

Сучасні досягнення силової електроніки в сфері управління безщітковими двигунами постійного струму

А. І. Шестака¹, інженер електрик

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3229-0922>; e-mail: a.shestaka@gmail.com

Scopus Author ID: 33068375000

Л. В. Мельнікова², кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1732-1930>; e-mail: lubov.melnikova@op.edu.ua

¹Національний університет «Одеська морська академія»

²Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті проведено аналіз стрімкого росту популярності безщіткових двигунів постійного струму, які в останні роки впевнено займають вагомі позиції в таких галузях, як промислова автоматизація та робототехніка, електромобілі та електротранспорт, медичне обладнання, військова і аерокосмічна промисловість, дрони та інші безпілотні апарати, побутова техніка, комп'ютерна периферія. Показано, що безщіткові двигуни мають багато явних переваг над щітковими двигунами постійного струму та асинхронними двигунами: високий (до 96 %) коефіцієнт корисної дії, кращі електромеханічні характеристики, високі динамічні показники, тривалий термін служби при низьких вимогах до періодичного обслуговування, низький рівень акустичного шуму і низькі електромагнітні випромінювання, широкий діапазон робочих швидкостей. Підкреслюється, що ці двигуни характеризуються високою щільністю механічної потужності на одиницю об'єму і ваги, що робить їх майже безальтернативними у застосуваннях, де розмір і маса є критичними факторами.

В статті наведено технічний огляд методів керування безщітковими двигунами постійного струму, а також їх практичної реалізації в сучасних драйверах. Визначено, що розробка алгоритму керування залежить від типу двигуна (трапецієподібний або синусоїдальний), вимог керування точним положенням ротора положення (з датчиками положення ротора або без них) та задач керування швидкістю і крутним моментом (струмом). Збільшення обчислювальної потужності і тактової частоти сучасних процесорів зробило можливим впровадження в драйвери високоякісних алгоритмів, таких як орієнтоване за полем керування, що забезпечує більш ефективну роботу двигуна з високим коефіцієнтом корисної дії та кращою енергоефективністю навіть при малих навантаженнях, а також дозволяє досягати менших пульсацій крутного моменту при швидкій динамічній реакції на зміну навантаження. Важливим висновком є те, що за допомогою сучасних драйверів реалізуються набагато точніші алгоритми цифрового векторного керування, такі як орієнтоване за полем управління, коли алгоритм підтримує ефективність у широкому діапазоні швидкостей та враховує зміни крутного моменту з перехідними фазами шляхом обробки динамічної моделі двигуна в реальному часі. Серед вже працюючих технічних рішень є способи виключення датчиків фазного струму та використання естиматора для бездатчикового керування швидкістю і моментом. Встановлено, що керування безщітковими двигунами за допомогою сучасних драйверів дозволяє економічно ефективно проектувати інтелектуальні електроприводи шляхом зменшення кількості системних компонентів, скорочення робочого часу на розробку проекту та підвищення ефективності технічного рішення.

Ключові слова: енергоефективність, алгоритми, драйвери, двигун, бездатчикове управління, зворотна електрорушійна сила, орієнтоване за полем векторне управління.

Цитування статті: Шестака А.І., Мельнікова Л.В. (2026). Сучасні досягнення силової електроніки в сфері управління безщітковими двигунами постійного струму. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 46(122), с.39-49. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.4>

Вступ

Міжнародне енергетичне агентство IEA (International Energy Agency) наприкінці грудня 2025 року опублікувала аналітичний документ [1], в якому оцінюється важливість систем електродвигунів у світовій енергетичній системі. У 2023 році системи електродвигунів становили 53% світового споживання електроенергії. Їхня частка у споживанні електроенергії значно варіюється в різних секторах: 72% у промисловості, 36% у будівлях, 87% у сільському господарстві та 86% у транспортному секторі. Велика частка електродвигунів припадає на приватні домогосподарства. Компанія Qorvo (USA) [2] оцінює, що в типовому будинку може бути до 48 асинхронних двигунів, 14 щіткових двигунів постійного струму, 4 універсальних двигуни змінного струму та 26 безщіткових двигунів постійного струму. Загалом 61 двигун в приватному будинку живиться від мережі та 31 двигун живиться від батарей.

В іншому аналітичному документі "Electric Motor Market. 2026 - 2033" від компанії з дослідження ринку та консалтингу Grand View Research зазначається, що зазвичай 95% вартості життєвого циклу двигуна припадає на електроенергію для його живлення. Тобто, капітальні витрати, монтаж, підключення, налагодження, моніторинг і технічне обслуговування складають лише близько 5 % пов'язаних з експлуатацією двигуна коштів. Тому раціональний підхід до вибору оптимального типу двигуна з енергоощадним керуванням важко переоцінити. Перехід на більш ефективні двигуни та приводи може скоротити світовий попит електроенергії до 2030 року на 24-42 TWh [3].

Якщо ж враховувати довгострокову перспективу окупності капітальних витрат, експлуатаційних витрат та навантаження на навколишнє середовище, то є всі стимули для впровадження сучасних двигунів з інтелектуальним керуванням. Також існують регуляторні вимоги щодо вдосконалення енергоспоживання згідно до міжнародних стандартів ефективності. Наприклад, "Регламент щодо електродвигунів та приводів зі змінною швидкістю (ЄС) 2019/1781", що набув чинності 01.07. 2021 р., передбачає обов'язкове підвищення класу енергоефективності двигунів змінного струму від рівня IE1 до рівня IE4 [4].

1 Мета дослідження

Метою роботи є розгляд сучасного типу двигуна з енергоощадним керуванням, яким є на сьогодні безщітковий двигун постійного струму.

