

Машковський Р.А.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Малий О.Ю.

Національний університет «Запорізька політехніка»

ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННИХ КОНТРОЛЕРІВ ШВИДКОСТІ (ESC) ДЛЯ БЕЗКОЛЕКТОРНИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (BLDC)

Мета статті полягає в аналізі та розробці рекомендацій щодо проектування і реалізації електронних контролерів швидкості (ESC) для безколекторних двигунів постійного струму (BLDC). У роботі враховано сучасні технологічні рішення, включаючи силові транзистори, драйвери ключів, мікроконтролери (MCU), фільтруючі конденсатори. Дослідження спирається на аналітичний і експериментальний підходи до аналізу компонентної бази ESC, їх функціональних властивостей і адаптації до різних робочих умов. Методи включають порівняння характеристик силових транзисторів (MOSFET, IGBT, GaN, SiC), аналіз сумісності MCU із прошивками (BLHeli, AM32, KISS), і аналіз енергоефективності ESC для різних застосувань, таких як дрони, промислові пристрої та електромобілі. У роботі проведено комплексний аналіз структурної схеми ESC, ключових компонентів та їх вплив на ефективність керування BLDC двигунами. Розглянуто особливості роботи силових транзисторів (MOSFET, BJT, GaN, SiC) і фільтруючих конденсаторів, включно з температурною стабільністю, допусками ємності та абсорбцією, що є критично важливими для надійної роботи системи. Систематизовано відповідність між типами прошивок (BLHeli, AM32, KISS) і мікроконтролерами, а також описано їх застосування в різних типах ESC, залежно від області використання, таких як дрони, робототехніка та промислові системи. Удосконалено методики вибору компонентів для ESC у мультисистемному застосуванні. У статті демонструється системний підхід до впровадження сучасних технологій у проектуванні ESC для BLDC двигунів. Було проаналізовано та узагальнено сумісність мікроконтролерів з прошивкою (BLHeli_S, BLHeli_32, AM32) для забезпечення оптимізації для практичного застосування. Крім того, було запропоновано методи оцінки компонентів. Результати роблять внесок у існуючі наукові знання, пропонуючи більш комплексний підхід до керування двигунами BLDC. Результати дослідження є корисними для створення ESC нового покоління, здатних забезпечити високу ефективність, точність і надійність. Висновки можуть застосовуватися в розробці керування двигунами для дронів, робототехніки, електромобілів, аерокосмічних і промислових систем. Виробникам компонентів ESC запропоновано рекомендації щодо адаптації сучасних протоколів зв'язку (DShot, CAN) та автоматизованих функцій діагностики для інтеграції телеметрії у багатомоторні системи.

Ключові слова: електронний контролер швидкості, ESC, безколекторний двигун, BLDC двигун, силові транзистори, мікроконтролер, MCU, прошивка, фільтруючі конденсатори.

Постановка проблеми. Машини, що починаються з простих пристроїв, таких як дрилі, а закінчуються складним обладнанням, як промислові роботи, всі використовують безколекторні двигуни постійного струму, які перетворюють електричну енергію в обертальний рух.

Безколекторні двигуни постійного струму, які також називають BLDC двигунами, мають багато переваг порівняно з їхніми колекторними аналогами. Вони забезпечують вищу ефективність

і потребують меншого обслуговування, саме тому вони замінили колекторні двигуни в багатьох застосуваннях.

Обидва типи двигунів працюють на основі схожого принципу, в якому обертальний рух створюється за допомогою притягання та відштовхування магнітних полюсів постійних та електромагнітів. Однак, спосіб керування цими двигунами дуже різниться. Безколекторні двигуни постійного струму потребують складного

контролера, який також називають електронним контролером швидкості (ESC) тоді як колекторний двигун можна контролювати, регулюючи постійну напругу [1].

ESC відіграють важливу роль у сучасних системах керування BLDC, забезпечуючи точний контроль над робочими параметрами двигуна, такими як швидкість, напрямок і крутний момент.

