

УДК 621.3

<https://doi.org/10.31713/vt2202518>

**Рясна О. В.** [1; ORCID ID: 0000-0001-6917-6950],  
старший викладач,  
**Чепіжний А. В.** [1; ORCID ID: 0000-0002-7540-8313],  
к.т.н., доцент,  
**Назаренко О.** [1, 2; ORCID ID: 0009-0002-2373-1159],  
аспірант,  
**Комар А. В.** [3; ORCID ID: 0009-0009-1754-0410],  
аспірант,  
**Клименко О.** [4; ORCID ID: 0009-0000-5924-3697],  
**Угольніков Г. Г.** [5; ORCID ID: 0009-0003-0508-1997],  
аспірант,  
**Тесленко О. В.** [1; ORCID ID: 0009-0001-3177-9462],  
асистент,

<sup>1</sup>Сумський національний аграрний університет, м. Суми

<sup>2</sup>АТЗТ «Українські мотори», м. Харків

<sup>3</sup>Державний університет «Житомирська політехніка» м. Житомир

<sup>4</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків

<sup>5</sup>Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

## РОЗРОБКА МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ BLDC-ДВИГУНОМ З НАЯВНИМИ І ВІДСУТНІМИ ДАТЧИКАМИ ХОЛЛА

У статті розглядаються методи управління безщітковими двигунами постійного струму (BLDC) з використанням мікроконтролерів. Особливу увагу приділено порівнянню управління із застосуванням датчиків Холла та сенсорлес-управління. Наведено принципи роботи кожного з підходів, їх переваги та недоліки. Описано алгоритми визначення положення ротора та формування сигналів, що управляють, для трифазної комутації. Також розглянуті практичні аспекти реалізації схем управління на базі сучасних мікроконтролерів, включаючи обробку сигналів датчиків Холла, оцінку положення ротора ЕРС та програмну реалізацію ШІМ. Результати роботи підтверджують ефективність запропонованих підходів до різних застосувань BLDC-двигунів.

**Ключові слова:** BLDC-двигун; електропривід; система керування; енергоефективність; мікроконтролер.

**Вступ.** Завдяки розвитку силової електроніки та появі доступних транзисторних ключів, вентильні безколекторні двигуни (BLDC) набули широкого застосування. Важливим фактором стало



також використання потужних неодимових магнітів, що дозволило суттєво зменшити габарити двигуна при збереженні високих експлуатаційних характеристик. Такі електроприводи активно застосовуються у різних галузях завдяки своїй високій енергоефективності, точному керуванню та довговічності. Вони стали невід'ємною частиною сучасної побутової техніки, де їх використовують у пральних машинах, кондиціонерах та електричних вентиляторах. Перехід на BLDC-технологію в цих пристроях дозволив суттєво знизити енергоспоживання – у випадку з вентиляторами економія може сягати 30–50% порівняно з традиційними двигунами. Пилососи з BLDC-двигунами демонструють покращену продуктивність завдяки можливості точно регулювати швидкість обертання та миттєво адаптуватися до змін навантаження.

У сфері інформаційних технологій BLDC-двигуни використовуються в жорстких дисках, де вони забезпечують плавне обертання шпинделів з мінімальним енергоспоживанням. Їх довговічність та стабільність роботи роблять їх ідеальним вибором для пристроїв, які мають працювати безперервно протягом тривалого часу. Високий ККД цих двигунів також сприяє зниженню тепловиділення, що особливо важливо для закритих систем, таких як комп'ютерне обладнання. Робототехніка – ще одна галузь, де BLDC-двигуни демонструють свою перевагу. У сервісних роботах та роботизованих маніпуляторах вони забезпечують більш точне позиціонування та контроль зусилля порівняно з кроковими двигунами. Це досягається за рахунок можливості динамічно регулювати момент без необхідності постійної подачі максимального струму. У дронах BLDC-двигуни дозволяють точно контролювати обертання гвинтів, що є критично важливим для стабілізації польоту багатомоторних систем.

Також, аналізуючи табл. 1, можна зробити висновок, що у порівнянні з щітковими та асинхронними двигунами, двигуни BLDC мають багато переваг і мало недоліків. Безщіткові двигуни вимагають менше обслуговування, тому вони мають довший термін служби порівняно з щітковими двигунами постійного струму. Оскільки ротор виготовлений з постійних магнітів, інерція ротора менше, в порівнянні з іншими типами двигунів. Це покращує характеристики розгону та гальмування, скорочуючи робочі цикли. Їх лінійні характеристики швидкості/крутного моменту забезпечують точне регулювання швидкості. З безщітковими двигунами не

проводиться перевірка щіток, що робить їх оптимальними для застосування в зонах обмеженого доступу.