З'ясувати його переваги в зрівнянні з асинхронними та традиційними щітковими двигунами постійного струму, розглянути його можливості і технічні характеристики. Навести огляд методів керування такими двигунами, а також їх практичну реалізацію в сучасних драйверах для безщіткових двигунів.

2 Матеріали та результати дослідження

Домінуючим, з часткою близько 80% загалом і близько 68 % в промисловості, є асинхронний двигун. Асинхронні двигуни є найбільшими споживачами електроенергії в промислових секторах, на них припадає приблизно до 70% загального обсягу промислового споживання електроенергії. Ці двигуни приводять у дію критично важливе обладнання. Приблизно 90% з них є двигунами з короткозамкненим ротором. Управління швидкістю і моментом практично для всіх задач (крім плавного пуску) сьогодні здійснюється приводами змінної частоти VFD (Variable Frequency Drive), що робить керування двигуном і технологічним процесом суттєво універсальним і ефективним. Також впевнено розширюють свою присутність на ринку різні типи синхронних двигунів. Особливо це стосується синхронних двигунів з постійними магнітами PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) та перспективних синхронних реактивних двигунів SynRM (Synchronous Reluctance Motor), в яких ротор не має обмоток або постійних магнітів [5]. Однофазні двигуни змінного струму широко використовуються для побутових, комерційних та легких промислових задач завдяки своїй сумісності зі стандартними однофазними джерелами живлення. Вони зазвичай зустрічаються в побутовій техніці (вентилятори, пральні машини, холодильники), невеликих, до 1 kW, насосах, компресорах та портативних інструментах. Однофазні двигуни є досить універсальними, але не дуже ефективними. Вони вимагають спеціальних методів запуску за допомогою конденсаторів, перемикачів або реле і при цьому мають суттєві обмеження потужності. Регулювання швидкості (в досить обмеженому діапазоні) здійснюється симісторними регуляторами напруги.

Щіткові двигуни постійного струму традиційно відіграють важливу роль в різноманітних промислових застосуваннях, де точне керування швидкістю при широкому діапазоні змін навантаження, а також швидкодія механізму мають пріоритетне значення. Мотальні машини, преси, шліфувальні машини, екструдери, прокатні стани є прикладами виробничого обладнання, яке вимагає унікальних характеристик двигунів пос

тійного струму: висока чутливість до змін навантаження, швидкі можливості запуску та зупинки, а також точно налаштоване керування швидкістю [6].

Поряд з першими двома категоріями безщіткові двигуни постійного струму BLDCM (Brushless DC Motors) демонструють динамічне кількісне розширення застосувань та суттєве зростання ринкової долі в грошовому вимірі. Розмір світового ринку безщіткових двигунів постійного струму у 2025 році оцінювався в 24,01 мільярда доларів США, і очікується, що до кінця 2026 року він досягне 24,95 мільярда доларів США. Крім того, прогнозується, що до 2034 року ринок досягне 47,85 млрд доларів США, демонструючи середньорічний темп зростання (CAGR) 7,95% протягом прогнозованого періоду 2026-2034 років [7]. Азіатсько-Тихоокеанський регіон домінує на світовому ринку безщіткових двигунів постійного струму з часткою 52,97% у 2025 році. Більше того, Азіатсько-Тихоокеанський регіон займає найбільшу частку ринку за обсягом доходів, що зумовлено масовою індустріалізацією, швидким впровадженням електромобілів (особливо в Китаї та Індії) та зростанням попиту на енергоефективну побутову електроніку.

Безщіткові двигуни випускаються в широкому діапазоні потужностей від 10 W до 10 kW і напруг живлення від 12 V до 400 V, і мають вражаючий ККД від 85 % до 96 %, перебиваючи цей показник для асинхронних двигунів і щіткових двигунів постійного струму.

Основними сегментами застосування двигунів BLDC сьогодні є [8-10]:

- промислова автоматизація та робототехніка, зокрема: високоточні приводи роботів і роботизованих маніпуляторів, верстати з програмним керуванням, серводвигуни, автоматизовані конвеєрні системи;

- транспорт та електромобілі EV (Electric Vehicle): використовуються для приведення в дію, скутерів, легких електромобілів та електровелосипедів завдяки високій ефективності та щільності потужності;

- системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря: використовуються в кондиціонерах, повітрорудках, актуаторах для забезпечення керованості, високої надійності і ефективності, а також безшумної роботи протягом великих проміжків часу;

- дрони та безпілотні літальні апарати: незамінні для руху дронів, забезпечують високошвидкісний контроль тяги, чутливість та надійність для стабільного польоту;

- оборонна промисловість і сучасні системи озброєння;

- медичне обладнання: хірургічна робототехніка, апарати штучної вентиляції легень, насоси, тощо;

- побутова електроніка та побутова техніка: вентилятори, пилососи, компресори холодильників, пральні машини задля забезпечення високої ефективності та економії енергії;

- комп'ютерна периферія: використовується в жорстких дисках, вентиляторах охолодження та принтерах для забезпечення стабільного контролю швидкості.

Зважаючи на викладене, можна впевнено казати, що в прагненні до кращої ефективності, продуктивності та тривалого терміну служби, безщітковий двигун постійного струму BLDC зараз вийшов на перший план. Схеми управління котушками статора (драйвери) BLDCM можуть використовувати в якості джерела живлення або акумулятор від 11,1 V (дрони), або батареї (24 - 48) V (автономне чи портативне обладнання та інструменти), або випрямлячі (до 400 V і більше) з корекцією коефіцієнта потужності, як це робиться для важкого обладнання та електромобілів. Оскільки до електродвигунів сьогодні висувуються жорсткі вимоги щодо енергоефективності та керованості, потенційний ринок для BLDCM є величезним. Тому схеми драйверів для BLDCM стають все більш досконалими, інтегрованими та економічно ефективними.