ESC періодично перемикає струм між фазами двигуна відповідно до положення двигуна, щоб забезпечити плавне обертання. Це може керуватися зворотним зв'язком від датчиків усередині двигуна (керування на основі датчиків) або шляхом виявлення зворотної електрорушійної сили (ЕРС) від самого двигуна (керування без датчиків).

ESC отримують сигнали, які визначають бажані робочі стани через різні протоколи зв'язку, які можуть включати аналоговий, широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ), послідовні протоколи, такі як UART, або розширені цифрові інтерфейси, такі як шина CAN. Ця гнучкість дозволяє інтегрувати ESC в різні типи архітектур керування, від простих пристроїв з дистанційним керуванням до складних багатомоторних систем, керованих складним програмним забезпеченням.

Удосконалені ESC також можуть інтегрувати вхідні дані від датчиків, таких як датчики Холла або енкодери, які забезпечують зворотній зв'язок щодо поточної швидкості та положення двигуна. Цей зворотній зв'язок дозволяє створювати системи керування замкнутим циклом, підвищуючи точність і ефективність роботи двигуна.

ESC часто включають функції, призначені для захисту як двигуна, так і самого ESC, такі як відключення напруги для запобігання надмірному розряду акумуляторів, механізми термічного відключення для запобігання перегріву та обмеження струму для запобігання перегоранню двигуна.

Багато сучасних ESC пропонують можливість програмування, що дозволяє налаштовувати такі параметри, як криві прискорення, сила гальмування та характеристики відгуку для конкретних застосувань. Цей рівень налаштування дозволяє точно налаштовувати керування двигуном відповідно до унікальних вимог конкретних завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні кілька десятиліть позначилися значним прогресом у дослідженнях BLDC двигунів і ESC, які їх обслуговують. На початкових етапах наукової думки основна увага була зосереджена на принципах комутації фаз з використанням датчикових технологій, таких як датчики ефекту Холла, які надавали зворотній зв'язок щодо позиції

ротора. Однак, такі підходи виявлялися дорогими й енергозатратними, що зумовило пошук рішень для бездатчикового керування.

Ряд наукових праць [2, с. 300; 3, с. 1] досліджував користь використання зворотної ЕРС для отримання сигналу положення ротора, що стало значним кроком уперед у розробці більш економічних і гнучких ESC. Цей метод довів свою ефективність у широкому діапазоні використання, наприклад, у дронах, електромобілях і промисловій автоматизації.

Протягом останніх років прогрес у напівпровідникових технологіях, таких як MOSFET, IGBT, а також GaN і SiC транзистори, дозволив суттєво підвищити ефективність і гнучкість конструкцій ESC. Такі технології отримали апробацію в роботах [4, с. 1499; 5, с. 10; 6, с. 1], зокрема у високопродуктивних системах, де критичними є швидкість і точність перемикачів, а також тепловідведення.

Дослідники також звертають увагу на можливість інтеграції сучасних мікроконтролерів, таких як STM32 і TMS320, з розширеними алгоритмами векторного керування (FOC), як засоби підвищення ефективності керування BLDC двигунами [7, с. 335; 8, с. 1]. Завдяки цифровим сигнальним процесорам стало можливим покращити роботу ESC у реальному часі, водночас забезпечуючи стабільність і мінімізацію втрат.

Незважаючи на досягнення, існує низка невирішених питань. Зокрема:

- Відсутність стандартизованих програмних платформ для інтеграції ESC у складні системи керування.

- Проблеми із забезпеченням роботи в екстремальних умовах, таких як висока температура або вібрація.

- Недостатній аналіз роботи ESC в умовах високочастотної комутації з використанням GaN і SiC транзисторів, що потенційно може збільшити перешкодостійкість у промислових застосуваннях.

Дана стаття зосереджується на комплексному аналізі технічних рішень та компонентів ESC для BLDC двигунів, визначаючи їхні переваги, обмеження та перспективи розвитку на основі новітніх досягнень у цій галузі. Таким чином, робота буде фундаментом для інтеграції передових підходів, що мінімізують недоліки наявних рішень.

Мета статті полягає у розробці рекомендацій щодо проектування та реалізації систем ESC для BLDC двигунів із врахуванням сучасних технологічних рішень і вимог до ефективності, надійності та гнучкості.

