

Ю. Л. Бондаренко, І. А. Іщенко

АНАЛІЗ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ РОЗВІДУВАЛЬНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ І КЛАСУ

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення енергоефективності систем електроживлення безпілотних літальних апаратів, зокрема досліджено взаємодію джерел живлення, електронних регуляторів швидкості та безколекторних електродвигунів. Проаналізовано структуру типової енергетичної системи безпілотних літальних апаратів, включно з акумуляторами, модулями розподілу живлення, політним контролером та силовими перетворювачами. Особливу увагу приділено характеристикам безколекторних електродвигунів, їхнім показникам ефективності, а також впливу алгоритмів керування на динаміку, точність та втрати в електроприводі.

Окремо розглянуто різні типи форм вихідних сигналів електронних регуляторів швидкості: трапецієподібне керування, синусоїдальне широтно-імпульсне й векторне керування з урахуванням орієнтації поля, а також просторово-векторну широтно-імпульсну модуляцію простору. Зроблено порівняльний аналіз цих методів за параметрами плавності ходу, рівня шумів, складності реалізації та загальної енергоефективності. Показано, що перехід від простих імпульсних методів до методів з урахуванням орієнтації поля забезпечує суттєве зменшення втрат, стабілізацію моменту та підвищення точності керування, що є критично важливим для безпілотних літальних апаратів з тривалим часом польоту.

У роботі показано важливість багатofакторного моделювання, яке враховує взаємний вплив напруги акумуляторної батареї, форми сигналу, температурних режимів, механічного навантаження та параметрів двигуна. Встановлено необхідність подальших досліджень у напрямку оптимізації алгоритмів електронних регуляторів швидкості та аналізу їхнього впливу на ресурс акумулятора й загальну енергоефективність системи електроживлення безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат І класу; безколекторний електродвигун; система живлення; адаптивне керування; енергоефективність; електронний регулятор швидкості; форма сигналу.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У сучасних умовах ведення бойових дій та виконання завдань повітряної розвідки безпілотні літальні апарати (БпЛА) І класу набули широкого застосування завдяки своїй ефективності, мобільності, відносній дешевизні та здатності тривалого автономного функціонування. Ключовими параметрами, що визначають ефективність застосування розвідувальних БпЛА І класу, є час перебування в повітрі та дальність польоту, які безпосередньо залежать від енергоефективності бортової системи електроживлення. Найбільш широкого використання в БпЛА І класу набули безколекторні двигуни постійного струму (Brushless

DC – BLDC-двигуни), тому що вони характеризуються високою питомою потужністю, надійністю та відсутністю механічних контактів.

Система електроживлення БпЛА – це сукупність компонентів, які забезпечують електричною енергією всі бортові системи апарата, зокрема рушійну установку (електродвигуни), бортову електроніку (польотний контролер, сенсори, GPS, зв'язок тощо), а також навігаційні та обчислювальні блоки.

Основні компоненти системи живлення БпЛА:

1) джерело живлення – це, як правило, літій-полімерні або літій-іонні акумуляторні батареї (АКБ);

2) електронний регулятор швидкості (ESC – Electronic Speed Controller), який перетворює постійну напругу з АКБ в імпульсний сигнал керування струмами в обмотках BLDC-електродвигуна;

3) BLDC-двигуни;

4) польотний контролер, який координує роботу ESC, сенсорів, стабілізації положення, GPS тощо;

5) система розподілу живлення (PDB або Power Management Unit) розподіляє живлення від акумулятора на всі підсистеми (ESC, контролер, передавач, камери);

6) радіоканал забезпечує зв'язок наземної та бортової апаратури.

Електроенергія на борту БпЛА витрачається для забезпечення різних споживачів: приймально-передавального модуля, навігаційних систем, живлення корисного навантаження, системи управління рухом БпЛА тощо. Проте основним споживачем електричної енергії на борту БпЛА є електродвигун, живлення якого здійснюється через ESC-контролери, які споживають 60–80% усієї електроенергії БпЛА [1–3]. Структурну схему розподілу потужності в типовому БпЛА наведено на рис. 1.

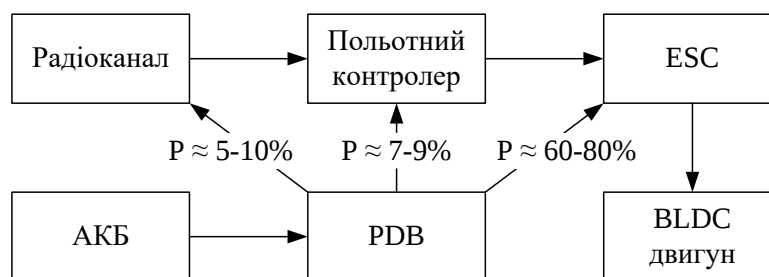


Рис. 1. Структурна схема розподілу потужності в типовому БпЛА

Отже, оптимізація роботи ESC-контролера дозволить отримати найбільший приріст у тривалості виконання бойового завдання, одним із її шляхів є вибір його типу.

На сьогодні відомо кілька типів ESC-контролерів, що відрізняються між собою архітектурою побудови, вартістю, складністю, а головне – формою струмів живлення обмоток BLDC-двигуна. Від останньої залежить ефективність роботи електродвигуна, оскільки саме форма струму визначає величину магнітного поля, яке взаємодіє з обмоткою якоря, створюючи силу, що призводить до обертання.

Отже, є актуальна потреба в аналізі відомих типів ESC-контролерів для визначення найкращого з них з огляду на енергоефективність бортової системи електроживлення

розвідувальних БпЛА І класу, що критично важливо для виконання розвідувальних завдань. Розв'язання цієї проблеми дозволить суттєво підвищити енергоефективність БпЛА без значного ускладнення конструкції або зростання вартості апарата.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових роботах розглядається вплив форми вихідного сигналу ESC-контролера, спрямований на підвищення енергоефективності, надійності та оптимізації теплових режимів електродвигуна.

Відповідно до досліджень [4], традиційні ESC-контролери, що використовують широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) – Pulse Width Modulation (PWM), мають просту реалізацію, але створюють значні гармонічні спотворення та втрати енергії на перемикання. Натомість використання вихідних сигналів синусоїдальної форми, описаних у [5], забезпечує плавніше керування струмом і зменшення рівня шуму та вібрацій, що позитивно впливає на ресурс двигуна й ефективність. Проте в цих публікаціях розглянуто порівняння лише двох найпростіших за своєю реалізацією ESC-контролерів.

У [6, 7] показано, що застосування ESC-контролерів із синусоїдальним керуванням дозволяє досягти на 10–15% вищої енергоефективності порівняно з традиційними PWM-системами, особливо в умовах частих змін навантаження та швидкості обертання. Однак автори не розглянули наслідків від ускладнення системи.

У статті [8] зазначено, що синусоїдальна модуляція дозволяє зменшити імпульсні струми, що також позитивно впливає на температурний режим роботи двигуна, однак не досліджено збільшення тепловиділення на вихідному каскаді ESC-контролера.

У публікаціях [9, 10] зазначено, що використання синусоїдальних ESC у розвідувальних БпЛА сприяє збільшенню тривалості польоту до 8–12% за рахунок зниження загального споживання енергії.

