметрів бібліотеки файлів «прошивки». У робочому середовищі користувач може згенерувати файл проєкту, залучаючи до нього ресурси бібліотеки файлів «прошивки». Крім вибору моделі мікроконтролера та параметрів його налаштування, використовуючи бібліотеку ST Motor Profiler за характеристик двигуна, можна обрати відлагоджувальні (оціночні) плати системи керування та інвертора.

Для генерації файлу проєкту використовується додаткова програма STM32CubeMX, яка необхідна при конфігуруванні мікроконтролера. У процесі генерації проєкту йде автоматичний виклик STM32CubeMX. Перед початком процесу генерації також обирається середовище розробки (integrated development environment (IDE) - інтегроване середовище розробки).

Згенеровані з допомогою STM32CubeMX файли проєкту можна переносити в IDE, які підтримують проєкти на базі мікроконтролерів серії STM32. Серед таких IDE можна відзначити STM32CubeIDE, VS Code, Keil uVision та IAR Embedded Workbench. STM32CubeIDE надається розробникам компанією STMicroelectronics безкоштовно. У IDE відбувається редагування, компіляції та налагодження керуючої програми мікроконтролера. Редагування здійснюється у вікні C/C++ вбудованого редактора IDE.

Компанія TI пропонує розробникам систем керування програмне середовище controlSUITE™, орієнтоване на мікроконтролери сімейства C2000™. ControlSUITE™ - це цілісний набір програмної інфраструктури, інструментів та документації, розроблених для мінімізації часу розробки системи [13]. Його можна вільно завантажити з сайту компанії.

Робота в середовищі ControlSUITE™ відбувається через графічний інтерфейс користувача (GUI) для інтуїтивно зрозумілої навігації програмним забезпеченням, комплектами розробки, бібліотеками, посібниками користувача, нотатками щодо застосування тощо. Користувачу ControlSUITE™ доступне інтерактивне сховище програмного забезпечення для контролерів реального часу сімейства C2000. Серед іншого тут наявні бібліотеки підпрограм керування двигунами та математичних функцій. Останні версії ControlSUITE™ містять програму DESIGNDRIVE, яка надає доступ до прикладів керуючих програм і апаратних засобів для проєктування систем керування електроприводами з асинхронними і синхронними двигунами, в тому числі БДПС за різних алгоритмів керування.

Усі проєкти та приклади, наявні в controlSUITE, можуть бути імпортовані до середовища IDE Code Composer Studio від TI, яке також завантажується з сайту компанії за посиланням <https://www.ti.com/tool/CCSTUDIO> і встановлюється на ПК користувача. Робоче середовище IDE Code Composer Studio використовується для написання, налагодження та компіляції коду для мікроконтролерів TI. Разом з IDE Code Composer Studio може використовуватись програмно-бібліотечний пакет C2000WARE, який містить драйвери пристроїв, бібліотеки, приклади, документацію і т. ін. .

Прикладом використання програмних та апаратних засобів компанії є робота (принт), присвячена розробці та експериментальним дослідженням електропривода на основі БДПС і магнітного редуктора для обертового біологічного контактора (діскового біофільтра) [14]. Комплект розробки LAUNCHXL-F28069M (Texas Instruments) на основі МК TMS320F28069M використовувався для керування модулем 3-фазного напівпровідникового перетворювача BOOSTXLDRV8301. Алгоритми керування двигуном, процедури ідентифікації параметрів та функції оцінки параметрів були реалізовані за допомогою комплекту розробки програмного забезпечення TI MotorWare™ та пакету програм InstaSPIN-FOC™. Програмний код був налаштований та скомпільований за допомогою середовища розробки TI Code

Composer Studio™ (версія 20.4.0). Реалізація коду та конфігурація двигуна були розроблені за допомогою універсального графічного інтерфейсу InstaSPIN™.

Інша компанія, NXP, для розробки систем керування на своєму сайті пропонує таке програмне забезпечення: Automotive Math and Motor Control Library (AMMCLib), MCUXpresso SDK for Motor Control, S32 Design Studio for S32 Platform, Model-Based Design Toolbox (MBDT).