Таблиця 1

Порівняння BLDC, колекторного та асинхронного двигунів			
Характеристика	BLDC-двигун	Колекторний двигун	Асинхронний двигун
Комутація	Електронна (датчики Холла)	Механічна (щітки)	Відсутня (обертове поле)
Обслуговування	Мінімальне	Періодичне тех. обслуговування	Середнє
Термін служби	Довгий	Обмежений зносом щіток	Довгий
ККД	Високий (90–95%)	Середній	Середній/високий
Потужність/розмір	Висока(краще охолодження)	Середня	Нижча (подвійні обмотки)
Інерція ротора	Низька (краща динаміка)	Висока	Висока
Діапазон швидкостей	Широкий	Обмежений щітками	Обмежений (ковзання)
Пусковий струм	Номінальний	Номінальний	До 7 номінального
Керування	Потрібен контролер	Для фіксованої шв. не потрібен контролер	Для фіксованої шв. не потрібен контролер
Вартість	Вища (неодимові магніти)	Низька	Середня
Електромагнітні перешкоди	Низькі	Високі (іскріння щіток)	Середні

Попри поширення BLDC-двигунів, ефективність їх застосування значною мірою залежить від правильного вибору та реалізації системи керування. Це зумовлює необхідність дослідження структури електроприводу та принципів роботи вентильного безколекторного двигуна.

**Аналіз літератури.** BLDC-двигуни є об'єктом активного дослідження з боку науковців завдяки їх високій ефективності, надійності та придатності до роботи у складних умовах. У роботі Каруп А. та ін. [1] запропоновано метод ідентифікації динамічних параметрів BLDC-мотора, що дозволяє створювати точні математичні моделі систем електроприводу. Автори акцентують увагу на валідації отриманих моделей шляхом порівняння симуляційних і експериментальних даних, що підтверджує практичну доцільність



обраного підходу. У публікації Bai L. [3] детально розглянуто побудову електроприводів із BLDC-двигунами, особливу увагу приділено структурі системи керування, принципам комутації та взаємодії між силовою частиною та мікроконтролером. Це дослідження є корисним для розуміння архітектури таких систем у контексті промислових та побутових застосувань. Робота Yedamale P. [4] виступає своєрідним фундаментом для початкового розуміння принципів роботи BLDC-двигуна. У ній автор описує конструктивні особливості, варіанти керування (з датчиками Холла та без них) та вплив типів збудження на характеристики двигуна. Цей матеріал широко використовується як у навчальних програмах, так і в прикладних дослідженнях. У статті Chun T. W. та ін. [7] розглянуто метод бездатчикового керування BLDC-двигуном із застосуванням гістерезисного компаратора, що дозволяє визначати положення ротора без датчиків Холла. Такий підхід є особливо актуальним у випадках, коли вартість, надійність або умови експлуатації не дозволяють використовувати традиційні датчики. Це відкриває нові можливості для побудови спрощених, економічно ефективних електроприводів у компактних пристроях або агресивних середовищах.

Проаналізовані публікації охоплюють як фундаментальні основи, так і новітні підходи до побудови та оптимізації систем електроприводу з BLDC-двигунами, що підтверджує актуальність теми дослідження та створює наукову базу для подальших розробок у цій галузі.

**Метою роботи** є побудова ефективної системи електроприводу на основі вентильного безколекторного двигуна постійного струму (BLDC) шляхом аналізу його конструктивних особливостей, принципів роботи, методів датчикового та бездатчикового керування.

**Особливості конструкції BLDC-двигуна.** З метою поглибленого аналізу внутрішньої будови вентильного безколекторного двигуна доцільно розглянути його тривимірну розкладену модель, що представлена на рис. 1.