Поставлені завдання:

- Аналіз особливостей і характеристик ключових елементів ESC, таких як силові транзистори (MOSFET, IGBT, GaN, SiC), драйвери ключів, мікроконтролери та фільтруючі конденсатори.

- Визначення параметрів вибору та обґрунтування оптимальних компонентів для ESC залежно від області застосування (наприклад, роботи автономних дронів, промислової автоматики, електромобілів).

- Узагальнення сучасних алгоритмів керування BLDC двигунами, таких як широтно-імпульсна модуляція (ШИМ) і векторне керування (FOC), і їх технологічного впровадження за допомогою блоків MCU.

- Розробка критеріїв оцінки якості ESC, таких як енергоефективність, тепловиділення, точність керування і стійкість до зовнішніх перешкод.

- Формування рекомендацій щодо модернізації ESC для використання високочастотних транзисторних технологій (GaN, SiC) з максимальним рівнем захисту системи.

Результати дослідження можуть стати основою для подальших розробок ESC, які інтегрують передові технологічні рішення в комплексні системи керування, зокрема у сфері робототехніки, енергетики та електромобільного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації ефективної системи ESC для BLDC двигунів необхідно проводити дослідження на рівні як теоретичних аспектів, так і практичного проектування й оптимізації окремих компонентів. У цьому розділі представлено обґрунтовану методологію дослідження, яка охоплює комплексну аналіз компонентної бази, методів управління та їх реалізації в типових структурах ESC. Наочний підхід до вибору ключових елементів і параметрів забезпечує достовірність отриманих результатів і дозволяє відтворити дослідження в реальних умовах.

Особлива увага приділяється основним функціям ESC, а також ключовим компонентам системи, таким як силові транзистори, фільтруючі конденсатори, стабілізатори напруги, блоки керування (MCU) і драйвери ключів. У ході дослідження розглянуто їхні властивості, характеристики, а також вибір оптимальних рішень залежно від специфічних умов і вимог до системи. Усі представлені методи оцінки й аналізу компонентів фокусуються на досягненні максимальної ефективності, точності роботи й надійності сучасних ESC.

Далі детально розглядаються компоненти ESC, їхні властивості, принципи роботи та критерії вибору для різних умов застосування.

До функцій ESC відносять:

- основна функція: ESC служать проміжними пристроями між джерелом живлення (акумулятором або блоком живлення) і двигуном BLDC. Вони регулюють потужність, що подається на двигун, на основі вхідних команд, отриманих від системи керування, наприклад мікроконтролера або пульта дистанційного керування;

- контроль швидкості: ESC регулюють швидкість двигуна за допомогою ШИМ. ШИМ контролює робочий цикл потужності, що подається на обмотки двигуна, ефективно змінюючи напругу та струм, що подаються до двигуна, тим самим змінюючи його швидкість;

- керування напрямком: можливість змінювати напрямок обертання двигуна BLDC за допомогою ESC досягається шляхом зміни послідовності комутацій фаз живлення. BLDC двигуни мають кілька фаз (зазвичай три), і, перемикаючи фази в іншому порядку, можна змінити напрямок обертання двигуна;

- контроль крутного моменту: крутний момент у двигунах BLDC контролюється зміною струму, що протікає через двигун. Регулюючи струм, ESC можуть змінювати вихідний крутний момент двигуна, що особливо важливо в додатках, де потрібне точне керування крутним моментом, наприклад, у робототехніці.

Одним із найбільш поширених додатків для ESC є безпілотні літальні апарати, де контролер польоту працює у зв'язці з одним або декількома ESC для точного керування двигунами BLDC. Контролер польоту передає команди регулювання швидкості кожному ESC, забезпечуючи багатомоторний контроль для стабільного та точного польоту. Використання окремих програмованих ESC для кожного двигуна дозволяє реалізувати складні алгоритми керування, такі як стабілізація та виконання маневрів. Крім того, модернізовані протоколи цифрового зв'язку, такі як DShot, усувають потребу в програмній реалізації ШИМ на рівні контролера, передаючи всю функціональність низькорівневого управління двигунами на ESC.