Перший із зазначених пакетів програм, Automotive Math and Motor Control Library (AMMCLib), надає бібліотечні засоби розробки керуючих програм для транспорту, що потребують використання різноманітних математичних функцій та цифрової обробки сигналів [15]. Значна частина AMMCLib підтримує як сенсорні, так і безсенсорні алгоритми керування двигунами.

Другий пакет програм – NXP MCUXpresso SDK for Motor Control – це комплексний програмний пакет (стартовий пакет розробника), призначений для пришвидшення розробки програм керування двигунами на мікроконтролерах NXP Arm® Cortex®-M. Він включає драйвери, проміжне програмне забезпечення та алгоритми безсенсорного векторного та шестиступінчастого керування для двигунів. Підтримує синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM), безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) та асинхронні двигуни змінного струму (ACIM). Інтегрується з програмними продуктами MCUXpresso IDE та MCUXpresso for VS Code. Використовує плагін FreeMASTER для налагодження програмного забезпечення керування двигуном у режимі реального часу, а також пакет програм Motor Control Application Tuning (MCAT). Зазначимо також, що FreeMASTER дає змогу розробникам контролювати та налаштовувати змінні керуючої програми мікроконтролера безпосередньо під час її функціонування.

Третє програмне забезпечення – S32 Design Studio для платформи S32 – це безкоштовне інтегроване середовище розробки (IDE) для 32-бітних мікроконтролерів і процесорів сімейства Arm®, яке дає змогу редагувати, компілювати та налагоджувати проекти. Воно не має обмежень щодо розміру коду і засноване на програмному забезпеченні з відкритим вихідним кодом.

Четверте програмне забезпечення – Model-Based Design Toolbox (MBDT) від NXP – це набір плагінів, які розроблені NXP і безпосередньо інтегруються з MATLAB та Simulink. Він виконаний як сторонній додатковий пакет, що дозволяє швидко прототипування, моделювання та автоматичну генерацію коду спеціально для мікроконтролерів NXP. MBDT встановлюється як пакет до MATLAB Toolbox.

Серед чотирьох зазначених програмних забезпечень NXP MCUXpresso SDK for Motor Control є основним і базовим (стартовим).

Щодо компанії Microchip, то зазначимо, що вона пропонує на своєму сайті для створення і відлагодження керуючих програм своїх мікроконтролерів середовище розробника MPLAB IDE (новіша версія MPLAB X IDE), яке дозволяє конфігурувати, розробляти, налагоджувати та кваліфікувати проекти для більшості власних мікроконтролерів та цифрових сигнальних контролерів. Компіляція написаної мовою високого рівня (C/C++) і відредагованої в MPLAB IDE керуючої програми проводиться іншими програмними засобами. Зокрема розробникам пропонується окремо завантажити та встановити компілятори MPLAB XC від Microchip (XC8, XC16, XC32), які інтегруються з MPLAB IDE одразу після встановлення. Для створення проекту в MPLAB X IDE необхідно зайти в меню File, вибрати New project, потім обрати тип проекту (рис. 4), модель МК, модель програматора та компілятора.

Компанія Infineon також безоплатно пропонує розробникам власну IDE AURIX™ Development Studio з інтегрованим компілятором для розробки рішень на основі 32-бітних мікроконтролерів сімейства TriCore™. Доступна за посиланням <https://www.infineon.com/design-resources/platforms> остання версія IDE AURIX™ v1.10.32 працює з операційними системами Windows 10 (64 біт) та Windows 11. Ще один програмний продукт цієї компанії, DAVE™ IDE, є середовищем розробки рішень на основі мікроконтролерів сімейства XMC™.

Деякі характеристики окремих вище розглянутих програмних засобів (ПЗ) для розробки алгоритмів керування БДПС наведено в табл. 2. Із таблиці видно, що всі ці засоби (тією чи іншою мірою) підтримують проекти, в яких використовується скалярне (6-ступінчасте) і векторне керування БДПС. Така підтримка здійснюється наданням як технічної документації, так і прикладів програмного коду.