В [11] зазначено, що синусоїдальна модуляція потребує складніших алгоритмів і підвищених вимог до обчислювальних ресурсів мікроконтролера, що може впливати на масу, вартість та складність програмного забезпечення БпЛА.

Отже, узагальнення останніх наукових праць свідчить, що, попри наявність окремих результатів дослідження впливу форми вихідного сигналу ESC-контролерів на роботу електродвигунів, питання комплексного аналізу цих систем залишається недостатньо опрацьованим [12]. У більшості з них увагу зосереджено переважно на порівнянні традиційних PWM-систем із синусоїдальними методами керування, тоді як ширший спектр сучасних підходів, включно з FOC (Field-Oriented Control) та SVPWM (Space Vector PWM), розглядається фрагментарно або без урахування їх взаємного впливу на енергоефективність та теплові режими силової електроніки. У згаданих роботах здебільшого аналізуються лише окремі параметри: зменшення гармонічних спотворень, покращення плавності моменту або зниження рівня вібрацій. Натомість комплексний взаємозв'язок між формою сигналу, втратами у вихідному каскаді ESC, масогабаритними характеристиками апаратури, вимогами до обчислювальних ресурсів та впливом на тривалість польоту БпЛА – практично не розглянутий. Отже, у сучасній науковій літературі відсутнє ґрунтовне порівняння всіх методів побудови ESC-контролерів та їхніх вихідних сигналів у єдиному підході, що враховував би одночасно енергетичні, теплові,

конструктивні й експлуатаційні характеристики. Це формує чітку наукову прогалину та вказує на необхідність проведення системного дослідження, спрямованого на створення інтегральної методики оцінювання енергоефективності ESC-контролерів у контексті їх застосування в розвідувальних БпЛА.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є аналіз бортових систем електроживлення розвідувальних БпЛА I класу з BLDC-двигуном та визначення найкращої з них щодо енергоефективності, а також пошук шляхів підвищення енергоефективності системи керування BLDC-двигунами БпЛА I класу.

Виклад основного матеріалу. Для формування трифазного струму для BLDC-двигуна в БпЛА використовуються різні типи вихідних сигналів ESC-контролерів залежно від необхідної дальності польоту, енергоефективності, зносостійкості, рівня вібрацій та доцільності застосування дорогого обладнання. Функцію перетворення постійної напруги АКБ у трифазну покладено на ESC-контролер (рис. 2).



Рис. 2. Призначення ESC-контролера

Сигнал для ESC-контролера є періодичною функцією зі сталим періодом повторення (20 мс) та змінною тривалістю імпульсу від 0,544 мс до 2,4 мс (PWM Servo), приклад якого наведено на рис. 3.

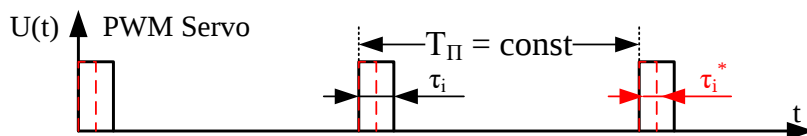


Рис. 3. Сигнал PWM Servo від польотного контролера

До складу типового ESC-контролера входить: мікроконтролер (Micro Controller Unit – MCU), узгоджувальний пристрій для адаптації вихідних сигналів MCU в сигнали керування транзисторами вихідного каскаду – Gate Driver, DC/DC-перетворювач, вихідний каскад ESC-контролера (рис. 4).

За вихідний каскад ESC-контролера зазвичай використовують шість польових транзисторів, об'єднаних попарно в три плеча (за кількістю обмоток BLDC-двигуна). Для створення позитивної напруги на відповідному виході відкривається верхній транзистор плеча, а для створення нульового потенціалу – нижній. DC/DC-перетворювач призначений для створення відповідних напруг для роботи MCU та периферійних пристроїв, що живляться напругами, нижчими від напруги АКБ. Залежно від необхідної форми вихідного сигналу до схеми додаються відповідні датчики та допоміжні блоки. Від форми та способу формування вихідного сигналу ESC-контролера залежить ефективність роботи електродвигуна, шум, електромагнітні перешкоди та нагрівання BLDC-двигуна, а також стабільність його роботи.

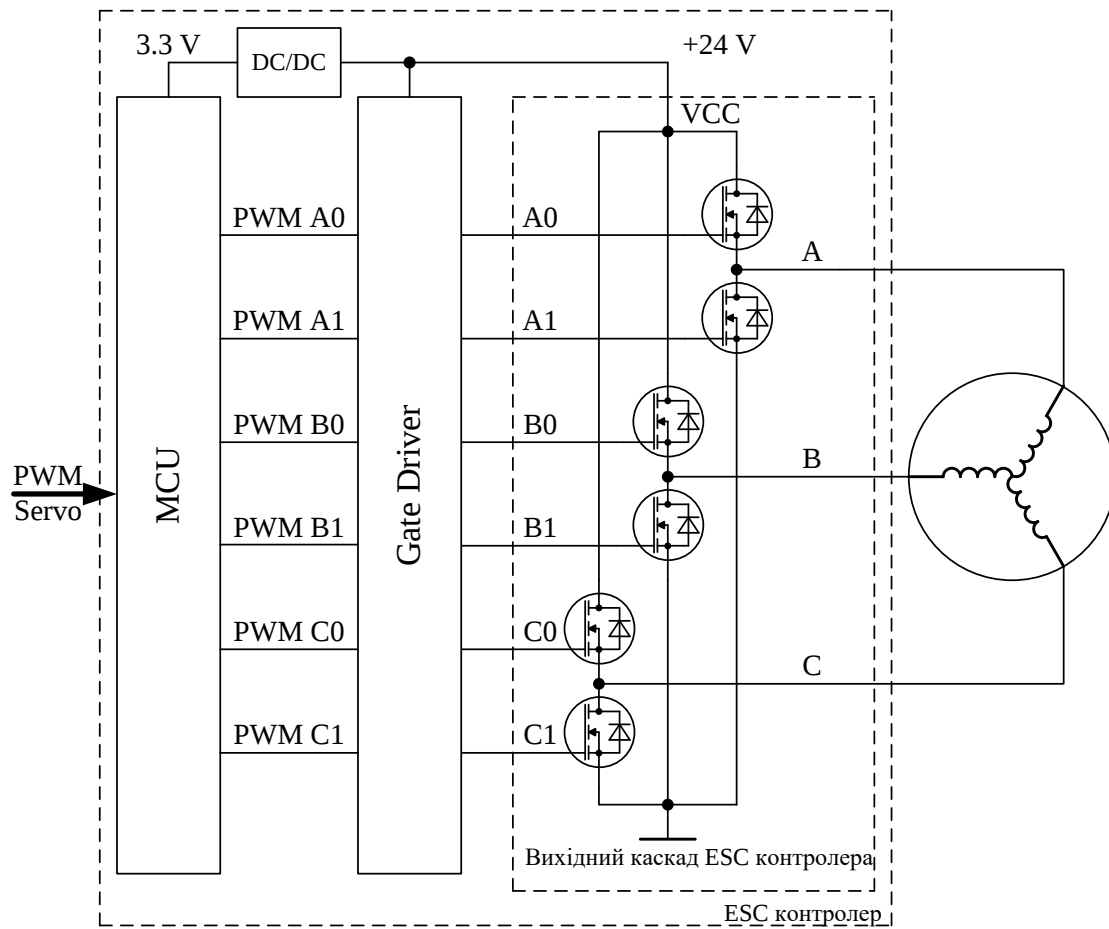


Рис. 4. Структура типового ESC-контролера

Залежно від способу формування основними типами вихідного сигналу ESC-контролера є: сигнал із трапецієподібною ШІМ (Trapezoidal PWM); сигнал із синусоїдальною ШІМ (Sinusoidal PWM); сигнал керування з урахуванням орієнтації поля (FOC); сигнал із векторною ШІМ простору (SVPWM – Space Vector PWM).