У сучасних дронівих системах ESC часто взаємодіють із контролером польоту через зворотній зв'язок. ESC із підтримкою телеметрії можуть передавати дані про швидкість обертання двигуна, струм, напругу та температуру назад до контролера польоту в реальному часі. Це дозволяє контролеру польоту приймати більш точні рішення для стабілізації дрона, покращення енергоефективності та запобігання перегріву двигуна чи ESC. Зворотній зв'язок також є важливим у складних

системах керування, де синхронізація двигунів має критичне значення, наприклад, під час точного маневрування чи виконання автоматизованих польотів. Протоколи цифрового зв'язку, такі як DShot або CAN, забезпечують двонаправлену передачу даних між контролером польоту та ESC, відкриваючи можливості для інтеграції телеметрії у замкнуті системи керування [9, с. 35].

ESC – це складна частина апаратного забезпечення, призначена для керування швидкістю, напрямком і крутним моментом електродвигунів, зокрема BLDC двигунів. Структурну схему ESC наведено на рис. 1.

До основних елементів, які складають ESC, відносять:

1. Секція живлення:

– конденсатори: щоб згладити коливання напруги та забезпечити стабільне електроживлення, конденсатори широко використовуються в секції вхідного живлення ESC.

– стабілізатор напруги: цей компонент знижує вхідну напругу від джерела живлення (наприклад, батареї) до рівня, необхідного для логічних схем керування та інших низьковольтних компонентів.

2. Блок мікроконтролера (MCU):

– основний процесор: MCU є мозком ESC, керуючи програмним забезпеченням, яке контролює всі функції ESC, від інтерпретації вхідних сигналів до керування комутацією двигуна та виконання протоколів безпеки.

– пам'ять: MCU містить пам'ять (як ROM, так і RAM) для зберігання програмного забезпечення та даних про час виконання. Деякі ESC також можуть мати енергонезалежну пам'ять для збереження конфігурацій і журналу операційних даних.

3. Драйвери ключів. Драйвер ключів мають вирішальне значення в ESC, оскільки вони виконують роль керування затворами силових тран-

зисторів. Вони підсилюють вихідні сигнали MCU до рівнів, здатних ефективно перемикаати силові транзистори.

4. Польові транзистори. Це перемикачі, які контролюють потужність, що подається на фази двигуна, на основі команд від MCU. Для керування теплом, що виділяється транзисторами, використовуються радіатори та іноді активні системи охолодження (наприклад, вентилятори). Керування температурою має вирішальне значення для запобігання перегріву та забезпечення надійної роботи.

5. Вихідна секція. Підключення двигуна: це стосується фізичних клем або роз'ємів, де підключаються фази двигуна. ESC контролює ці точки, щоб подавати потужність до двигуна в правильній послідовності та кількості.

6. Інтерфейси зв'язку:

– вхідні інтерфейси: вони можуть включати вхідні сигнали ШІМ, аналогові сигнали або цифрові інтерфейси, такі як UART, CAN або I2C, що дозволяє ESC отримувати команди від дистанційного контролера або центральної системи керування.

– входи датчиків: для регуляторів, які використовують комутацію на основі датчиків, можуть бути входи для датчиків ефекту Холла або поворотних енкодерів.

7. Елементи безпеки та діагностики:

– вимірювання струму: багато регуляторів включають шунти або датчики Холла для вимірювання струму в реальному часі, що забезпечує такі функції, як обмеження струму та захист від перевантаження.

– датчики напруги: датчики напруги використовуються для моніторингу вхідної напруги та напруги двигуна для таких функцій, як захист від зниження напруги або стратегії керування на основі напруги.