ПЗ ControlSUITE є одним із найбільш інтегрованих до програмного пакету Matlab/Simulink. Ця інтеграція досягається за допомогою наявних у складі Matlab/Simulink пакетів (застосунків) TI C2000 Embedded Coder Support Package for TI C2000 Processors та Embedded Coder. Програмне середовище Matlab/Simulink після встановлення зазначених пакетів отримує доступ до сторонніх драйверів, математичних бібліотек та файлів заголовків програми ControlSUITE.

Прикладом розроблення програмного забезпечення для процесорів сімейства TI C2000 в середовищі MATLAB/Simulink є робота [16]. Авторами розроблялась керуюча про-

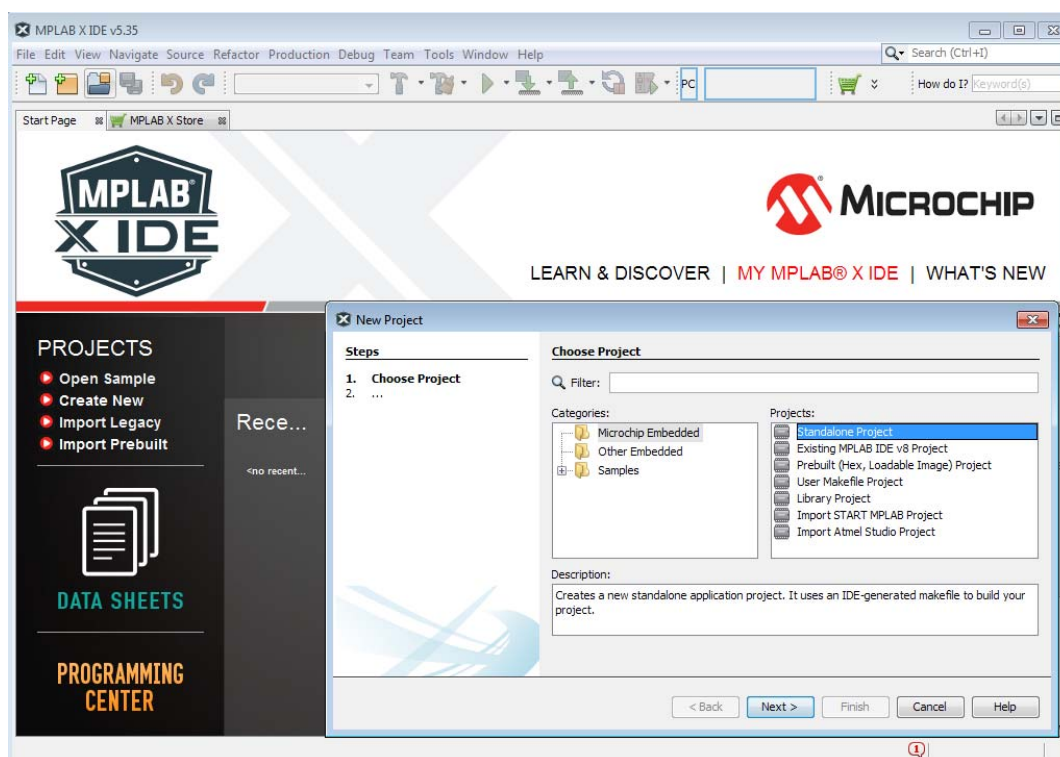


Рис. 4. Скриншот середовища розробки MPLAB X IDE v5.35, © Microchip Technology Inc.

грама для апаратного забезпечення, для чого використовувалась стартова плата LAUNCHXL-F28379D спроектована на базі цифрового сигнального процесора TMS320F28379D. У статті наводиться перелік програмних засобів, які повинні бути встановлені. У середовищі MATLAB/Simulink це: MATLAB Coder, Simulink Coder, Embedded Coder та Embedded Coder Support Package for TI C2000 Processors. Також на персональний комп'ютер встановлюються такі програмні продукти компанії TI: Code Composer Studio, C2000 ware, ControlSUITE, C2000 Code Generation Tools, та C2000 ARM Code Generation Tools. За результатами досліджень авторами зроблено висновок: пакет підтримки Embedded Coder робить створення коду простішим та швидшим, ніж написання його вручну.