В основу роботи ESC-контролера, що забезпечує формування вихідного сигналу з трапецієподібною ШІМ покладено почергову комутацію обмоток електродвигуна до напруги АКБ: у будь-який момент часу на одну з обмоток подається напруга живлення, друга обмотка ротора електродвигуна з'єднується з нульовим потенціалом, а третя використовується для контролю положення (рис. 5).

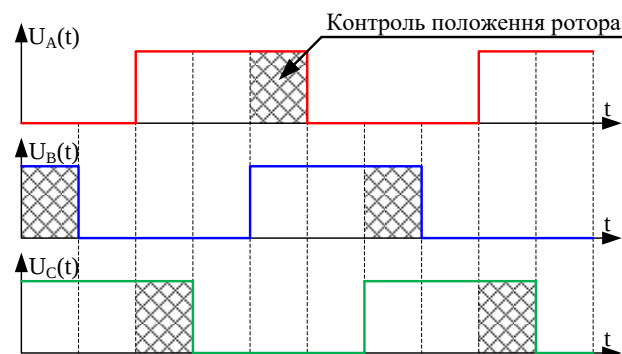


Рис. 5. Вихідний сигнал ESC-контролера з трапецієподібною ШІМ

Для формування таких напруг як керувальний MCU у ESC-контролері використовують прості низькопродуктивні 8-бітні однокристальні мікроконтролери (ОМК), які за заданим алгоритмом та інформацією від польотного контролера про необхідну швидкість обертання ротора BLDC-двигуна формують періодичну послідовність із заданою частотою. У такому разі частота зміни вихідного сигналу ESC-контролера дорівнює частоті обертання колектора електродвигуна. Контроль положення ротора BLDC-двигуна здійснюється шляхом вимірювання електрорушійної сили (ЕРС) самоіндукції в неактивній фазі (обидва транзистори в цій фазі закриті (див. рис. 4)) за наявності сигналу на виході операційного підсилювача (рис. 6).

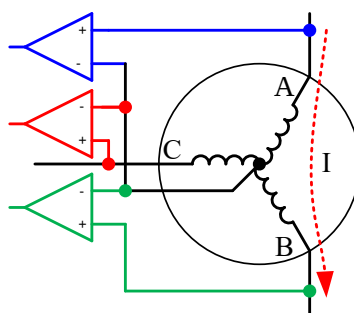


Рис. 6. Фрагмент схеми контролю положення ротора

За такого способу формування вихідних сигналів керування ESC-контролера струми в обмотках BLDC-двигуна мають форму, близьку до трапеції (рис. 7).

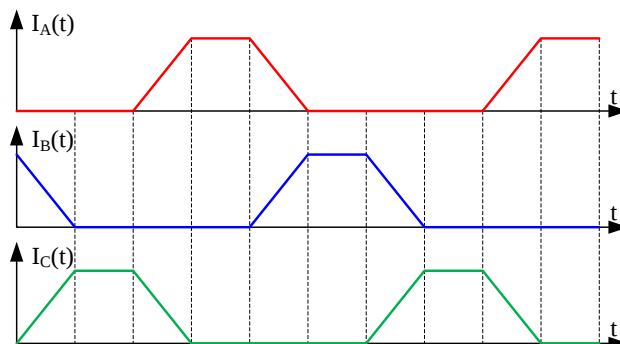


Рис. 7. Енюри струмів на обмотках BLDC-двигуна за трапецієподібного вихідного сигналу ESC-контролера

Перевагами застосування ESC-контролерів із трапецієподібним вихідним сигналом є:
простота схемного рішення;

можливість використання простих низькопродуктивних 8-бітних ОМК, які є відносно дешевими;

можливість використання низькочастотної радіоелементної бази, що значно дешевша.

Недоліками ESC-контролерів із трапецієподібним вихідним сигналом є:

значний нагрів BLDC-двигуна, пов'язаний із живленням його обмоток прямокутними імпульсами, що мають широкий спектр гармонік (порівняно з гармонічною напругою), тому в підсумку більша частина енергії живлення перетворюється в реактивну;

низька енергоефективність через значні реактивні втрати енергії та зниження сили постійних магнітів через їх нагрів;

високий рівень вібрації BLDC-двигуна внаслідок ривків ротора через імпульсний характер живлення обмоток, що викликає прискорене механічне зношування, підвищений рівень шуму (вкрай небажаний для розвідувальних БПЛА) та необхідність застосування стабілізованих підвісів корисного навантаження.

Саме тому застосування ESC-контролерів із трапецієподібним вихідним сигналом є доцільним для дронів-камікадзе та БПЛА, які не потребують високої дальності польоту та не критичні щодо вібрацій.

Прикладом ESC-контролерів із трапецієподібним вихідним сигналом є контролери HobbyKing, EMAX, SimonK ESC, що використовуються в побутових квадрокоптерах, DIY-дронах, FPV (наприклад, F450, Nazgul5).

Більш досконалі ESC-контролери формують трифазну синусоїдальну напругу за допомогою ШІМ. Струми в обмотках при цьому мають синусоїдальну форму та зсунуті на 120° один відносно іншого, що відповідає просторовому розташуванню обмоток у статорі (рис. 8).

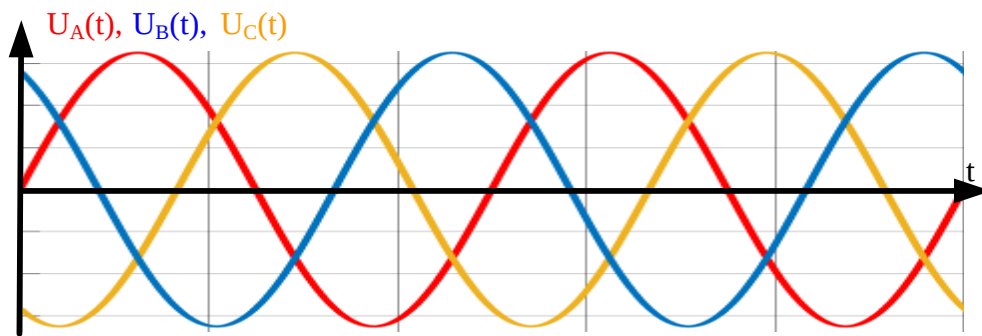


Рис. 8. Вихідний сигнал ESC-контролера із синусоїдальним ШІМ

В основу формування гармонічного сигналу із синусоїдальною ШІМ покладено формування періодичної послідовності імпульсів зі сталим періодом та тривалістю імпульсу, пропорційною значенню функції синусу в поточний момент часу. Принцип реалізації формування вихідного сигналу синусоїдальної форми простіше показати на прикладі формування сигналу для одного із каналів на спрощеній схемі та вихідного силового каскаду (рис. 9).