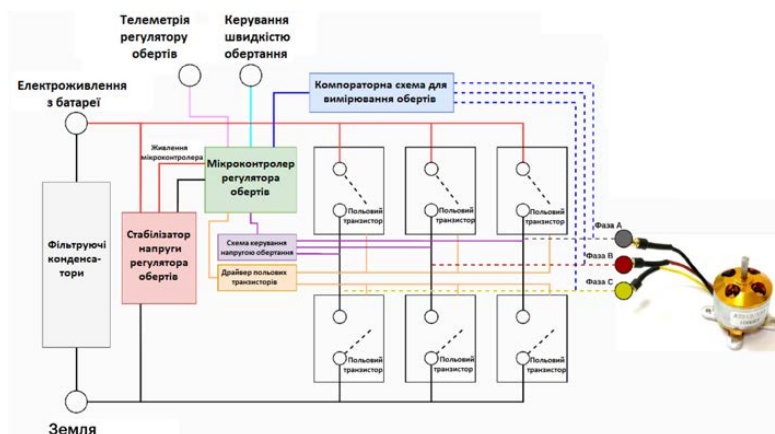


Рис. 1. Структурна схема типового ESC

– датчики температури: термістори або інші датчики температури часто включені для моніторингу температури ключових компонентів, зокрема силових транзисторів і радіаторів.

Силові транзистори. В ESC для BLDC двигунів силові транзистори діють як важливі компоненти, що керують потоком струму до котушок двигуна. Вибір силового транзистора впливає на ефективність, продуктивність, тепловиділення та загальну надійність ESC. Основним типом силових транзисторів, які зазвичай використовуються в ESC є MOSFET транзистори.

Вибір силового транзистора в ECK залежить від кількох факторів, включаючи потрібну ефективність, вартість, рівень потужності та умови навколишнього середовища. MOSFET загалом є універсальним варіантом для широкого спектру застосувань завдяки їхнім характеристикам ефективності та продуктивності. Проте для високопотужних або спеціалізованих застосувань більш відповідними можуть бути транзистори IGBT, GaN або SiC. Кожен тип транзистора має свої переваги, і вибір правильного транзистора включає зважування цих переваг проти специфічних потреб застосування.

MOSFET транзистори. MOSFET є найбільш часто використовуваними транзисторами в ESC для двигунів низької напруги і в багатьох відношеннях є найближчим аналогом ідеального, керованого напругою перемикача серед напівпровідникових пристроїв. Вони відрізняються від інших типів транзисторів у важливих аспектах, що робить їх особливо придатними для застосувань з низькою напругою. Зокрема, вони не мають напруги насичення; натомість їх моделюють як такі, що мають сталий опір (лінійну залежність струму від напруги) коли вони повністю відкриті. Це може видаватися не ідеальним, але в застосуваннях з низькою напругою, де напруга насичення BJT чи IGBT транзисторів могла б складати значну частину загальної напруги системи, лінійна крива I-V MOSFET є більш бажаною. Багато сучасних MOSFET мають надзвичайно низькі значення опору у відкритому стані.

Існують два різні типи MOSFET: N-канальні та P-канальні. Між силовими MOSFET та сигнальними MOSFET також існують відмінності. Більшість контролерів двигунів використовують лише N-канальні силові MOSFET.

Як і будь-який силовий транзистор, функція MOSFET полягає у перетворенні сигналу низької потужності в посилений вихід високої потужності. Сигнал низької потужності подається на

затвор у вигляді напруги. Цю напругу, яка відома як напруга затвора, вимірюють відносно джерела. Це стає важливим для управління MOSFETами, у яких джерело не під'єднане до найнижчої системної напруги. У випадку з MOSFET, опір між стоком і джерелом контролюється напругою між затвором і джерелом. Коли напруга на затворі нижча за певне порогове значення або від'ємна, опір між стоком та джерелом дуже високий і тече дуже малий струм. Вище цього порогового значення напруги – опір між стоком та джерелом зменшується зі збільшенням напруги на затворі. Існує нижня границя опору, яка для силового MOSFET зазвичай досягається, коли напруга на затворі становить 8-10V або більше.

IGBT транзистори. IGBT поєднують легкість управління MOSFET з високою струмовою здатністю BJT транзисторів. Вони переважно використовуються там, де необхідні висока потужність та ефективність.