Для розробки керуючої програми для МК STM32 у середовищі MATLAB/Simulink і програмування цього МК-розробнику необхідно встановити такі програмні продукти [17]: MATLAB/Simulink, Embedded Coder (2018b), STM32CubeMX (5.6.0), STM32-MAT/TARGET (5.6.0) та одне з середовищ розробки (наприклад, STM32CubeIDE v.1.3.0). Із апаратного забезпечення, крім цільової плати, потрібна наявність програматора STLink та віртуального COM порта.

На додаток серед відомих програмних засобів розробки алгоритмів керування БДПС відзначимо безплатну для користувачів бібліотеку SimpleFOCLibrary, яка містить програмно реалізовані на мові програмування C++ векторні алгоритми керування БДПС і кроковими двигунами. Бібліотека підтримує більше 20-ти сімейств МК, серед яких Arduino (8-bit AVR, UNO R4, DUE, Nano 33), STM32 (F1, F4, G4, L4, F7, H7 сімейства), ESP32 та ін. [18].

Таблиця 2

ПЗ	X-CUBE-MCSDK	controlSUITE	MCUXpresso	MPLAB X IDE	AURIX
Розробник	STMicroelectronics	TI	NXP	Microchip	Infineon
Тип ПЗ	Набір розробника ПЗ	Інфраструктура програмного забезпечення та інструмент розробки	Комплексна екосистема програмного забезпечення та інструментів	Інтегроване середовище розробки	Інтегроване середовище розробки
Ліцензія	Mix Ultimate Liberty + OSS + 3rd party V1	TI Commercial License/ BSD (Clause 3)/ 3rd party licenses	Переважно BSD-3 (вільна ліцензія)	Пропріетарна	Пропріетарна (для некомерційних цілей безкоштовна)
Підтримка сімейств МК	STM32F0, STM32F3, STM32F4, STM32G0, STM32G4, STM32H7, STM32L4, STM32C0, STSPIN32G4	Piccolo, Delfino, Concerto, Stellaris	MCX, i.MX RT, LPC, Kinetis, Wireless	PIC, dsPIC, AVR, SAM	AURIX TC2xx, TC3xx, AURIX TC3xx
Підтримка скалярного керування	Так	Так	Так	Так	Так
Підтримка векторного керування	Так (бездатчикове та датчикове)	Так (бездатчикове та датчикове)	Так (бездатчикове та датчикове)	Так (бездатчикове та датчикове)	Так (бездатчикове та датчикове)
Інтеграція з Matlab	Так	Так	Так	Так	Так

Бібліотека надає користувачам інтуїтивно зрозумілий спосіб розробки власних програм для керування рухом. SimpleFOC забезпечує кілька кросплатформних реалізацій на основі різних апаратних специфікацій і в такий спосіб підтримує багато комбінацій двигунів, датчиків, драйверів та мікроконтролерів [19]. Для занесення розробленої в SimpleFOC керуючої програми до flash-пам'яті МК можна використати сумісні з SimpleFOC середовища розробки, наприклад Arduino IDE.

Програмні засоби імітаційного моделювання роботи контролерів БДПС. Використання програмних засобів імітаційного моделювання допомагає зменшити витрати на розробку контролерів БДПС та оптимізувати параметри перед створенням прототипу макетного зразка системи керування БДПС. Такі засоби активно використовуються науковцями в сучасних дослідженнях електроприводів із БДПС.

Так, в [20] запропоновано підхід до керування швидкістю БДПС, заснований на розширеному спостерігачі (фільтрі) Калмана, для досягнення безсенсорного керування двигуном. Створено MATLAB/Simulink математичну модель БДПС, а також розроблено розширений фільтр Калмана для оцінки змінних стану двигуна.

У [21] проаналізовано роботу перетворювача Ландсмана з перетворювачем (інвертором) струму, що живлять БДПС, а також проаналізовано результати числового моделювання в програмному середовищі MATLAB 2016a для вибору інтелектуального контролера для БДПС.

У наступній статті [22] описано застосування розімкнутого керування при моделюванні роботи БДПС на основі алгоритму розімкнутого керування СДПМ із використанням блоків керування двигуном із бібліотеки MATLAB/Simulink. Розімкнуте керування реалізовувалося на базі блоку *VbyF Controller* із бібліотеки Motion Control Blockset.