Безщіткові двигуни постійного струму можна класифікувати за кількома критеріями (табл. 1), що відображають відмінності в структурній конструкції, конфігурації обмоток, інтеграції датчиків та експлуатаційній спрямованості. Розуміння цих класифікацій є також важливим для розробки або для вибору оптимального драйвера BLDCM.

Враховуючи ці критерії класифікації, інженери можуть робити обґрунтований вибір, який збалансує крутний момент, швидкість, ефективність, точність керування та вимоги інженерної задачі.

Розглянемо детальніше двигун BLDC, зокрема, електроніку, необхідну для генерації багатофазного змінного струму для обмоток статора, та те, як реалізується керування для оптимальної продуктивності двигуна.

Загалом, всі електродвигуни, що не потребують електричного з'єднання, виконуваного за допомогою щіток, між нерухомими та обертовими частинами, можна розглядати [11] як безщіткові машини з постійними магнітами РМ (Permanent Magnet), які можна класифікувати

Таблиця 1 - Класифікація безщіткових двигунів постійного струму

Основа класифікації	Тип	Основні характеристики	Типові застосування
Конфігурація ротора	Внутрішній ротор (Inrunner)	Ротор всередині статора; можливість роботи на вищій швидкості; компактна конструкція	Високошвидкісні інструменти, вентилятори, насоси
	Зовнішній ротор (Outrunner)	Ротор оточує статор; більший крутний момент на нижчих швидкостях; більший діаметр	Роботизовані суглоби, портативні пристрої, системи прямого приводу
Топологія обмотки	З'єднання "зірка" (Y)	Збалансований фазний струм; більш плавна робота; нижчий пусковий струм	Промислові двигуни загального призначення
	З'єднання "дельта" (Δ)	Більший струм на фазу обмотки; збільшений вихідний крутний момент	Високопродуктивні та високонавантажені двигуни
Інтеграція датчиків	Сенсорний BLDCM (Sensored BLDC Motor)	Двигун з датчиками Холла або енкодером; точне керування із замкнутим контуром	Робототехніка, системи з програмним керуванням, обладнання для позиціонування
	Безсенсорний BLDCM (Sensorless BLDC Motor)	Використовується детектування зворотної електрорушійної сили; простіша структура; нижча вартість	Вентилятори, насоси, побутова техніка
Особливості застосування	Високошвидкісний двигун	Оптимізований для швидкого обертання; низька інерція	Шпинделі, компресори
	Двигун з високим крутним моментом	Високий крутний момент на низьких і середніх швидкостях	Роботизовані маніпулятори, системи автоматизації
	Двигун точного позиціонування	Зворотний зв'язок високої роздільної здатності для точного керування рухом	Медичні прилади, роботи, станки

на основі технологічного виконання і способу кріплення магнітів та форми зворотної електрорушійної сили (ЕРС).

Зокрема, РМ можуть бути:

- закріплені на поверхні ротора (Surface-Mounted);
- вбудовані (Embedded), точніше, створені всередині ротора [12];
- вставлені радіально (Inserted) в ротор.

Форма зворотної ЕРС може бути синусоїдальною або трапецієподібною: синхронні двигуни змінного струму з постійними магнітами PMSM мають синусоїдальну зворотну ЕРС, а безщіткові двигуни постійного струму BLDC мають трапецієподібну зворотну ЕРС. Ця форма визначається технологічними особливостями реалізації магнітів ротора, феромагнітними властивостями статора, технічними і конструктивними параметрами обмоток та величиною повітряного зазору між ротором і статором. Існує два принципово відмінних способи живлення обмоток статора: з подачею ступінчатої напруги фіксованої амплі-

туди для BLDCM або ж з подачею синусоїдальної напруги змінної амплітуди і частоти для PMSM. Фактично, це залежить від типу двигуна (PMSM чи BLDCM) і форми зворотної ЕРС, що виникає в обмотці статора при обертальному русі магнітів ротора. PMSM живляться трифазним синусоїдальним струмом від повноцінного приводу змінної частоти VFD, а двигуни BLDC – набором струмів, що мають квазіквадратичну форму хвилі [13, 14].

Очевидно, при виборі типу драйвера, який буде найкраще підходити для вирішення конкретної технічної задачі із використанням певного типу BLDCM, необхідно визначити саме тип архітектури цього драйвера. Архітектури варіюються від драйверів з інтегрованими польовими транзисторами MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) для двигунів низької та середньої потужності з зовнішніми чи внутрішніми мікроконтролерами MCU (Microcontroller Unit) до драйверів затворів (Gate Driver) зовнішніх MOSFET, що дозволяють ство-

рювати системи керування двигунами потужністю кілька кВт. Провідні виробники силової електроніки пропонують драйвери як для сенсорного, так і для безсенсорного синусоїдального та трапецієподібного керування. На рис. 1 показано узагальнені структурні схеми для різних архітектур драйверів [15]:

- драйвери затворів для зовнішніх MOSFET (на синьому фоні);
- з інтегрованими польовими транзисторами (на синьому та фіолетовому фонах);
- для сенсорного та безсенсорного керування (на зеленому і синьому або на зеленому, синьому і фіолетовому фонах).