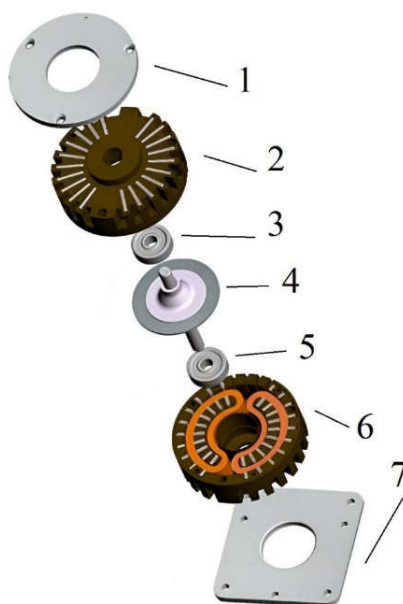


Рис. 1. Конструкція вентиляного безколекторного двигуна (BLDC) у розкладеному вигляді

На зображенні послідовно представлені основні конструктивні елементи BLDC-мотора. Елемент 1 – передня металева кришка, що забезпечує механічний захист та жорстке кріплення корпусу. Наступним розміщений ротор (2), який містить постійні магніти, що створюють магнітне поле. Він закріплений на валу (3), який передає обертальний момент до виконавчого механізму. Обертання вала забезпечується за допомогою підшипників (4), які гарантують низький рівень тертя та стабільність обертання. Елемент 5 – це внутрішнє кільце, яке слугує опорою для роторної частини та фіксації на підшипнику. Статор (6) представлений у вигляді сердечника з пазами, в яких розміщено мідні обмотки. Саме вони створюють змінне електромагнітне поле, що взаємодіє з постійними магнітами ротора. Елемент 7 – це задня кришка, що завершує конструкцію двигуна і забезпечує його механічну цілісність.

Конструктивна особливість BLDC-двигунів полягає в тому, що роторний вузол виконаний у вигляді постійних магнітів, тоді як обмотки розташовані на статорі (рис. 2). Таке компонування усуває необхідність у колекторному механізмі, оскільки відпадає потреба в живленні обмоток ротора. Електромагнітна система в даному випадку представлена статорними обмотками, що є принциповою відмінністю від класичної схеми.

Конструкція BLDC-двигуна відрізняється більшою простотою у порівнянні з асинхронними аналогами. Оскільки ротор у ньому

оснащений постійними магнітами, тепловіддача в цій частині мінімальна, що робить непотрібним додаткове охолодження за допомогою вентилятора.

Статор традиційно виготовляють з електротехнічної сталі, яка має спеціальні пази для укладки обмоток. Щоб зменшити втрати на вихрові струми, його виконують шихтованим – з тонких пластин завтовшки 0,3–0,5 мм. Однак велика площа пазів може спричинити спотворення магнітного поля, хоча цього можна уникнути за рахунок оптимального розташування пазів щодо осей статора. Ще однією особливістю є потенційне виникнення шуму через вібрації обмоток під час роботи двигуна. Для запобігання цьому іноді використовують альтернативні рішення, наприклад, закріплення статора в гумовій основі, що значно знижує вібраційні ефекти.

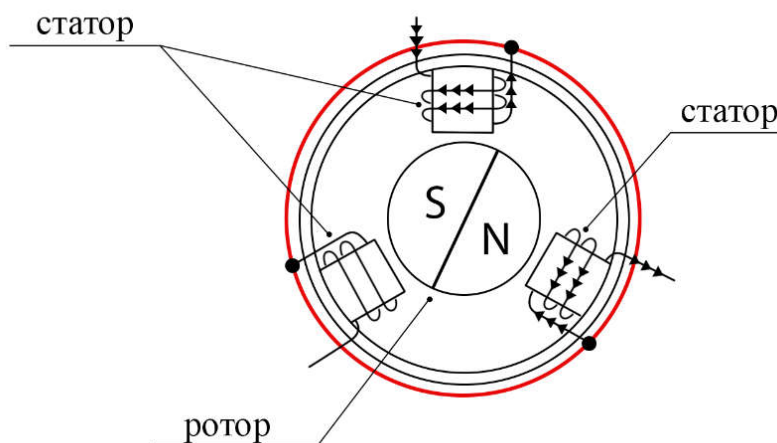


Рис. 2. Принципова схема роботи двигуна BLDC

Ротор може бути як шихтованим, так і масивним, а його магнітні властивості залежать від типу та розміщення магнітів. Від цього безпосередньо залежить конфігурація магнітного потоку та максимальний крутний момент, який здатний розвивати двигун. Для порівняння характеристик різних магнітних матеріалів використовують розмагнічувальні криві, які наведено на рис. 3.

В якості постійних магнітів найбільш широко застосовуються наступні типи матеріалів: 1. Алніко (Al, Ni, Co, Fe); 2. Ферити; 3. Загальні рідкоземельні матеріали.

Нижче наведено порівняльну таблицю (табл. 2) основних матеріалів для магнітів.