Застосування пакету програм MATLAB/Simulink для реалізації системи керування БДПС і дослідження його динамічних режимів мало місце в статті [23]. Авторами використано блок Speed Controller для розімкнутого регулювання моменту двигуна в функції заданої частоти обертання.

Алгоритм шестикрокового керування БДПС із замкненим зворотним зв'язком було реалізовано засобами бібліотеки Simulink пакету MATLAB R2017a в [3]. Із використанням розробленої імітаційної моделі проведено верифікацію алгоритму керування за оцінки положення ротора за сигналами зворотної ЕРС лінійних напруг обмотки статора двигуна.

У статті [24] проаналізовано стратегії керування швидкістю для БДПС в електромобілях, що живляться від системи з подвійним джерелом живлення, що інтегрує сонячні фотоелектричні системи та мережеве живлення. Із використанням пакету MATLAB/Simulink співставлено різні методи керування БДПС, включаючи гістерезисне регулювання струму (ГРС), векторне керування (ВК) та гібридні підходи, такі як ВК у поєднанні з ГРС та вдосконалена стратегія, що інтегрує ВК, ГРС та ковзаюче керування.

Автори ще однієї статті, присвяченої розробці алгоритмів керування БДПС електромобіля [25] також використали пакет MATLAB/Simulink для моделювання електропривода з БДПС. За результатами математичних та експериментальних досліджень зроблено висновок, що використання контролера нечіткої логіки (КНЛ) порівняно з ПІД-контролером має переваги щодо плавного та безперервного керування швидкістю, енергоефективності, динаміки, надійності та адаптивності до збоїв навантаження. Для реалізації КНЛ на стартовому наборі DSP TMDSDSK6713 було використано цифровий процесор обробки сигналів TMS320C6713 із тактовою частотою 225 МГц та спеціальними ресурсами для керування двигуном у реальному часі.

Інше програмне забезпечення, Proteus 8, було обране для розробки контролера електропривода з БДПС у роботі [26]. Це програмне забезпечення було обрано авторами статті, оскільки воно може виконувати імітаційне моделювання на основі моделей наявних електронних компонентів. Для визначення положення ротора було застосовано датчики Холла. Цифрова частина системи керування була реалізована на мікроконтролері Arduino Nano. Зазначимо також, що моделі мікроконтролерів у бібліотеці Proteus не містять керуючих програм. Такі керуючі програми повинні бути розроблені в середовищі інших програмних продуктів і додаватись до моделі обраного мікроконтролера з використанням графічного інтерфейсу користувача Proteus.

У статті [27] представлено платформу мехатронного привода з відкритою архітектурою, що містить трифазний серводвигун на основі БДПС у промисловій роботизованій осі (суглобі). Використано послідовну та ітеративну методологію мехатронного проектування, що інтегрує електронне проектування, цифрове керування, механічну розробку та експериментальне прототипування, з акцентом на роботу з розімкнутим циклом. Електронна плата була розроблена з використанням принципових схем і друкованої плати та верифікована в програмному середовищі Proteus Design Suite 8.15 (Labcenter Electronics Ltd., Лондон, Велика Британія) для перевірки послідовностей сигналів керування драйверами та роботи інвертора.

Ще одне програмне забезпечення, яке застосовується науковцями для моделювання і розробки алгоритмів керування БДПС, – це PSpice [28, 29]. Розроблене Cadence Design Systems, PSpice використовується для математичного аналізу аналогових та аналогово-цифрових електронних схем. Воно дає змогу розробникам моделювати, тестувати та перевіряти поведінку схем, включаючи аналіз форми сигналу та допуски компонентів перед фізич-

ним прототипуванням. Хоча PSpice орієнтований здебільшого на електроніку, існує можливість моделювання також електромеханічних систем. Для створення моделі БДПС користувачам рекомендується застосовувати функціональний компонент (бібліотеку) Analog Behavioral Modeling (ABM), який дає змогу моделювати аналогові схеми за допомогою математичних рівнянь.

Також необхідно відзначити розроблений компанією Qorvo безплатний для користувачів симулятор QSPICE, призначений для моделювання аналогових та аналогово-цифрових систем. Симулятор містить модель БДПС та засоби реалізації його алгоритмів керування.