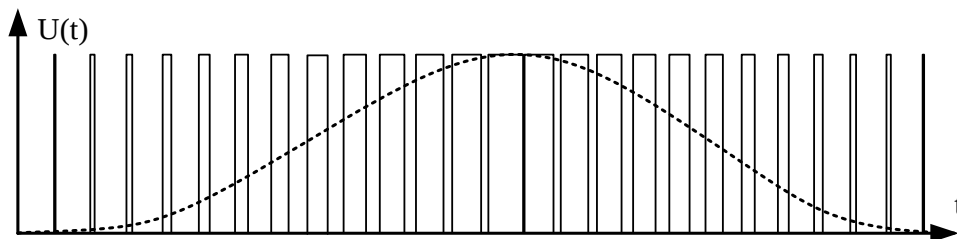


Рис. 9. Принцип перетворення ШІМ-сигналу в синусоїдальну напругу

У разі застосування 8-бітних ОМК для генерування вихідного сигналу ESC-контролеру синусоїдальної форми слід завчасно обрахувати та зберегти в пам'яті ОМК 256 значень для позитивної півхвилі та стільки ж для негативної. Це означає, що для отримання синусоїдального сигналу тактова робоча частота MCU повинна бути не менше ніж у 512 разів вища за необхідну частоту обертання ротора BLDC-двигуна.

Вихідний сигнал ESC-контролера являє собою три зсунуті за фазою на 120° , модульовані функцією синуса, періодичні послідовності, які двигун «сприймає» як синусоїдальні, завдяки індуктивності обмоток.

Основними перевагами використання ESC-контролерів із вихідним сигналом із синусоїдальною ШІМ є:

- зменшення пульсацій крутного моменту (у разі синусоїдального керування струм у фазах змінюється плавно, що забезпечує рівномірний крутний момент упродовж усього електричного циклу), що особливо важливо для стабільності польоту БпЛА, зменшення рівня акустичного шуму, точного позиціонування ротора електродвигуна в кожен момент часу та мінімізації механічних вібрацій електродвигуна;

- зниження нагріву електродвигуна через зменшення спектра сигналу, що, у свою чергу, призводить до зменшення нагріву обмоток і магнітів та сприяє збільшенню ресурсу роботи BLDC-двигуна;

- вищий коефіцієнт корисної дії (ККД) завдяки плавному обертанню магнітного поля, що зумовлює зниження механічних втрат на вібрації та більш ефективне використання магнітного поля ротора (двигун може працювати з більшим крутним моментом за тих самих витрат енергії);

- стійка робота на малих обертах, якої досягають завдяки тому, що на відміну від трапецієподібних ESC-контролерів у системах на низьких швидкостях спостерігається смикання двигуна, а використання синусоїдального керування дозволяє підтримувати плавність навіть за дуже малих швидкостей, що сприяє плавному запуску БпЛА;

- менший рівень електромагнітних завад, оскільки сигнал близький до гармонічного (генерується менше високочастотних складових), що, у свою чергу, веде до зниження вимог до фільтрації та зменшує вплив завад на бортову електроніку;

- збільшення ресурсу та покращення надійності роботи електродвигуна за рахунок меншого навантаження на підшипники й механічні вузли, стійкіші параметри обмоток і магнітів через зниження температури та зменшення ризиків відмови під час критичних режимів польоту завдяки збільшенню стабільності крутного моменту.

З-поміж недоліків застосування ESC-контролерів із вихідним сигналом із синусоїдальною ШІМ слід зазначити такі:

- майже удвічі вища вартість такого ESC-контролера, оскільки для забезпечення реалізації синусоїдальної ШІМ потрібні більш високопродуктивні MCU з достатнім об'ємом пам'яті, швидкодіючі силові ключі (більш високочастотні польові транзистори) і драйвери для роботи на високих частотах, а також додаткові елементи захисту;

- наявність додаткових втрат енергії на перемикання, спричинених тим, що ключі постійно працюють на високій частоті, а це призводить до збільшення втрат на перемикання в польових транзисторах, що, у свою чергу, зумовлює посилення вимог до радіаторів і систем охолодження ESC-контролера;

збільшення масогабаритних показників, обумовлене необхідністю використання додаткових конденсаторів для згладжування пульсацій струму та використання систем охолодження (радіатори, кулери);

обмеження максимальної швидкості, пов'язане зі зниженням ефективності роботи ESC-контролера на високих обертах через втрати на перемикання транзисторів;

складність алгоритму роботи ESC-контролера, зумовлена необхідністю точно відстежувати положення ротора (датчики Холла) або застосовувати бездатчикові алгоритми. Для бездатчикових методів важко забезпечити стабільний запуск двигуна на нульових обертах. Такі алгоритми складніші в програмуванні й налаштуванні, потребують налагодження для кожного конкретного двигуна;

підвищені вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС), пов'язані з тим, що, незважаючи на менший акустичний шум, під час високочастотного перемикання ключів генеруються широкосмугові високочастотні завади, що може впливати на системи зв'язку БПЛА, навігаційні системи та датчики (наприклад, магнітометри).

Прикладом застосування таких ESC-контролерів є STMicroelectronics, Infineon, що використовуються на БПЛА DJI Phantom 3, Walkera Scout X4.

Ще однією проблемою застосування ESC-контролерів як із трапецієвидним вихідним сигналом, так і з вихідним сигналом із синусоїдальною ШІМ є неврахування кутового положення ротора BLDC-двигуна. Через механічні навантаження чи інерційність ротора виникає ситуація, коли його обертання починає випереджати або відставати від обертання магнітного поля. У такому разі різко зростають втрати крутного моменту через витрати енергії, пов'язані зі збільшенням реактивної потужності.

Для усунення цієї проблеми використовується спосіб формування вихідного сигналу ESC-контролера з FOC. Принцип його роботи полягає в керуванні безпосередньо магнітними векторами напряму, для цього він створює на своїх виходах математично обчислені сигнали з урахуванням положення ротора.

У трифазному двигуні протікають струми (I_A , I_B , I_C), які фізично розташовані під кутом 120° у просторі. У такій системі вони є лінійно залежними, а їх векторна сума дорівнює 0 ($I_A + I_B + I_C = 0$ для симетричної системи). Тому для спрощення обрахунків проводиться перетворення трифазних струмів (I_A , I_B , I_C) у два ортогональні компоненти: I_d (створює магнітне поле), I_q (створює крутний момент).

У двигуні з постійними магнітами крутний момент виникає лише тоді, коли магнітне поле статора перпендикулярне до поля ротора. ESC керує обома компонентами незалежно, оптимізуючи роботу двигуна в реальному часі для максимальної ефективності. Для BLDC із постійними магнітами немає потреби в додатковому збудженні, тому ESC намагається тримати $I_d \approx 0$. Тоді увесь струм витрачається на компонент I_q , тобто максимально ефективно створює крутний момент.