Таблиця 2

**Порівняльна таблиця основних матеріалів для магнітів**

Характеристика	Альніко (Al, Ni, Co, Fe)	Ферити	Рідкоземельні матеріали (наприклад, NdFeB, SmCo)
Енергетичний продукт (MGOe)	5–10	3–5	25–50 (NdFeB), 15–30 (SmCo)
Температурна стійкість	До 550° C (найвища)	До 250° C	До 200–300° C (залежить від типу)
Чутливість до корозії	Низька	Дуже низька	Висока (NdFeB потребує захисту)
Застосування	Високо-температурні системи	Бюджетні двигуни, побутові двигуни техніка	Високо-продуктивні (дрони, електромобілі, промислові приводи)
Переваги	Стабільність при високих температурах	Дешева стійкість до корозії	Висока енергія домагнітного поля, компактність
Недоліки	Низька коерцитивна сила	Низька потужність	Висока вартість, чутливість до перегріву

Сучасний розвиток BLDC-двигунів пов'язаний з пошуком нових матеріалів та технологій, які дозволять поєднувати високий енергетичний продукт рідкоземельних магнітів з їх більшою доступністю та стійкістю до високих температур.

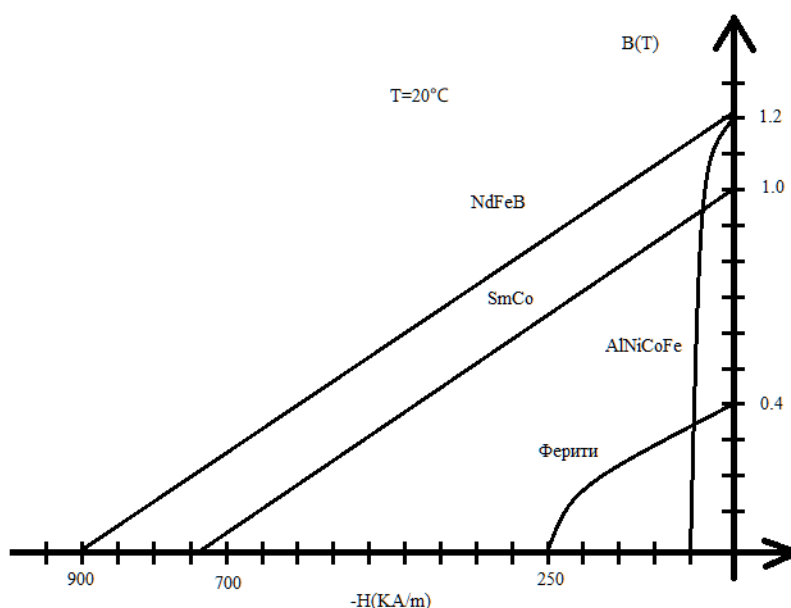


Рис. 3. Розмагнічувальні криві для різних типів постійних магнітів



**Синтез системи керування BLDC двигуном.** Основною вимогою до системи керування BLDC-двигунами є синхронізація перемикачів силових ключів інвертора з поточним місцезнаходженням ротора. Традиційна схема передбачає використання датчиків положення, проте їх точність може варіюватись залежно від вимог до системи. У випадках, коли не потрібне точне визначення кута повороту, достатньо лише орієнтовної інформації про зону розташування ротора для коректної комутації. У трифазних BLDC-двигунах застосовується стандартний шестиключовий інвертор, побудований за мостовою схемою. Принцип роботи такої системи базується на регулюванні струмів у обмотках статора відповідно до позиції ротора, що забезпечує формування обертового магнітного поля та стабільне функціонування двигуна.

*Система на базі зворотного зв'язку за датчиками Холла.* Структурна схема керування вентильним двигуном постійного струму (рис. 4) ілюструє типову архітектуру подібних систем. Основу схеми становить мікроконтролер, який відповідає за генерацію широтно-імпульсних сигналів (PWM) відповідно до заданих параметрів руху, таких як напрямок обертання (Вперед/Назад), команда пуску (Пуск/Стоп) та опорний сигнал (Задане значення). Ці сигнали подаються на драйвер силових ключів, зазвичай реалізований на IGBT або MOSFET-транзисторах, який забезпечує узгодження рівнів керування та безпосередню комутацію силових елементів.