Із проведеного аналізу програмних засобів імітаційного моделювання роботи контролерів БДПС можна зробити висновок, що пакет програм MATLAB/Simulink найчастіше серед інших використовується в науково технічних розробках та дослідженнях за розглянутою в статті тематикою.

Висновки. Огляд наукових та технічних матеріалів засвідчив значний інтерес науковців і технічних спеціалістів до застосування сучасних програмних і апаратних засобів розробки систем керування електроприводів із БДПС у своїх дослідженнях і розробках.

Базовим програмним забезпеченням для розробки систем керування електроприводів із БДПС можна вважати так звані інтегровані середовища розробки (IDE - Integrated Development Environments), що доступні для завантаження з сайтів виробників мікроконтролерів. Частина IDE має свої власні вбудовані компілятори для написання програм на мовах високого рівня (такі як C/C++) та компілювання їх в машинний код. Такі IDE дозволяють писати, компілювати та відлагоджувати керуючу програму, реалізуючи повний цикл розробки.

Застосування IDE можна рекомендувати для великих проєктів зі складними керуючими програмами, наприклад, при реалізації електроприводів із БДПС і векторним керуванням. Реалізацію векторних алгоритмів керування БДПС доцільно проводити на основі 32-бітних мікроконтролерів.

Для дослідницьких та учбових проєктів можна рекомендувати такі середовища розробки: STM32CubeIDE (розробник STMicroelectronics), IDE Code Composer Studio (розробник TI), S32 Design Studio (розробник NXP), MPLAB X IDE (розробник Microchip), AURIX™ Development Studio (розробник Infineon). Усі зазначені IDE є безкоштовними (IDE Code Composer Studio – безкоштовне, починаючи з версії 7) і не мають обмежень на розмір коду керуючої програми.

Серед програмних засобів імітаційного моделювання роботи контролерів БДПС, як засвідчив огляд наукових робіт, найбільш застосованим є програмний пакет Matlab/Simulink, який має інтуїтивно зрозуміле і зручне робоче середовище та численні бібліотеки моделей електротехнічних елементів, зокрема і електричних машин. У бібліотеці DSP System Toolbox™ цього програмного пакету наявна велика кількість елементів для реалізації алгоритмів цифрових систем керування. Крім того, є можливість інтеграції до цього пакету програм окремих сторонніх програмних продуктів, таких як Model-Based Design Toolbox (MBDT) від компанії NXP. Все вище зазначене дає змогу рекомендувати використання Matlab/Simulink і в подальших дослідженнях електроприводів із БДПС.

При виборі апаратних засобів (макетні плати, мікроконтролери і т. ін.) реалізації проєктів із розробки систем керування БДПС можна рекомендувати надавати перевагу таким виробникам, як Texas Instruments, STMicroelectronics, Microchip, NXP Semiconductors, Infineon Technologies та ін., що надають розробникам вільний доступ до програмного забезпечення, орієнтоване на вибір елементної бази, технічну підтримку і створення керуючих програм систем керування БДПС на всіх етапах розробки. Завдяки цьому досягається прискорене виконання проєкту на етапі розробки прототипу системи керування.

Також з аналізу літератури можна зробити висновок, що використання 8-бітних мікроконтролерів через їхню відносно низьку продуктивність та співставну вартість порівняно з моделями 32-бітних мікроконтролерів, які призначені для бюджетних рішень, слід обмежувати проєктами навчального характеру та такими, що реалізують доволі нескладні алгоритми керування, такі як алгоритм скалярного керування БДПС.

Викладені матеріали можуть бути корисними для наукових і інженерно-технічних фахівців, викладачів та студентів при реалізації проєктів комплексних досліджень електроприводів із БДПС і СДПМ.

Робота виконувалась у рамках реалізації Проєкту Національного фонду досліджень України № 2025.06/0044 [ПРОЕКТ «Електромеханічні системи підвищеної енергоефективності для літальних апаратів», № 2025.06/0044, 2025-2026 pp.].