Це відбувається з використанням перетворення Кларка (Clarke transform), що переводить трифазні струми (I_A , I_B , I_C) у двофазну систему координат (I_α , I_β), яка є еквівалентом у нерухомій системі координат:

$$I_\alpha = I_A;$$

$$I_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_A + 2I_B),$$

де I_{α} – проєкція струму на вісь α (зазвичай збігається з фазою A);

I_{β} – проєкція струму на вісь β , зсунуту на 90° від α .

Фактично ми замінюємо трифазну систему струмів еквівалентним двовимірним вектором у площині (α, β) (рис. 10).

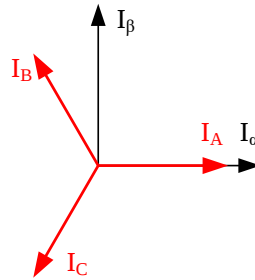


Рис. 10. Просторове подання перетворення Кларка

Оскільки ротор електродвигуна обертається, то синхронно з ним має обертатися й наша система координат, що можна здійснити за допомогою перетворення Парка, яке перетворює цей вектор у систему координат ротора (d, q) .

У разі перетворення Парка (Park Transform), обертова система координат (α, β) трансформується в систему, що обертається разом із ротором (d, q) :

$$I_d = I_{\alpha} \cos \theta + I_{\beta} \sin \theta;$$

$$I_q = -I_{\alpha} \sin \theta + I_{\beta} \cos \theta,$$

де θ – кут положення ротора;

I_d – це складова струму, яка спрямована вздовж магнітного потоку ротора, вона не створює моменту;

I_q – це складова струму, перпендикулярна до поля ротора, яка безпосередньо створює крутний момент.

У системі FOC ми виконуємо регулювання в координатах I_d та I_q , досягаючи створення максимального крутного моменту. Після обрахунку параметрів I_d та I_q потрібно повернутися до нерухомої системи координат за допомогою зворотного перетворення Парка:

$$I_{\alpha} = I_d \cos \theta - I_q \sin \theta;$$

$$I_{\beta} = I_d \sin \theta + I_q \cos \theta.$$

Оскільки використовуємо електродвигун із трьома обмотками, то слід повернутися до трифазної системи координат за допомогою зворотного перетворення Кларка.

ESC-контролер формує напруги, тому слід розрахувати відповідні значення (U_A , U_B , U_C) та на їх основі згенерувати відповідні ШІМ-сигнали для кожної із фаз.

Перевагами застосування ESC-контролерів із векторним керуванням є:

високий ККД, якого досягають через розкладання струму обмоток електродвигуна на I_d (магнітне поле) та I_q (крутний момент), яке дозволяє утримувати $I_d \approx 0$ (у двигунах із постійними магнітами), тобто увесь струм іде на створення крутного моменту;

плавність роботи двигуна, яка є наслідком того, що магнітне поле завжди перпендикулярне до поля ротора, тому крутний момент ідеально рівномірний (мінімум вібрацій та низький рівень шуму);

висока динаміка й точність, які досягаються за рахунок прямого регулювання I_q , що дає можливість точного керування швидкістю, прискоренням і навіть положенням;

зменшення нагріву й триваліший ресурс двигуна можливі через високий ККД;

точний контроль моменту навіть на нульових обертах, тому що FOC ESC завжди точно знає кут ротора, що дає можливість плавного пуску та забезпечує стабільну роботу електродвигуна навіть на дуже малих швидкостях.

Для реалізації ESC-контролера з FOC-керуванням до складу схеми (див. рис. 4) слід додати: датчики струму кожної із фаз, додатковий MCU з швидкодіючим аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) для спрощення вимірювання та перерахунку параметрів струмів і напруг, PID-регулятор (Proportional Integral Derivative) для врахування інерційності електродвигуна (рис. 11).

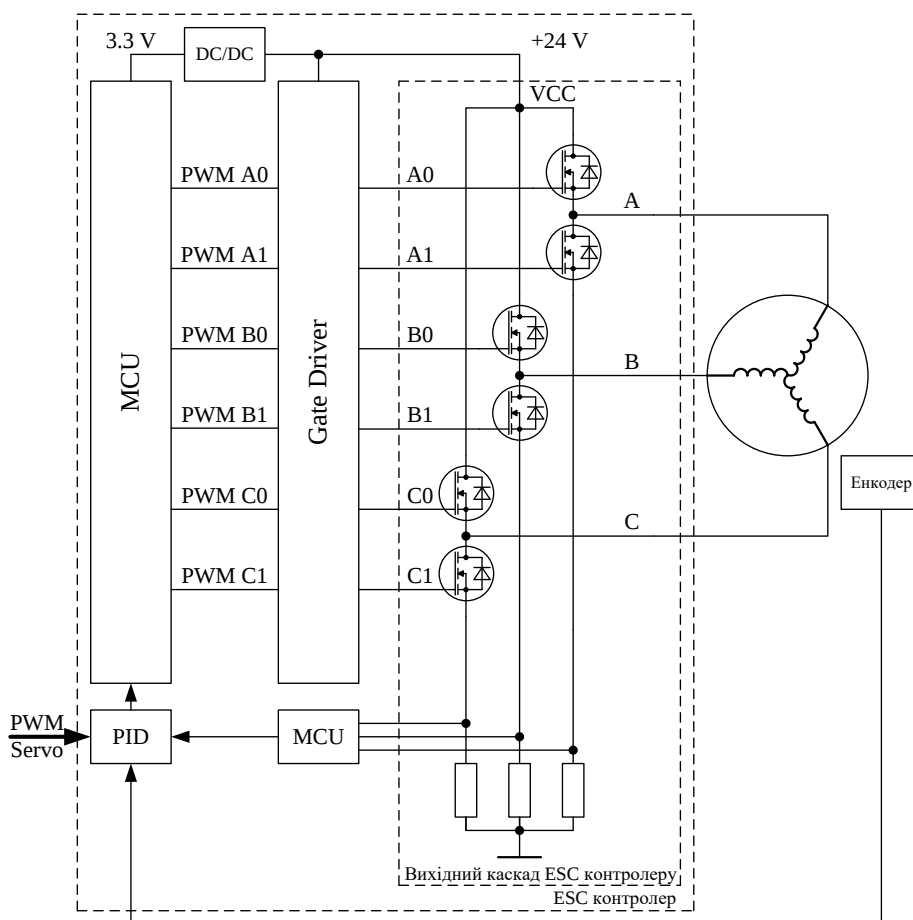


Рис. 11. Структура ESC-контролера з FOC

З-поміж недоліків FOC варто зазначити такі:

висока обчислювальна складність, оскільки алгоритм FOC вимагає виконання перетворень Кларка – Парка, зворотних перетворень та генерації ШІМ у реальному часі, що потребує швидкодіючих мікроконтролерів, а також необхідність застосування систем охолодження;

високі вимоги до точності визначення положення ротора, зумовлені тим, що його кутове значення використовується для обрахунку струмів;

дороговартість ESC контролера, спричинена необхідністю використання потужних MCU, швидких драйверів, датчиків струму та положення. FOC-контролер коштує в кілька разів дорожче, ніж за ESC-контролери з вихідним сигналом із синусоїдальною широтно-імпульсною модуляцією;

складність налаштування та реалізації, пов'язані з необхідністю врахування точних значень параметрів двигуна: індуктивності, опору обмоток, кількості полюсів, моментної константи;

потреба в застосуванні систем охолодження MCU та транзисторів вихідного каскаду через значні втрати, обумовлені високою частотою перемикань.