Перевагою IGBT транзисторів є більші напруга та струмові можливості порівняно з MOSFET, що робить їх придатними для застосування у високопотужних установках. Вони можуть керувати великими індуктивними навантаженнями та менш чутливі до перевантаження по струму. Використовуються у високопотужних установках, таких як електромобілі, великі дрони та промислові приводи двигунів.

BJT транзистори. BJT керуються струмом на базовому терміналі, а не напругою затворі (як у MOSFET), тобто вони зазвичай потребують більшої вхідної потужності для керування.

До переваг можна віднести надійність і, як правило, меншу ціну, ніж MOSFET і IGBT. Вони досить добре справляються із застосуваннями швидкого перемикачання, але більш схильні до виділення тепла. Застосовуються зазвичай в старих або менш складних конструкціях ESC, або там, де вартість є серйозною проблемою.

GaN транзистори. GaN транзистори є відносно новими у сфері силової електроніки і відомі своїми високими показниками ефективності та швидкості перемикачання. Вони забезпечують нижчий опір у ввімкненому стані та більшу швидкість перемикачання порівняно з традиційними кремнієвими транзисторами.

Перевагою є вища ефективність, швидкість перемикачання та кращі теплові характеристики. Вони також потенційно зменшують розмір та вагу ESC завдяки меншим радіаторам та іншим допоміжним компонентам. Застосовуються у високопродуктивних електромобілях, аерокосмічній

галузі та застосунках, де ефективність та вага є критичними.

SiC транзистори. Транзистори SiC також набувають популярності завдяки своїй здатності краще справлятися з високими температурами та високими напругами порівняно з традиційними кремнієвими транзисторами.

Характеризуються відмінною теплопровідністю, високою напругою пробою та здатністю працювати при високих температурах без погіршення ефективності. Застосовуються для високопродуктивних застосувань, де необхідні надійність і висока температурна стійкість.

Для зручного порівняння основних типів транзисторів, розглянутих у цьому розділі, їхні характеристики, переваги, недоліки та області застосування викладено у табл. 1. Такий підхід дозволяє швидко оцінити, який тип транзистора найкраще підходить для конкретного завдання, враховуючи вимоги до ефективності, напруги, струму та умов експлуатації.

Фільтруючі конденсатори. Фільтруючі конденсатори є найважливішим пасивним компонентом у ESC двигуна. Вони надають і поглинають високі струми до і від інвертора, захищаючи решту контролера від високочастотних перемикальних перехідних процесів. Вони також компенсують індуктивність кабелю батареї (або дже-

рела живлення), поглинаючи енергію, яка інакше створювала б шкідливі стрибки напруги, коли струм раптово вимикається [10, с. 82].

Важливо, щоб конденсатор був фізично розташований якомога ближче до MOSFET транзисторів інвертора, щоб опір і індуктивність лінії між конденсатором і MOSFET транзисторами були дуже низькими.

Фільтруючий конденсатор зазвичай є електролітичним конденсатором або групою паралельних електролітичних конденсаторів. У контролерах із високим струмом він може займати стільки ж, а то й більше, ніж самі MOSFET. Він також може розсіювати стільки ж або більше тепла, що означає, що він значно сприяє загальній ефективності контролера.

В ESC найчастіше використовуються наступні типи конденсаторів: електролітичні та керамічні.

Електролітичні конденсатори характеризуються великими значеннями ємності, поляризовані. Зазвичай використовуються для накопичення енергії в секції живлення. Вони допомагають згладити напругу, що подається на ESC, забезпечуючи резервуар енергії для обробки пікових вимог до потужності та допомагають фільтрувати низькочастотні пульсації.