Трифазна мостова схема інвертора складається з шести транзисторів (Q0–Q5), які перемикаються у певній послідовності згідно з положенням ротора, формуючи відповідні фази струму в обмотках статора (А, В, С). Внаслідок комутації створюється обертове магнітне поле, яке взаємодіє з постійними магнітами ротора. Для визначення поточного положення ротора використовуються датчики Холла, розміщені відповідно до фаз (Датчик Холла А, Датчик Холла В, Датчик Холла С). Їх сигнали надходять на мікроконтролер і служать основою для формування алгоритму комутації, що дозволяє точно синхронізувати сигнали керування з позицією ротора, забезпечуючи плавність та ефективність обертання.

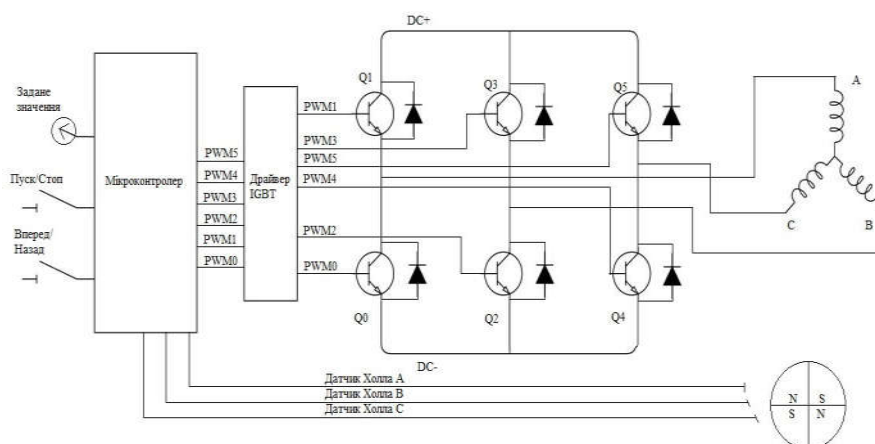


Рис. 4. Структурна схема електроприводу з вентильним безколекторним двигуном (BLDC)

Схема (рис. 5) ілюструє типову реалізацію електронної комутації фаз у BLDC-двигуні. У кожен момент часу активними є одна пара ключів: один із верхнього плеча (Q1, Q3, Q5) і один із нижнього (Q0, Q2, Q4). Це створює замкнений ланцюг струму через дві з трьох фаз двигуна, забезпечуючи формування обертового магнітного поля в статорі. Комбінації активних ключів визначаються сигналами з трьох датчиків Холла, встановлених у двигуні, що дозволяє точно керувати положенням ротора. Така система є основою для реалізації датчикового керування BLDC-приводами. Часова діаграма (рис. 6) наочно демонструє взаємозв'язок між сигналами датчиків Холла, відповідними комбінаціями активних ключів інвертора та формуванням струмів у фазних обмотках.

Кожному унікальному стану датчиків Холла (всього 6 комбінацій) відповідає певна пара активних ключів, що забезпечує правильне формування обертового магнітного поля (табл. 3).

Таблиця 3

Стан датчиків Холла	Фаза	Ввімкнені ключі
101	A-B	Q1;Q2
100	A-C	Q1;Q4
110	B-C	Q3;Q4
010	B-A	Q3;Q0
011	C-A	Q5;Q0
001	C-B	Q5;Q2

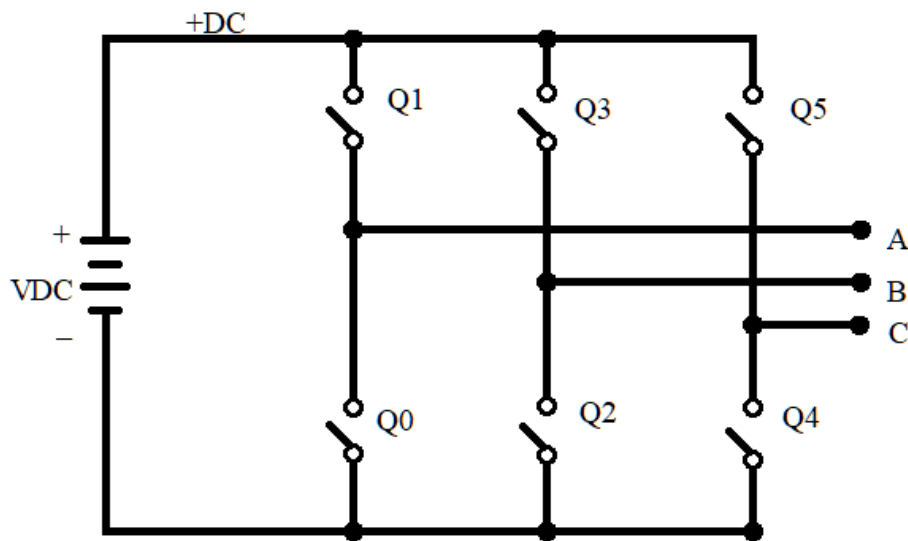


Рис. 5. Мостова схема комутації фаз трифазного BLDC-двигуна з позначенням силових ключів