ANALYSIS OF SOFTWARE AND HARDWARE FOR DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC DRIVES WITH BLDC MOTORS

L.I. Mazurenko, V.V. Grebenikov, O.V. Dzhura, M.O. Shykhnenko, P.P. Podeiko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: suoma1715@gmail.com

The article is devoted to a review of software and hardware tools for developing digital control systems for electric drives with brushless DC motors (BLDC motors) and an analysis of their main features and characteristics. The main stages of developing control systems for BLDC motors recommended by the authors are outlined. Based on scientific publications and information from manufacturers specializing in the development and manufacture of microcontrollers and digital devices, a review of modern hardware tools for prototyping control systems of BLDC motors, such as starter (evaluation) boards (kits), developer demonstration boards, etc., is carried out. Specialized software tools for developing electrical circuits and firmware for controllers of control systems of BLDC motors are considered. The use of simulation software tools in scientific research related to BLDC motor drives for setting up control algorithms and selecting controller parameters before creating a prototype of a BLDC motor control system is analyzed. Recommendations are given for the use of the software and hardware tools considered in the work for the development of control systems for electric drives with BLDC motors both in scientific theoretical and experimental investigations. Ref. 29, fig. 4, tables 2.

Keywords: brushless DC motor, control system, microcontroller, software, hardware.

1. Eklund P., Eriksson S. The Influence of Permanent Magnet Material Properties on Generator Rotor Design. *Energies*. 2019. Vol. 12. Issue 7. No 1314. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12071314>
2. Mazurenko L., Grebenikov V., Dzhura O. Elements overview and a commercial uav electric drive model. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. No 6. Pp. 112–118. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-6/112>
3. Chen J., Wang M., Ren X. The Control System Design of BLDC Motor. *Proceedings of the 2018 International Conference on Mechanical, Electrical, Electronic Engineering & Science (MEEES 2018)*, Atlantis Press, May 2018. Pp. 343–349. DOI: <https://doi.org/10.2991/meees-18.2018.60>
4. Yorat E., Özbek N., Saribulut L. Performance evaluation of brushless direct current motor control methods through low-cost microcontroller-based real-time experiments. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 2023. Vol. 11. No 2. Pp. 498–510. DOI: <https://doi.org/10.29109/gujsc.1229896>
5. Salah W.A., Ishak D., Hammadi K. J., Taib S. Development of a BLDC motor drive with improved output characteristics. *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2011. Vol. 2011. No 3. Pp. 258–261.
6. Zhang F., Kong X., Li F., Zhang Y. The Design of Controller for BLDC Based on STM32. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 446. Issue 4. No 042047. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/446/4/042047>
7. Prayogo R. C., Triwiyatno A., Riyadi, M. A. Field Oriented Control Implementation on BLDC Motor Controller with PI and SVPWM using STM32F103C8T6. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2622. Issue 1. No 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2622/1/012025>
8. Luo, Y. (2026). Integrated Research on Design and Implementation of an Embedded Quadcopter UAV System Based on STM32. *Applied and Computational Engineering*. 2026. Vol. 220. Pp. 234–246. DOI: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2026.BJ31650>
9. Carey, K.D., Zimmerman, N. and Ababei, C. (2019), Hybrid field oriented and direct torque control for sensorless BLDC motors used in aerial drones. *IET Power Electronics*. 2019. Vol 12. Issue 3. Pp. 438–449. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5231>
10. Yuniarto M. N., Rijanto E., Mukhlisin A. Design and performance analysis of brushless direct current (bl dc) motor controller for electric scooter. *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing: Bristol, UK. 2019. Vol. 694. Issue 1. No 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/694/1/012004>
11. LAUNCHXL-F28027F. URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28027F#overview> (Accessed at 12.05.2026)
12. STSPIN32G4 demonstration board for three-phase brushless motors. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/evspin32g4nh.html#documentation> (Accessed at 11.05.2026)