Отже, FOC забезпечує: високий ККД, плавність і точність, але за рахунок підвищеної складності, високих обчислювальних й апаратних вимог, більшої ціни та складності в налаштуванні.

Прикладом використання таких контролерів у зразках озброєння є ESC-контролери: Texas Instruments (DRV83xx, C2000), STMicroelectronics (STM32G4), Microchip (dsPIC33CK), NXP (MC56F84xxx), – що встановлені в БпЛА: Bayraktar TB2, UkrJet UJ-31 Zlyva, Thales Spy'Ranger, RQ-11 Raven.

Основним недоліком ESC-контролерів із FOC є великі втрати електричної енергії на транзисторах під час переключення вихідного каскаду, саме тому система охолодження є обов'язковою умовою їх тривалої роботи.

Для зменшення втрат електричної енергії у вихідному каскаді використовують метод формування вихідних сигналів ESC-контролера з векторною ШІМ простору (SVPWM). Його робота полягає у формуванні вихідних сигналів ESC із використанням перетворень Кларка – Парка, але прямокутної форми (як і в Trapezoidal PWM), послідовність і тривалість яких вираховується залежно від положення ротора та необхідного крутного моменту. Це допомагає знизити частоту перемикання вихідних транзисторів, а саме скоротити час роботи транзистора в перехідному режимі, що значно зменшує теплові втрати, дозволяє послабити вимоги до систем тепловідведення та охолодження, а отже, зменшити вагу.

На відміну від класичної синусоїдальної ШІМ, у якій кожна фаза інвертора керується незалежно, метод SVPWM розглядає трифазну систему як єдиний вектор напруги, що обертається в площині двох ортогональних координат ($\alpha - \beta$) (рис. 12). Це дозволяє оптимізувати процес комутації, підвищити коефіцієнт використання напруги живлення та зменшити гармонічні спотворення вихідних струмів.

У трифазному інверторі з шістьма силовими транзисторами можливі вісім станів комутації: шість активних векторів напруги, розташованих під кутом 60° один до одного

в площині $\alpha - \beta$, та два нульові вектори, які відповідають станам, коли всі верхні або всі нижні ключі увімкнені.

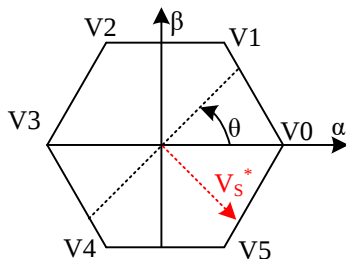


Рис. 12. Геометричне подання просторових векторів напруг у методі SVPWM

Комбінація цих векторів формує регулярний шестикутник, у межах якого може знаходитися будь-який бажаний вектор напруги V_s^* .

У межах кожного періоду ШІМ-алгоритм визначає, у якому секторі шестикутника перебуває вектор V_s^* , і формує його шляхом послідовного прикладання двох сусідніх активних векторів та одного нульового.

Отже, алгоритм SVPWM відтворює бажану векторну напругу за допомогою комбінації дискретних станів вихідного каскаду.

Зниження частоти комутації вихідних ключів ESC-контролера відбувається за рахунок того, що один оберт двигуна розбивається на шість секторів, кожен із яких характеризується певною комбінацією увімкнених та вимкнених транзисторів.

Основними перевагами використання ESC-контролерів із вихідним сигналом, сформованим за методом Space Vector PWM (SVPWM), є:

більш ефективне використання постійної напруги джерела живлення (до 15%), максимальна амплітуда вихідної напруги при цьому може досягати значення $0,907 \cdot$ від напруги живлення замість 0,866, що дозволяє зменшити струми в обмотках двигуна;

зменшення втрат на перемикання пов'язане з тим, що SVPWM формує оптимізовану послідовність комутацій (кількість перемикань силових ключів значно менша порівняно із синусоїдальною ШІМ);

покращення плавності обертання ротора: SVPWM забезпечує більш рівномірне обертання магнітного поля в статорі, що зменшує пульсації крутного моменту, що зумовлює зниження рівня вібрацій, підвищення стабільності роботи двигуна, а отже, подовжує строк служби електродвигуна та його механічних вузлів;

висока сумісність із векторним керуванням (FOC): метод SVPWM є природним продовженням алгоритмів векторного керування, оскільки формує напруги безпосередньо в системі координат $\alpha - \beta$ та дозволяє більш точно реалізовувати обчислені FOC напруги на фазах двигуна, забезпечуючи мінімальну фазову помилку між напругою та струмом, що веде до максимального ККД електропривода;

зниження теплового навантаження на силові ключі: завдяки рівномірному розподілу активних векторів у межах шестикутника просторового вектора напруги, забезпечується рівномірне навантаження на транзистори та симетричний розподіл тепла, що зменшує ризик локального перегріву ESC-контролера;

можливість роботи на підвищених частотах: метод SVPWM забезпечує стабільність керування навіть за високих частот перемикання, що дозволяє використовувати його у високошвидкісних двигунах БПЛА, не втрачаючи точності формування напруги та моменту.

Недоліками застосування ESC-контролерів із формуванням вихідного сигналу за методом Space Vector PWM (SVPWM) є такі:

висока обчислювальна складність алгоритму, оскільки метод вимагає постійного обчислення сектора розташування миттєвого вектора напруги та відповідних тривалостей імпульсів ШІМ. Для реалізації таких обчислень у реальному часі необхідно використовувати високопродуктивні мікроконтролери з апаратною підтримкою тригонометричних операцій, що значно ускладнює реалізацію: підвищує споживання енергії контролером і збільшує вартість апаратної частини;

чутливість до точності визначення положення ротора (для правильного формування просторового вектора напруги необхідно знати точне миттєве значення кута ротора (θ), оскільки помилка його визначення призводить до фазового зсуву між векторами струму та напруги, що знижує ефективність, створює додаткові реактивні втрати та може спричинити втрату синхронізації магнітного поля);

підвищені вимоги до апаратної частини обґрунтовані тим, що для забезпечення високої точності комутації та мінімізації гармонічних спотворень необхідно використовувати високошвидкісні драйвери затворів, швидкодіючі датчики струму в кожній фазі та низькоіндуктивні з'єднання в силовому колі. Це зумовлює зростання собівартості виготовлення ESC-контролера, ускладнює трасування друкованої плати (часто потрібно 4–6-шарові друковані плати) і призводить до збільшення масогабаритних показників модуля;

зростання вартості та власного енергоспоживання контролера відбувається через необхідність використання потужних MCU, швидких аналогових підсистем і прецизійних сенсорів. Ціна ESC-контролера, що реалізує SVPWM, може бути на 40–80% вищою, ніж аналогічного із синусоїдальною ШІМ. Крім того, власне споживання енергії мікроконтролером і драйверами може становити до 5–8% від загальної потужності системи, що є суттєвим для БПЛА малої маси, де енергоефективність є критично важливою.