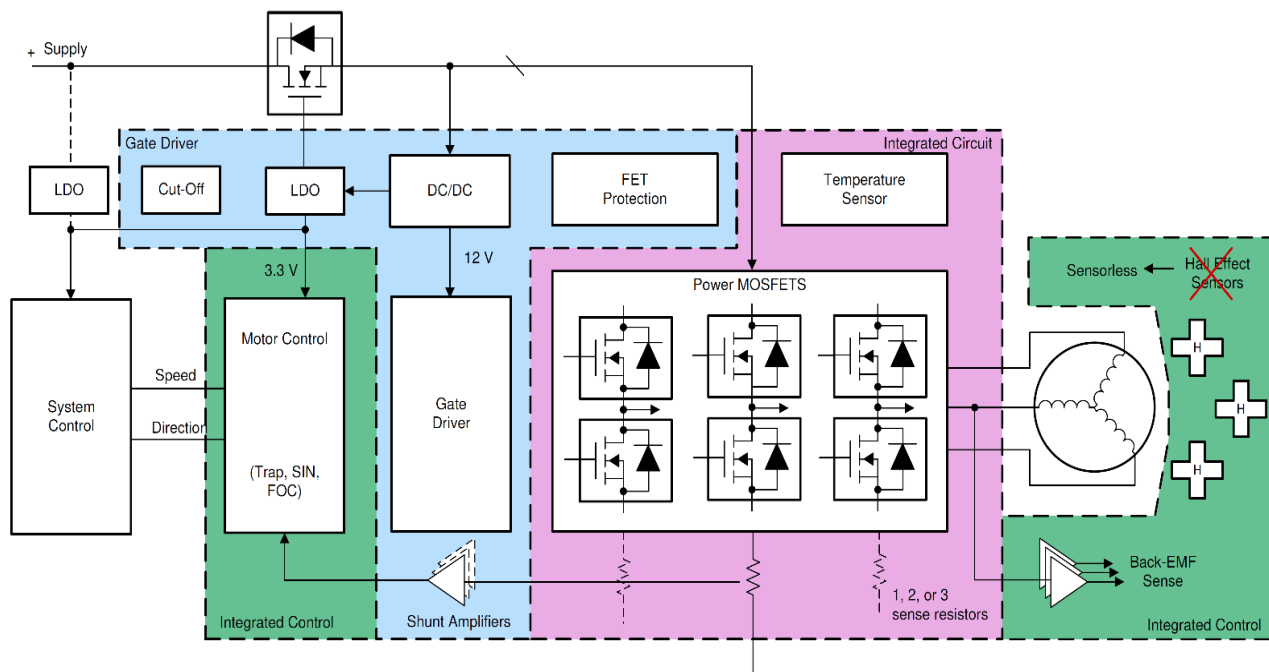


Рис. 1 – Архітектури драйверів BLDCM виробництва Texas Instruments (джерело: [15])

Визначення рівня напруги живлення (Supply, рис. 1), пікового та безперервного вихідного струму двигуна є одним із перших кроків у виборі типу архітектури драйвера. Напруги живлення поділяються на дві категорії: з живленням від батареї та з живленням від мережі. Як у системах з живленням від батареї, так і від мережі, напруга живлення може змінюватися, тому драйвер двигуна повинен підтримувати принаймні максимальну напругу акумулятора з додатковим запасом на випадок зворотного зв'язку по напрузі або перехідних процесів у системі. Рекомендується використовувати драйвер двигуна з номіналом до 1,2 максимальної напруги для добре регульованих джерел живлення та двигунів низької потужності, а для двигунів високої потужності та акумуляторних систем драйвер повинен мати запас від 1,5- до 2-кратної напруги живлення. Загалом, інтегровані та зовнішні архітектури польових транзисторів мають різні вимоги до живлення: системи високої потужності (більше 70 W) використовують драйвери затворів, а системи низької та середньої потужності використовують інтегровані драйвери польових транзисторів. Зовнішні польові транзистори здатні видава-

ти вищу потужність, ніж інтегровані польові транзистори, оскільки вони не обмежені розміром однокристалного інтегрованого драйвера польових транзисторів.

Конструкція двигуна є основним фактором вибору методу керування, що його буде забезпечувати драйвер: трапецієподібний, синусоїдальний чи орієнтоване за полем управління FOC (Field-Oriented Control). Для максимізації крутного моменту та ефективності струм, що керує двигуном, повинен відповідати формі хвилі зворотної ЕРС (трапеція чи синусоїда). Тип застосування, а саме: високий крутний момент, стабілізація швидкості чи управління положенням – також має бути врахованим при виборі оптимального методу керування.

Трапецієподібна (6-ступінчаста або 120-градусна) комутація – це найпростіший і найпоширеніший метод управління трифазним BLDCM. Досягається шляхом подачі живлення на обмотки за 6-ступінчастою з кроком в 60 електричних градусів, так що струм протікає лише через дві обмотки, тоді як третя фаза залишається знеструмленою і невідключеною до шин живлення, як це показано на рис. 2 [16].

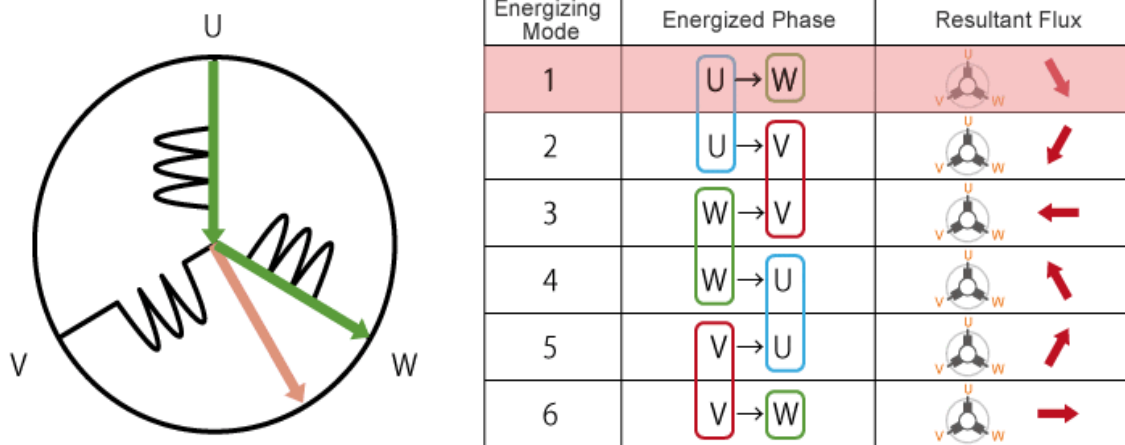


Рис. 2 – Трапецієподібна комутація: для стану 1 струм діє в обмотках фаз U і V (джерело: [16])

Такий алгоритм створює трапецієподібну форму хвилі струму для кожної фази (рис. 3).