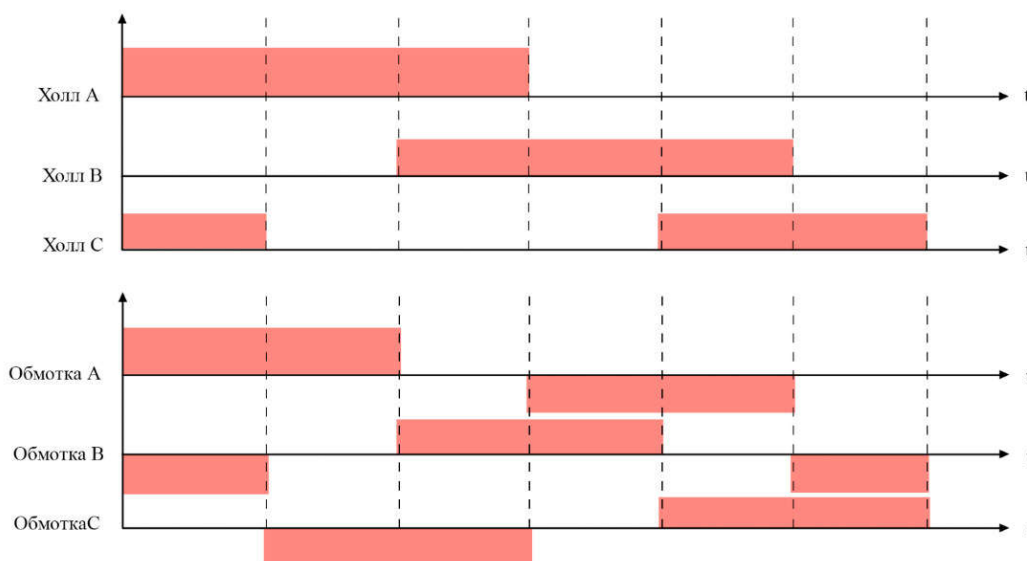


Рис. 6. Часова діаграма

*Бездатчикова система керування.* Двигуни постійного струму BLDC можуть бути комутовані шляхом моніторингу зворотних сигналів ЕРС замість датчиків Холла. У кожній комутаційній послідовності одна з обмоток подається позитивна напруга, друга негативна, а третя залишається відкритою. Сигнал датчика Холла змінює стан при перетині полярності напруги зворотної ЕРС з позитивної на негативну або з негативної на позитивну. В ідеальних випадках це відбувається при перетині нуля зворотної ЕРС, але практично буде затримка через характеристики обмотки. Ця

затримка повинна бути компенсована мікроконтролером. На рисунку 7 показана структурна схема бездатчикового управління двигуном постійного струму. Ще одним аспектом, який слід враховувати, є дуже низькі швидкості. Оскільки зворотна ЕРС пропорційна швидкості обертання, при дуже низькій швидкості зворотна ЕРС буде мати дуже низьку амплітуду для виявлення перетину нуля. Двигун повинен бути запущений у розімкненому контурі, з нерухомого місця, і коли створюється достатня зворотна ЕРС для виявлення нульової поперечної точки, управління слід перенести на зворотне зондування ЕРС. Мінімальна швидкість, з якою можна відчувати зворотну ЕРС, обчислюється на основі постійної задньої ЕРС двигуна. За допомогою цього методу комутації можна усунути датчики Холла, а в деяких двигунах також можна усунути магніти для датчиків Холла. Це спрощує конструкцію двигуна і знижує вартість. Це вигідно, якщо двигун працює в запиленому або масляному середовищі, де потрібне періодичне чищення для належного сприйняття датчиками Холла. Те ж саме стосується, якщо мотор встановлений в менш доступному місці.