Найбільш широкого впровадження в зразках БПЛА набули ESC-контролери: Infineon (XMC4800), TI (C2000), STMicroelectronics (STSPIN32G4), Zubax Robotics («Муха V2», Orel 20), – що застосовуються в DJI Mavic 3, AeroVironment Puma, Skyeton Raybird-3, Quantum Trinity F9.

Отже, проведений аналіз методів формування вихідних сигналів ESC-контролерів показав, що вибір алгоритму керування безпосередньо впливає на енергоефективність, надійність і стабільність роботи безколекторних електродвигунів, які застосовуються в розвідувальних БПЛА.

Прості схеми керування з трапецієподібною ШІМ забезпечують мінімальну вартість та простоту реалізації, проте характеризуються значними втратами енергії, підвищеними вібраціями й низькою стабільністю обертання.

Використання синусоїдальної ШІМ дозволяє суттєво підвищити плавність роботи електродвигуна, зменшити нагрів та знизити рівень електромагнітних завад, однак вимагає потужніших мікроконтролерів і складніших алгоритмів керування.

Векторне керування з орієнтацією поля (FOC) забезпечує максимальну точність регулювання крутного моменту і найвищий коефіцієнт корисної дії, проте має високу складність програмно-апаратної реалізації, потребує точного визначення положення ротора.

Метод Space Vector PWM (SVPWM), особливо в комбінації з FOC, є найбільш збалансованим сучасним рішенням, що поєднує високу енергоефективність, плавність моменту, оптимальне використання напруги живлення та можливість роботи в широкому діапазоні швидкостей.

Водночас його застосування доцільне переважно у висококласних системах електроприводу БПЛА, де критичними є параметри плавності, точності та ККД, а додаткові витрати на складність апаратури виправдовуються підвищенням тривалості польоту та надійності роботи всієї системи.

SVPWM є покращеною формою ШІМ, що використовує математичну модель просторових векторів напруги для формування максимально ефективного фазного сигналу. Цей метод дозволяє збільшити використання напруги живлення до 15% порівняно зі звичайною синусоїдальною ШІМ, що особливо важливо для БПЛА, де енергетичний запас обмежений.

Крім того, SVPWM нівелює пульсації струму, забезпечує більш плавну комутацію, менший акустичний шум та знижує втрати перемикання завдяки мінімізації часу роботи транзисторів у перехідних режимах. У поєднанні з FOC SVPWM є найбільш ефективним методом керування сучасними BLDC, що демонструє найкращі показники стабільності моменту, температурного режиму та енергоефективності.

Отже, FOC та SVPWM слід розглядати як взаємодоповнювальні технології, що в сукупності забезпечують оптимальне керування двигуном в енергообмежених системах БПЛА. Їх застосування дозволяє мінімізувати електромагнітні втрати, збільшити ККД ESC, а також забезпечити плавність тяги та покращити загальну динаміку польоту. Це робить такі методи ключовими для подальшого розвитку енергоефективних систем електроживлення БПЛА.

Висновки. Проведений аналіз сучасних методів формування вихідного сигналу ESC-контролерів підтверджує, що вибір алгоритму керування безпосередньо визначає енергоефективність, тепловий режим і динамічні характеристики безколекторних електродвигунів, які є основними споживачами енергії в розвідувальних БПЛА. Порівняння різних методів показало, що трапецієподібна ШІМ є найпростішою, але характеризується підвищеними втратами та нерівномірністю моменту; синусоїдальна ж забезпечує вищу плавність, але має обмеження у використанні напруги.

Найкращі показники ефективності демонструють векторне керування FOC та метод модулювання SVPWM. FOC забезпечує високоточне регулювання електромагнітного моменту та мінімізацію пульсацій струму, тоді як SVPWM дозволяє на 10–15% ефективніше використовувати напругу живлення та зменшує втрати перемикання. Комбінація FOC + SVPWM є найбільш збалансованим і технологічно ефективним

рішенням для БпЛА, оскільки забезпечує максимальний ККД, плавність тяги, низький рівень вібрацій та оптимальне тепловиділення ESC.

Водночас залишається недостатньо дослідженим комплексний вплив параметрів сигналу на енергетичні втрати, нагрівання силових ключів та ресурс роботи двигуна в умовах змінного навантаження. Подальший розвиток напрямку потребує створення багатофакторної моделі, що враховуватиме форму вихідного сигналу ESC-контролера, масу компонентів, теплові процеси та характеристики ESC у динамічних режимах польоту. Розроблення та експериментальна перевірка такої моделі дозволить сформувати основу для адаптивних енергоефективних систем керування електроприводами БпЛА, здатними автоматично оптимізувати форму сигналу залежно від умов експлуатації та режиму польоту.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Efficiency Comparison of Trapezoidal and Sinusoidal Method for Brushless DC Motor Drive // M. A. A. Hassan, A. R. Abdullah, N. Bahari, & M. I. M. Sabri // *Applied Mechanics and Materials*. Aug. 2015. Vol. 785. P. 248–252. URL: AMM.785.248scientific.net. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/>
2. Mukhlisin A., Yuniarto M. N., & Rijanto E. Performance Comparison of BLDC Motor Controllers Designed Based on Trapezoidal Commutation and FOC // *In AIP Conference Proceedings*. Dec. 2019. Vol. 2187, № 1. P. 060002. <https://doi.org/10.1063/1.5138363>
3. Academia+2ResearchGate+2Academia+2Yorat E., Özbek N. S., & Saribulut L. Comparative Analysis of Field Oriented Control of BLDC Motor Using SPWM and SVPWM Techniques // *ResearchGate*. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/322515477_Comparative_analysis_of_field_oriented_control_of_BLDC_motor_using_SPWM_and_SVPWM_techniquesResearchGate (last accessed: 01.10.2025).
4. Іванов О. М., Петров І. С. Системи керування безколекторними двигунами постійного струму: теорія та практика. Київ : Техніка, 2020. 256 с.
5. Azab M. Comparative Study of BLDC Motor Drives with Different Approaches: FCS-Model Predictive Control and Hysteresis Current Control // *World Electr. Veh. J.* Jun. 2022. Vol. 13, № 7. P. 112. <https://doi.org/10.3390/wevj13070112>
6. Ковальчук В. А., Демиденко Т. Г. Порівняльний аналіз алгоритмів керування БКМ у БпЛА // *Електромеханічні системи*. 2021. № 2. С. 42–49.
7. Chen X., Nakamura Y. Adaptive Control of Brushless DC Motors for Energy Efficiency in UAVs // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2020. Vol. 18, № 5. P. 1125–1135.
8. Шевченко М. В. Вплив форми сигналу на нагрів та втрати в БКМ // *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 31–36.
9. Park J., Kim D. Comparative Study on ESC Topologies in Small UAV Applications // *Journal of Power Electronics*. 2018. Vol. 18, № 2. P. 320–327.
10. Романов С. В., Климчук І. Ю. Оптимізація енерговитрат у системах керування двигунами для безпілотних апаратів // *Вісник авіації та космонавтики*. 2023. № 3. С. 27–34.
11. Lin W., Huang C. Microcontroller Limitations in Implementing Advanced Motor Control Algorithms for UAVs // *Electronics*. 2021. Vol. 10, № 11. P. 1342. <https://doi.org/10.3390/electronics10111342>