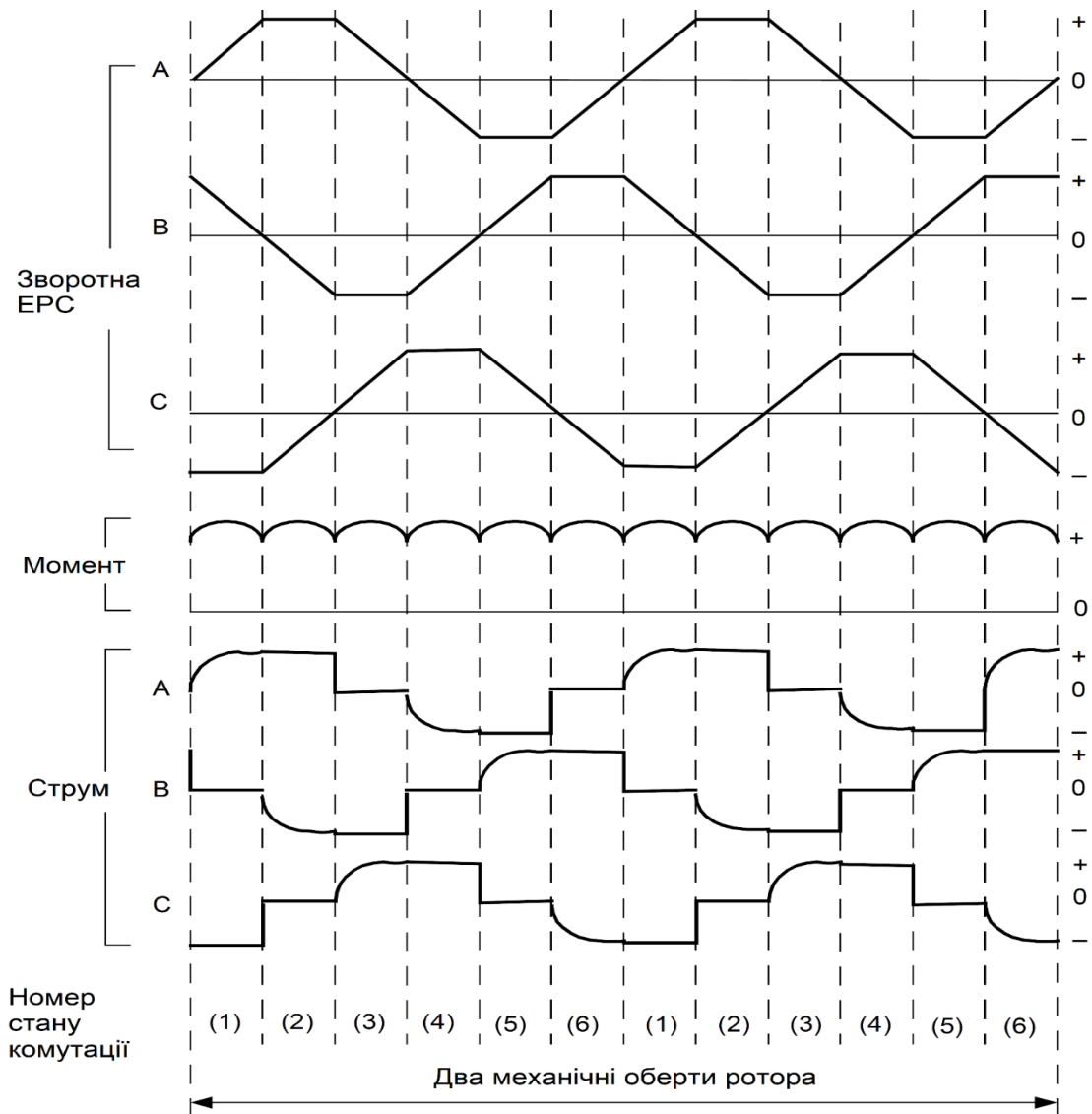


Рис. 3 – Форми зворотної ЕРС, моменту і фазних струмів в трифазному двополюсному BLDCM

Метод може бути реалізований з датчиками Холла для визначення положення ротора та коректного моменту переключення обмоток, або ж без таких. Загалом, це недороге і досить просте в реалізації рішення, яке може забезпечити високі значення крутного моменту та швидкості при мінімальних втратах на перемиканнях MOSFET. Однак воно має низьку роздільну здатність і супроводжується пульсаціями крутного моменту.

Як буде показано далі, датчики положення можна повністю виключити для значного сегменту задач, коли потрібне лише керування швидкістю без позиціонування, а динаміка системи не є особливо вимогливою (тобто, повільно або, принаймні, передбачуване змінне навантаження). Сучасні безсенсорні методи керування з вимірюванням зворотної ЕРС в знеструмленій обмотці надають вичерпну інформацію для оцінки положення ротора з достатньою точністю і, отже, для синхронізації часових моментів комутації обмоток. Вимірювання струму у двох підключених до живлення обмотках дозволяє здійснити повноцінне керування моментом двигуна в перехідних режимах, організувати інваріантне по навантаженню управління швидкістю та забезпечити низку захисних функцій за струмовим переваженням і перегрівом як MOSFET, так і двигуна.