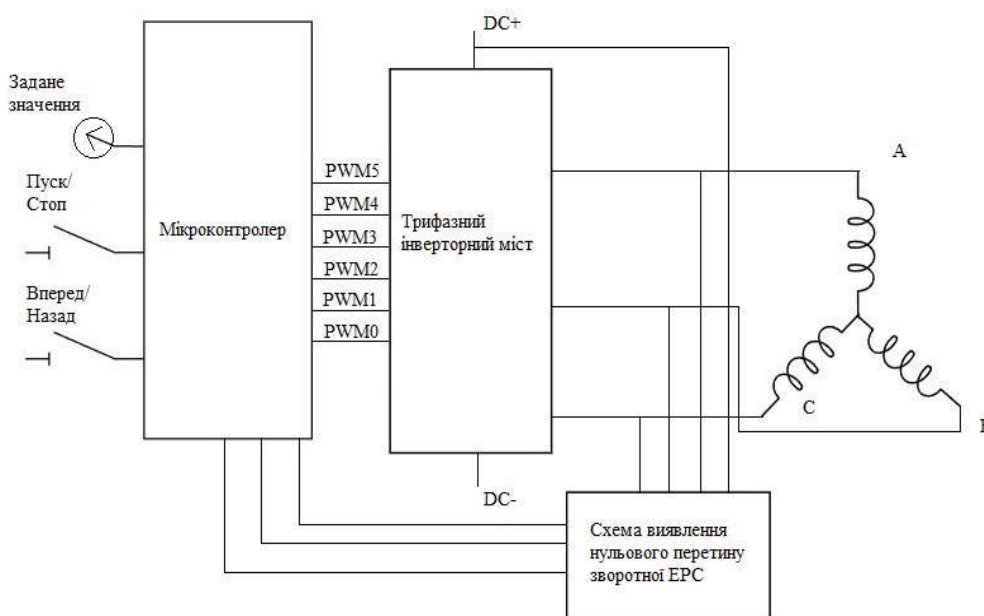


Рис. 7. Структурна схема бездатчикового керування

Вибір між датчиковим та бездатчиковим керуванням залежить від вимог до точності, бюджету та умов експлуатації, порівняльні характеристики наведено в табл. 4.



Таблиця 4

## Ключові параметри датчикових та бездатчикових систем

Критерій	З датчиками Холла	Без датчиків (сенсорлесс)
Точність визначення положення ротора	95%	80%
Надійність запуску з місця	98%	70%
Складність апаратної частини	70%	90%
Складність програмної реалізації	60%	85%
Робота на низьких обертах	95%	65%
Енергоефективність	85%	90%
Надійність в екстремальних умовах (вібрації, пил)	75%	90%

Сучасні BLDC-електроприводи дозволяють використовувати гнучкі схеми керування, адаптовані до конкретних завдань. Для критичних застосувань оптимальні системи з датчиками Холла, тоді як у масовій продукції перевага на боці бездатчикових рішень.

**Висновки.** Електроприводи на основі вентильних безколекторних двигунів постійного струму демонструють високу ефективність, надійність і універсальність у застосуванні. Відсутність щітково-колекторного вузла дозволяє уникнути іскріння, зменшити втрати на комутацію та забезпечити тривалий термін служби. Завдяки електронній комутації та використанню ефективних магнітних матеріалів, BLDC-двигуни мають високий ККД, щільність потужності та широкий діапазон регулювання швидкості. Вони менш схильні до перегріву, здатні витримувати великі навантаження та можуть працювати в агресивних або вологих середовищах (за належного захисту електроніки).

Представлені структурні рішення та порівняльний аналіз доводять, що BLDC-мотори мають значні переваги над традиційними колекторними та асинхронними двигунами за більшістю ключових параметрів. Однак для ефективної реалізації таких електроприводів необхідне застосування спеціалізованих систем керування з датчиками положення та імпульсною модуляцією. Це визначає актуальність подальших досліджень у напрямку оптимізації керуючих алгоритмів та мікропроцесорних систем для роботи з BLDC-моторами в різних галузях техніки.

1. Kapun A. et al. Identifying dynamic model parameters of a BLDC motor. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008. № 9. Т. 16. С. 1254–1265. 2. Bist V., Singh B. PFC Cuk converter-fed BLDC motor drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. № 2. Т. 30. С. 871–887. 3. Bai L. Electric drive system with BLDC motor. *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. IEEE*. 2011. С. 359–363. 4. Yedamale P. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. *Microchip Technology Inc*. 2003. № 1. Т. 20. С. 3–15. 5. Gadekar K., Joshi S., Mehta H. Performance improvement in BLDC motor drive using self-tuning PID controller. *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). IEEE*. 2020. С. 1162–1166. 6. Dakheel H. S., Abdullah Z. B., Shneen S. W. Advanced optimal GA-PID controller for BLDC motor. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2023. № 4. Т. 12. С. 2077–2086. 7. Chun T. W. et al. Sensorless control of BLDC motor drive for an automotive fuel pump using a hysteresis comparator. *IEEE transactions on power electronics*. 2013. Т. 29. № 3. С. 1382–1391.