12. Fotouhi A., Moghaddam M. N., & Zadeh M. K. Energy Consumption Optimization in UAV Systems: A review // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 4. P. 1323. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7926674/> (last accessed: 01.10.2025).
13. How many watts does a drone use? // *EcoFlow Blog*. 2023. URL: <https://blog.ecoflow.com/uk/how-many-watts-does-drone-use/> (last accessed: 01.10.2025).
14. Rojas D. A. Pixhawk and APM Power Consumption // *DIY Drones Blog*. 2014. URL: <https://diydrones.com/profiles/blogs/pixhawk-and-apm-power-consumption> (last accessed: 01.10.2025).
15. Wireless Communications for UAV: Enabling technologies and applications / J. G. Jaramillo et al. // *Frontiers in Energy Research*. 2022 Vol. 10. P. 752012. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.752012/full> (last accessed: 01.10.2025).

Стаття надійшла до редакції 26.11.2025.

REFERENCES

1. Hassan, M. A. A., Abdullah, A. R., Bahari, N., & Sabri, M. I. M. (Aug. 2015). Efficiency Comparison of Trapezoidal and Sinusoidal Method for Brushless DC Motor Drive. *Applied Mechanics and Materials*, 785, 248–252. Retrieved from AMM.785.248scientific.net. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/>
2. Mukhlisin, A., Yuniarto, M. N., & Rijanto, E. (Dec. 2019). Performance Comparison of BLDC Motor Controllers Designed Based on Trapezoidal Commutation and FOC. In *AIP Conference Proceedings*, 2187, 1, 060002. <https://doi.org/10.1063/1.5138363Academia+2ResearchGate+2Academia+2>
3. Yorat, E., Özbek, N. S., & Saribulut, L. (2018). Comparative Analysis of Field Oriented Control of BLDC Motor Using SPWM and SVPWM Techniques. *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/322515477_Comparative_analysis_of_field_oriented_control_of_BLDC_motor_using_SPWM_and_SVPWM_techniquesResearchGate
4. Ivanov, O. M., & Petrov, I. S. (2020). *Systemy keruvannia bezkolektornymy dvyhunamy postiinoho strumu: teoriia ta praktyka [DC Collectorless Motor Control Systems: Theory and Practice]*. Kyiv [in Ukrainian].
5. Azab, M. (Jun. 2022). Comparative Study of BLDC Motor Drives with Different Approaches: FCS-Model Predictive Control and Hysteresis Current Control. *World Electr. Veh.*, 13, 7, 112. <https://doi.org/10.3390/wevj13070112>
6. Kovalchuk, V. A., & Demydenko, T. H. (2021). Porivnialnyi analiz alhorytmiv keruvannia BKM u BpLA [Comparative Analysis of BKM Control Algorithms in UAVs]. *Elektromekhanichni systemy [Electromechanical systems]*, 2, 42–49 [in Ukrainian].
7. Chen, X., & Nakamura, Y. (2020). Adaptive Control of Brushless DC Motors for Energy Efficiency in UAVs. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 5, 1125–1135.
8. Shevchenko, M. V. (2022). Vplyv formy syhnalu na nahiriv ta vtraty v BKM [The Influence of the Waveform on Heating and Losses in BCM] // *Tekhnichna elektrodynamika [Technical Electrodynamics]*, 1, 31–36 [in Ukrainian].
9. Park, J., & Kim, D. (2018). Comparative Study on ESC Topologies in Small UAV Applications. *Journal of Power Electronics*, 18, 2, 320–327.

10. Romanov, S. V., & Klymchuk, I. Yu. (2023). Optymizatsiia enerhovytrat u systemakh keruvannia dvyhunamy dlia bezpilotnykh aparativ [Optimization of Energy Consumption in Engine Control Systems for Unmanned Aerial Vehicles]. *Visnyk aviatsii ta kosmonavtyky [Bulletin of Aviation and Cosmonautics]*, 3, 27–34 [in Ukrainian].
11. Lin, W., & Huang, C. (2021). Microcontroller Limitations in Implementing Advanced Motor Control Algorithms for UAVs. *Electronics*, 10, 11, 1342. <https://doi.org/10.3390/electronics10111342>
12. Fotouhi, A., Moghaddam, M. N., & Zadeh, M. K. (2021). Energy Consumption Optimization in UAV Systems: A review. *Sensors*, 21, 4, 1323. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7926674/>
13. How many watts does a drone use? (2023). *EcoFlow Blog*. Retrieved from <https://blog.ecoflow.com/uk/how-many-watts-does-drone-use/>
14. Rojas, D. A. (2014). Pixhawk and APM Power Consumption. *DIY Drones Blog*. Retrieved from <https://diydrones.com/profiles/blogs/pixhawk-and-apm-power-consumption>
15. Jaramillo, J. G., et al. (2022). Wireless Communications for UAV: Enabling technologies and applications. *Frontiers in Energy Research*, 10, 752012. Retrieved from <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.752012/full>

Yu. L. Bondarenko, I. A. Ishchenko

ANALYSIS OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF RECONNAISSANCE ELECTRIC MOTORS UNMANNED AERIAL VEHICLES OF THE 1st CLASS

The article examines modern approaches to increasing the energy efficiency of power supply systems of unmanned aerial vehicles, in particular, the interaction of power sources, electronic speed regulators and collectorless electric motors is investigated. The structure of a typical energy system of unmanned aerial vehicles, including batteries, power distribution modules, a flight controller and power converters, was analyzed. Special attention is paid to the characteristics of collectorless electric motors, their efficiency indicators, as well as the influence of control algorithms on dynamics, accuracy and losses in the electric drive.

Different types of output signal forms of electronic speed regulators are considered separately - trapezoidal control, sinusoidal pulse width, vector control taking into account field orientation and spatial-vector pulse width modulation of space. A comparative analysis of these methods was made according to the parameters of smoothness of movement, noise level, complexity of implementation and general energy efficiency. It is shown that the transition from simple pulse methods to signal methods taking into account the orientation of the field provides a significant reduction in losses, stabilization of the moment and improvement of control accuracy, which is critically important for unmanned aerial vehicles with a long flight time.

The work shows the importance of multifactorial modeling, which takes into account the mutual influence of battery voltage, waveform, temperature regimes, mechanical load and engine parameters. The need for further research in the direction of optimizing the algorithms of electronic speed regulators and analyzing their impact on the battery life and the overall energy efficiency of the power supply system of unmanned aerial vehicles has been established.

Keywords: *unmanned aerial vehicles of the 1st class; collectorless electric motor; power supply system; adaptive control; energy efficiency; electronic speed regulator; signal form.*