Синусоїдальний метод керування BLDCM передбачає живлення одночасно трьох фазних обмоток статора "класичними" трифазними синусоїдальними струмами. Цей метод, фактично, повторює алгоритми VFD для PMSM. Пульсації крутного моменту і акустичні шуми двигуна є значно нижчими при високому ККД. Однак при синусоїдальній комутації мають місце більш високі втрати на перемикання високі MOSFET, оскільки комутація відбувається одночасно в усіх обмотках. У сенсорних системах сигнали комутації широтно-імпульсного модулятора (ШИМ) генеруються для кожної фази на основі положення ротора у вигляді форм необхідних синусоїдальних напруг, що забезпечують створення плавних синусоїдальних струмів статора.

В безсенсорних же системах керування транзисторами реалізовано через закладену в пам'ять MCU таблицю комутації. На основі результату оцінки вимірної зворотної ЕРС (Back EMF, VEMF) з цієї таблиці отримуються відповідні комбінації сигналів комутації для MOSFET інвертора. В результаті, подібно (але більш грубо) до кінцевого результату, що забезпечується в сенсорних системах, створюються синусоїдальні струми в обмотках BLDCM. Метод орієнтовано за полем керування FOC забезпечує точне та ефективне управління швидкістю та крутним

моментом двигуна на основі вимірів кількох доступних параметрів та розрахунків всіх інших необхідних величин в постійно працюючій в реальному часі моделі BLDCM. Методи FOC орієнтують поле статора перпендикулярно до магнітного потоку ротора для досягнення максимального крутного моменту. Реалізація FOC вимагає складного програмного забезпечення та суттєвої потужності MCU для обробки громіздких математичних обчислень, таких як перетворення Кларка-Парка, обернене перетворення Кларка та обернене перетворення Парка. Якщо положення та швидкість оцінюються безсенсорно за фазними струмами та напругами статора, MCU повинен бути достатньо швидким, аби оцінити кутове положення та швидкість ротора під час його обертання. Це може вимагати використання цифрових сигнальних процесорів DSP (Digital Signal Processor) реального часу для конвеєрної обробки цих математичних обчислень або реалізації великих таблиць пошуку, поки решта перетворень обчислюються одночасно. Високоточні енкодери потрібні для застосувань FOC, які потребують високої точності при управлінні положенням, таких як виконавчі механізми та роботизовані маніпулятори. Виходячи з роздільної здатності енкодерів, положення можна точно контролювати з мінімальною пульсацією крутного моменту.

Щоб спростити процес проектування вільно-програмований програмний модуль FOC інтегрують безпосередньо в MCU драйвера [17]. Такі високоінтегровані драйвери двигунів BLDC усувають необхідність розробки, налаштування та підтримки програмного забезпечення для керування двигуном, що заощаджує буквально місяці робочого часу на проектування. Крім того, такі модулі інтелектуально "витягують" часто недоступні в специфікаціях параметри двигуна (індуктивність, опір, повітряний зазор і т.і.), що дозволяє розробникам швидко налаштувати привод, забезпечуючи стабільну продуктивність системи незалежно від варіацій параметрів BLDCM при виробництві. Оскільки ці драйвери двигунів інтегрують безсенсорну технологію для визначення положення ротора, вони усувають потребу в зовнішніх датчиках, що знижує вартість системи та підвищує її надійність.

Висновки

Безщіткові двигуни постійного струму продовжують набувати стрімкої популярності завдяки своїй високій ефективності, високій робочій швидкості, високій щільності потужності на одиницю об'єму, компактним розмірам, низьким

вимогам до обслуговування та низьким електромагнітним випромінюванням. З цих причин двигуни BLDC все частіше замінюють двигуни інших типів в різних сферах застосування, таких як побутова техніка, електромобілі, медичне обладнання, опалення, вентиляція та кондиціонування повітря, керування рухом, робототехніка, тощо. Провідними виробниками силової електроніки розроблено декілька алгоритмів для керування BLDCM: залежно від типу двигуна BLDC (трапецієподібний або синусоїдальний), відповідно до вимог керування точним положенням ротора положення (з датчиком або без датчика) та до задач керування швидкістю та крутним моментом (струмом). Зі збільшенням обчислювальної потужності і тактової частоти сучасних контролерів промисловість розширює межі впровадження високоякісних алгоритмів керування, таких як орієнтоване за полем керування. Реалізація методів FOC дозволяє двигуну BLDC працювати ефективніше (високий коефіцієнт потужності та краща ефективність при малому навантаженні), більш плавно (менші пульсації крутного моменту) зі швидкою динамічною реакцією (краща динамічна продуктивність при зміні навантаження та швидкості). Керування FOC робить магнітне поле статора та ротора ортогональним одне до одного для досягнення максимального електромагнітного крутного моменту. Загалом, BLDCM драйвери з алгоритмами FOC – це "флагманська" продукція провідних виробників, що вже сьогодні знаходить активне використання в транспорті, промисловості, робототехніці, медицині, військовій промисловості.

Список використаної літератури

1. Система електродвигунів – ключовий елемент на шляху до глобального нульового викиду. Інформаційний бюлетень. Платформа EMSA. 19 грудня 2025 року. [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2025/12/4E-Policy-Brief-EMSA-9-20251218.pdf>. [Доступ отримано 05 травня 2026]
2. *Overcoming Design Challenges: Brushless DC Motors and Drives. Design Challenges and Considerations for Brushless DC Motors and Their Drives.* September 23, 2024 [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/overcoming-design-challenges-brushless-dc-motors-and-drives> [Доступ отримано 05 травня 2026].
3. *Electric Motor Market (2026 - 2033): Size, Share & Trends Report - © Grand View Research – 2026.* [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-motor-market> [Доступ отримано 20 травня 2026].
4. *Електродвигуни та приводи зі змінною швидкістю. Звіт про огляд обліку впливу еко дизайну за 2024 рік.* Регламент Комісії (ЄС) 2019/1781. Офіційний веб-сайт Європейського Союзу. [онлайн] Доступно за адресою: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/electric-motors_en [Доступ отримано 05 травня 2026]
5. *Синхронні реактивні двигуни ABB (SYNRM). Двигуни та генератори ABB.* [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.abb.com/global/en/areas/motion/motors-generators/low-voltage-motors/iec-low-voltage-motors/synchronous-reluctance-motors> [Доступ отримано 05 травня 2026].