13. CONTROLSUITE. URL: <https://www.ti.com/tool/CONTROLSUITE#overview> (Accessed at 12.05.2026)
14. Lebel A. Design and Experimental Evaluation of a BLDC Motor– Magnetic Gear Drive for a Rotating Biological Contactor. 2026. 7 p. DOI: <https://doi.org/10.31224/6605> (Preprint, engrXiv, posted 2026-03-09)
15. Automotive Math and Motor Control Library (AMMCLib). URL: <https://www.nxp.com/design/design-center/software/automotive-software-and-tools/automotive-math-and-motor-control-library-ammclib:AMMCLIB> (Accessed at 11.05.2026)
16. Rahman M. A., Abushaiba A. A., Elrajoubi A. M. Integration of C2000 Microcontrollers with MATLAB Simulink Embedded Coder: A Real-Time Control Application. 2024 7th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE), Los Angeles, CA, USA, 2024. Pp. 131–136. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEEGE62093.2024.10744177>
17. Code Generation For Stm32 Mcus Using Matlab and Simulink: March 2020. URL: <https://ru.scribd.com/document/506135596/en-stm32-matlab> (Accessed at 12.05.2026)
18. Supported microcontrollers. URL: <https://docs.simplefoc.com/microcontrollers> (Accessed at 11.05.2026)
19. Skuric A., Bank H. S., Unger R., Williams O., González-Reyes D. SimpleFOC: A Field Oriented Control (FOC) Library for Controlling Brushless Direct Current (BLDC) and Stepper Motors. *Journal of Open Source Software*. Vol. 7. No 74. No 4232. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.04232>
20. Xiao Q., Wan R., Wu Z., Hsu W., Huang L., Qin F. Research on the simulation of BLDC control system based on extended Kalman observer. *Proceedings of the 9th International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering*. (EITCE '25), Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2025. Pp. 792–796. DOI: <https://doi.org/10.1145/3766671.3766809>
21. Kumar N. S., Chandrasekaran G., Thangavel J., Vanchinathan K., Gnanavel C., Priyadarshi N., Bhaskar M. S., Hussien M. G., El-Sousy F. F. M., Ali M. M. A Novel Design Methodology and Numerical Simulation of BLDC Motor for Power Loss Reduction. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 20. No 10596. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122010596>
22. Viorel A. C., Crăciunaș G. Open-loop BLDC motor simulation using the Motor Control blockset from Matlab library. *International Journal of Advanced Statistics and IT&C for Economics and Life Sciences*. 2025. Vol. 15. No 1. Pp. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.2478/ijasitels-2025-0013>
23. Dániel N., Hajdú S. Simulation of BLDC Motor Drive Systems for Electric Vehicles Using Matlab Simulink. *International Journal of Engineering and Management Sciences*. 2023. Vol. 8. No. 1. Pp. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2023.1.6>
24. Kumar A., Naik M. V., Kumar R., Aman. Design and analysis of BLDC motor speed control for electric vehicles powered by solar PV and grid supply. *Discover Electronics*. 2025. Vol. 2. Issue 1. No 60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44291-025-00097-4>
25. Shenbagalakshmi R., Mittal S.K., Subramaniyan J., Vengatesan V., Manikandan D., Ramaswamy K. Adaptive speed control of BLDC motors for enhanced electric vehicle performance using fuzzy logic. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No 12579. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90957-6>
26. Stevanus A., Calvinus Y., D. S. Naga. Simulation of Brushless DC Motor Controller in SEM Electric Car Prototypes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 3rd Tarumanagara International Conference of the Applications of Technology and Engineering (TICATE), 3-4 August 2020, Jakarta, Indonesia. 2020. Volume 1007. Issue 1. No 012177. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012177>
27. Padilla-García E. A., Cruz-Deviana M. R., Díaz-Salgado J., Cruz-Morales R. D., González-Sierra, J. The Development and Experimental Implementation of an Open Mechatronic Drive Platform for a BLDC Servomotor in an Industrial Robotic Axis. *Processes*. 2026. Vol. 14. Issue 3. No 519. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr14030519>
28. Gheorghe L. A., Gogu C. L., Cavache R. C., Dobrescu L., Dobrescu D. Simulation Model for Brushless DC Motor Loads Controlling. 2023 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2023. Pp. 249–252. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAS59036.2023.10303714>
29. Hsieh Y.-T., Liou G.-T., Jeng S.-L., Chieng W.-H., Lai J.-S., Chang E.-Y. Copolar Synchronous Switching Method for BLDC Motor Control in EV Application. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. Pp. 116729–116744. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3584259>

Надійшла: 04.06.2026

Прийнята: 17.06.2026

Submitted: 04.06.2026

Accepted: 17.06.2026