## REFERENCES:

1. Kapun A. et al. Identifying dynamic model parameters of a BLDC motor. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008. № 9. Т. 16. С. 1254–1265. 2. Bist V., Singh B. PFC Cuk converter-fed BLDC motor drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014. № 2. Т. 30. С. 871–887. 3. Bai L. Electric drive system with BLDC motor. *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. IEEE*. 2011. С. 359–363. 4. Yedamale P. Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. *Microchip Technology Inc*. 2003. № 1. Т. 20. С. 3–15. 5. Gadekar K., Joshi S., Mehta H. Performance improvement in BLDC motor drive using self-tuning PID controller. *2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). IEEE*. 2020. С. 1162–1166. 6. Dakheel H. S., Abdullah Z. B., Shneen S. W. Advanced optimal GA-PID controller for BLDC motor. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2023. № 4. Т. 12. С. 2077–2086. 7. Chun T. W. et al. Sensorless control of BLDC motor drive for an automotive fuel pump using a hysteresis comparator. *IEEE transactions on power electronics*. 2013. Т. 29. № 3. С. 1382–1391.

---



**Riasna O. V.** [1; ORCID ID: 0000-0001-6917-6950],

Senior Lecturer,

**Chepizhnyi A. V.** [1; ORCID ID: 0000-0002-7540-8313],

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,

**Nazarenko O.** [2; ORCID ID: 0009-0002-2373-1159],

Post-graduate Student,

**Komar A. V.** [3; ORCID ID: 0009-0009-1754-0410],

Post-graduate Student,

**Klymenko O.** [4; ORCID ID: 0009-0000-5924-3697],

**Uholnikov H. H.** [5; ORCID ID: 0009-0003-0508-1997],

Post-graduate Student,

**Teslenko O. V.** [1; ORCID ID: 0009-0001-3177-9462],

Assistant,

<sup>1</sup>*Sumy National Agrarian University, Sumy*

<sup>2</sup>*ATZT «Ukrainian Motors», Kharkiv*

<sup>3</sup>*Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr*

<sup>4</sup>*V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv*

<sup>5</sup>*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

## **DEVELOPMENT OF A MICROCONTROLLER CONTROL SYSTEM FOR BLDC MOTOR WITH PRESENT AND ABSENT HALL SENSORS**

The article discusses modern methods of controlling brushless DC motors (BLDC) using microcontroller systems, which have become widespread in industrial drives, electric vehicles, robotic systems, household appliances and other industries, where increased requirements are placed on energy efficiency, reliability and accuracy of control of electromechanical drives. The growing interest in BLDC motors is due to their high efficiency, durability, lack of a brush-collector assembly and the possibility of implementing flexible control algorithms using digital systems. Particular attention is paid to the comparative analysis of two main approaches to controlling BLDC motors - using rotor position sensors based on the Hall effect and sensorless control, which is based on indirect determination of the rotor position from the electrical parameters of the motor. The fundamental differences between these methods are considered, in particular, the methods of determining the angular position of the rotor, the features of starting the engine, the stability of operation in low-speed and dynamic load modes, as well as the requirements for the hardware and software of the control system. The article describes in detail the algorithms for determining the rotor position using Hall sensor signals and methods for analyzing the back electromotive force (EMF), including the detection of signal zero crossings, interference filtering and compensation for the

**influence of noise and changes in load parameters. Methods for forming control signals for implementing three-phase commutation of motor windings, in particular, the classic six-vector commutation and its software implementation on microcontrollers, are also considered. Considerable attention is paid to practical aspects of building BLDC motor control systems based on modern microcontrollers, including processing digital and analog signals, using timers and pulse-width modulation (PWM) modules to regulate speed and electromagnetic torque, as well as optimizing software algorithms to increase system stability and performance.**

**Keywords:** BLDC motor; electric drive; control system; energy efficiency; microcontroller.

Отримано: 07 травня 2025 року  
Прорецензовано: 29 травня 2025 року  
Прийнято до друку: 16 червня 2025 року