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту під час створення цієї роботи.

Внесок авторів

Шестака А.І.: розробка методології, обробка даних, дослідження, інтерпретація результатів, написання початкової версії тексту;
Мельнікова Л.В.: наукове керівництво, постановка задачі, концептуалізація, формулювання висновків, редагування тексту статті.

6. *Двигуни постійного струму: незмінна актуальність у сучасних промислових застосуваннях.* Стаття. 2026-03-24. Форт-Сміт, Арканзас, США. [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.abb.com/global/en/news/134486> [Доступ отримано 05 травня 2026].
7. *Ринок безщіткових двигунів постійного струму. Ключові аналізи ринку. Енергія та потужність.* FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/brushless-dc-motor-market-101687> [Доступ отримано 05 травня 2026]
8. *Що таке безщіткові двигуни постійного струму.* Інженерна школа. Технічна підтримка. Корпорація Renesas Electronics. [онлайн] Доступно за адресою: https://www.renesas.com/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview?srsId=AfmBOo039pXDeCoXYsocam0gErgmcSSOtPBUh1luLSmGMVfVbs_hNqvp. [Доступ отримано 05 травня 2026]
9. *Безщіткові двигуни постійного струму: повний огляд.* CubeMars /31 травня 2024 р. [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.cubemars.com/brushless-dc-motors-comprehensive-overview.html>. [Доступ отримано 05 травня 2026].
10. *Які типові застосування безщіткового двигуна постійного струму?* Чжан Даніель. STEPPERONLINE. With You Every Step to Automation. [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.omc-stepperonline.com/support/what-are-the-typical-applications-of-brushless-dc-motor> [Доступ отримано 05 травня 2026]
11. Bonfe, M.; Berge, M. *A Brushless Motor Drive with Sensorless Control for Commercial Vehicle Hydraulic Pumps.* In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2008), Cambridge, England, July 2008; pp. 612-617.
12. Bianchi, N.; Bolognani, S.; Jang, J.H.; Sul, S.K. *Comparison of PM Motor Structures and Sensorless Control Techniques for Zero-Speed Rotor Position Detection.* IEEE Trans. Power Electron. 2007, 22, 2466-2475.
13. Su, G.J.; McKeever, J.W. *Low-Cost. Sensorless Control of Brushless DC Motors with Improved Speed Range.* IEEE Trans. Power Electron. 2004, 19, 296-302.
14. Damodharan, P.; Vasudevan, K. *Indirect Back-EMF Zero Crossing Detection for Sensorless BLDC Motor Operation.* In Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drives Systems (PEDS 2005), Kuala Lumpur, Malaysia, November 2008; pp. 1107-1111.
15. *Brushless-DC Motor Driver Considerations and Selection Guide - SLVAES1A – JUNE 2020 – REVISED MAY 2022 - Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated*
16. *Керування двигунами BLDC.* Інженерна школа. Технічна підтримка. Корпорація Renesas Electronics. [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.renesas.com/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-02-inverter-pmw> [Доступ отримано 05 травня 2026]
17. *MCF8316A Sensorless Field Oriented Control (FOC) Integrated FET BLDC Driver - SLLSFI0C – AUGUST 2021 – REVISED JUNE 2023 - Last updated 10/2025 - Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated.* [онлайн] Доступно за адресою: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/mcf8316a.pdf> [Доступ отримано 05 травня 2026].

References

1. *Electric Motor System – A Key Element on the Path to Global Zero Emissions. Newsletter.* EMSA Platform. December 19, 2025. [online] Available at: <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2025/12/4E-Policy-Brief-EMSA-9-20251218.pdf> [Accessed 05 May 2026]
2. *Overcoming Design Challenges: Brushless DC Motors and Drives.* Design Challenges and Considerations for Brushless DC Motors and Their Drives. September 23, 2024. [online] Available at: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/overcoming-design-challenges-brushless-dc-motors-and-drives> [Accessed 05 May 2026]
3. *Electric Motor Market (2026 - 2033): Size, Share & Trends Report - © Grand View Research – 2026.* [online] Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-motor-market> [Accessed 05 May 2026]
4. *Electric motors and variable speed drives. Ecodesign impact assessment review report 2024.* Commission Regulation (EU) 2019/1781. Official website of the European Union. [online] Available at: https://energy-efficient-products.ec.europa.eu/product-list/electric-motors_en [Accessed 05 May 2026]

5. *ABB Synchronous Reluctance Motors (SYNRM). ABB Motors and Generators.* [online] Available at: <https://www.abb.com/global/en/areas/motion/motors-generators/low-voltage-motors/iec-low-voltage-motors/synchronous-reluctance-motors> [Accessed 05 May 2026]
6. *DC Motors: Still Relevant in Modern Industrial Applications.* Article. 2026-03-24. Fort Smith, Arkansas, USA. [online] Available at: <https://www.abb.com/global/en/news/134486> [Accessed 20 May 2026]
7. *Brushless DC Motor Market. Key Market Analyses. Energy and Power.* FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. [online] Available at: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/brushless-dc-motor-market-101687> [Accessed 05 May 2026].
8. *What are brushless DC motors?* Engineering School. Technical Support. Renesas Electronics Corporation. [online] Available at: https://www.renesas.com/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-01-overview?srsId=AfmBOoo39pXDeCoXYsocam0gEpgmcSSOtPBUh1luLSmGMVfVbs_hNqvp [Accessed 05 May 2026]
9. *What are brushless DC motors?* Engineering School. Technical Support. Renesas Electronics Corporation. [online] Available at: <https://www.cubemars.com/brushless-dc-motors-comprehensive-overview.html> [Accessed 05 May 2026].
10. *What are the typical applications of brushless DC motor?* Zhang Daniel. STEPPER-ONLINE. With You Every Step to Automation. [online] Available at: <https://www.omc-stepperonline.com/support/what-are-the-typical-applications-of-brushless-dc-motor> [Accessed 20 May 2026].
11. Bonfe, M.; Bergo, M. *A Brushless Motor Drive with Sensorless Control for Commercial Vehicle Hydraulic Pumps.* In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2008), Cambridge, England, July 2008; pp. 612-617.
12. Bianchi, N.; Bolognani, S.; Jang, J.H.; Sul, S.K. *Comparison of PM Motor Structures and Sensorless Control Techniques for Zero-Speed Rotor Position Detection.* IEEE Trans. Power Electron. 2007, 22, 2466-2475.
13. Su, G.J.; McKeever, J.W. *Low-Cost Sensorless Control of Brushless DC Motors with Improved Speed Range.* IEEE Trans. Power Electron. 2004, 19, 296-302.
14. Damodharan, P.; Vasudevan, K. *Indirect Back-EMF Zero Crossing Detection for Sensorless BLDC Motor Operation.* In Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drives Systems (PEDS 2005), Kuala Lumpur, Malaysia, November 2008; pp. 1107-1111.
15. *Brushless-DC Motor Driver Considerations and Selection Guide - SLVAES1A - JUNE 2020 - REVISED MAY 2022 - Copyright © 2022 Texas Instruments Incorporated*
16. *BLDC Motor Control.* Engineering School. Technical Support. Renesas Electronics Corporation. [online] Available at: <https://www.renesas.com/en/support/engineer-school/brushless-dc-motor-02-inverter-pmw> [Accessed 05 May 2026].
17. *MCF8316A Sensorless Field Oriented Control (FOC) Integrated FET BLDC Driver - SLLSFI0C - AUGUST 2021 - REVISED JUNE 2023 - Last updated 10/2025 - Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated.* [online] Available at: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/mcf8316a.pdf>. [Accessed 05 May 2026]

Отримано (Received) 22.04.2026

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 30.04.2026

Прийнято (Accepted) 05.05.2026

Опубліковано (Published) 31.05.2026

Modern Power Electronics Achievements in the Field of Controlling Brushless DC Motors

Anatolii Shestaka¹, *electrical engineer*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3229-0922>; e-mail: a.shestaka@gmail.com

Scopus Author ID: 33068375000

Liubov Melnikova², *PhD, Associate Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1732-1930>; e-mail: liubov.melnikova@op.edu.ua

¹ National University "Odesa Maritime Academy"

² Odesa Polytechnic National University

Abstract. *The article analyzes the rapid growth in popularity of brushless DC motors, which in recent years have confidently occupied important positions in such industries as industrial automation and robotics, electric vehicles and electric transport, medical equipment, military and aerospace industries, drones and other unmanned aerial vehicles, household appliances, computer peripherals. It is shown that brushless motors have many clear advantages over brushed DC motors and asynchronous motors: high (up to 96%) efficiency, better electromechanical characteristics, high dynamic performance, long service life with low requirements for periodic maintenance, low acoustic noise and low electromagnetic radiation, a wide range of operating speeds. It is emphasized that these motors are characterized by high mechanical power density per unit of volume and weight, which makes them almost without alternative in applications where size and weight are critical factors.*

The article provides a technical overview of brushless DC motor control methods, as well as their practical implementation in modern drivers. It is determined that the development of a control algorithm depends on the type of motor (trapezoidal or sinusoidal), the requirements for controlling the precise rotor position (with or without rotor position sensors), and the speed and torque (current) control tasks. The increase in computing power and clock frequency of modern processors has made it possible to implement high-quality algorithms, such as field-oriented control, in drivers, which provides more efficient motor operation with high efficiency and better energy efficiency even at low loads, and also allows you to achieve smaller torque ripples with a fast dynamic response to load changes. An important conclusion is that with the help of modern drivers, much more accurate digital vector control algorithms are implemented, such as field-oriented control, when the algorithm maintains efficiency over a wide speed range and takes into account torque changes with transient phases by processing the dynamic model of the motor in real time. Among the already working technical solutions are methods for disabling phase current sensors and using an estimator for sensorless speed and torque control. It has been established that controlling brushless motors with the help of modern drivers allows for cost-effective design of intelligent electric drives by reducing the number of system components, reducing the working time for project development and increasing the efficiency of the technical solution.

Keywords: *energy efficiency, algorithms, drivers, motor, sensor less control, feedback electromotive force, field-oriented vector control.*

Article citation: Shestaka A., Melnikova L. (2026). Modern power electronics achievements in the field of controlling brushless DC motors. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2026, 46(122), pp.39-49. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.4>

Про авторів (About the authors)



Шестака Анатолій Іванович, старший викладач кафедри електричної інженерії та електроніки, Національний університет «Одеська морська академія»; вул. Дідріхсона, 8, Одеса, 65029, Україна.

E-mail: a.shestaka@gmail.com, тел.: +380 50 336 8216

Anatolii Shestaka, Senior lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electronics, National University "Odesa Maritime Academy"; Didrikhsona str., 8, Odesa, 65029, Ukraine

E-mail: a.shestaka@gmail.com, тел.: +380 50 336 8216

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3229-0922>



Мельнікова Любов Василівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: lubov.melnikova@op.edu.ua, тел. +380 99 677 6374

Liubov Melnikova, Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: lubov.melnikova@op.edu.ua, tel. +380 99 677 6374

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1732-1930>