Керамічні конденсатори характеризуються меншими значеннями ємності порівняно з електро-

Таблиця 1

Порівняння основних типів транзисторів, використовуваних у ESC

Тип транзистора	Основні характеристики	Переваги	Недоліки	Застосування
MOSFET	– низький опір в увімкненому стані (<10мОм) – простий контроль напругою затвора	– висока ефективність – швидке перемикання – низьке тепловиділення	обмежена стійкість до перенапруги	ESC для низьковольтних і середньовольтних систем (дрони)
IGBT	– високий струм (>40А) – висока напруга пробою (>600 В) – насичення напруги	– працює краще при високих напругах і струмах – управління великими індуктивними навантаженнями	більш повільне перемикання	високопотужні ESC (електромобілі, промислові приводи)
BJT	– управління струмом бази – середня напруга насичення	– дешевизна – простота дизайну	– більше тепловиділення – складність управління	старі конструкції ESC, бюджетні рішення
GaN	– висока швидкість перемикання – наднизький опір в увімкненому стані (<1мОм)	– висока ефективність – маленькі розміри – покращена термічна характеристика	– висока вартість – нова технологія	високопродуктивні дрони, космічна галузь
SiC	– висока напруга пробою (>1200В) – відмінна теплопровідність – стійкість до високих температур	– висока температурна стійкість – ефективність при високих напругах	– висока вартість – складність конструкції	системи з високою потужністю або екстремальними умовами

літичними конденсаторами, неполяризовані, відмінна частотна характеристика. Керамічні конденсатори, які часто використовуються разом з електролітичними конденсаторами, ефективно фільтрують високочастотний шум від джерела живлення. Вони допомагають покращити загальну стабільність і реакцію ESC.

Функції конденсаторів в ESC:

– Згладжування напруги: конденсатори діють як буфер або резервуар заряду. Вони заряджаються, коли напруга від джерела живлення (наприклад, батарея) зростає, і вивільняють енергію, коли напруга падає. Цей ефект згладжування є вирішальним для ESC, оскільки він забезпечує більш стабільну вихідну напругу, запобігаючи збоєм у роботі двигуна.

– Фільтрація шуму: ESC чутливі до електричного шуму, як від зовнішніх джерел, так і від перемикачів транзисторів у самому ESC. Конденсатори допомагають відфільтрувати цей шум, особливо високочастотні компоненти, гарантуючи, що мікроконтролер та інші чутливі компоненти працюють у стабільному електричному середовищі.

– Зменшення стрибків напруги: під час швидкого перемикачів, особливо в системах, що керують індуктивними навантаженнями, такими як двигуни, можуть виникати стрибки напруги. Ці стрибки можуть потенційно пошкодити компоненти ESC. Конденсатори поглинають і розсіюють ці стрибки, захищаючи електроніку ESC.

– Покращення реакції на зміни навантаження: двигуни BLDC можуть швидко змінювати енергоспоживання залежно від умов навантаження. Конденсатори допомагають забезпечити під час цих перехідних змін, забезпечуючи постійну роботу двигуна та запобігаючи перебоєм у роботі ESC.

Параметри фільтруючого конденсатора мають вирішальне значення для конструкції ESC. Серед основних міркувань для визначення параметрів можна виділити наступні:

– Номінальна напруга: конденсатори в ESC повинні мати номінал напруги, вищий за максимальну робочу напругу системи, щоб справлятися з піковими напругами без пошкоджень.

– Температурний діапазон: діапазон робочих температур конденсатора повинен відповідати або перевищувати умови навколишнього середовища та внутрішні температури, очікувані в ESC під час роботи.

– Еквівалентний послідовний опір: нижчий опір бажаний у конденсаторах, які використовуються в ESC, оскільки це покращує їхню здатність

забезпечувати швидкі спалахи енергії та зменшувати тепло, що виділяється самим конденсатором.

– Фізичний розмір і довговічність: з огляду на те, що ESC можна використовувати в різних фізичних і динамічних середовищах (наприклад, дрони або автомобілі з радіоуправлінням), конденсатори також повинні бути фізично міцними та достатньо компактними, щоб відповідати конструктивним обмеженням ESC.

Додаткові характеристики фільтруючих конденсаторів:

1. Залежність ємності від температури: Температурна стабільність конденсаторів є критично важливою для ESC, оскільки температура всередині пристрою може значно змінюватися. В умовах високої потужності або екстремальних температур, ємність може знижуватися, що впливає на:

– Згладжування напруги, що може призводити до нестабільності живлення.

– Фільтрацію шуму, де температура може вплинути на ефективність роботи конденсатора. Конденсатори з високою стабільністю зберігають свої властивості навіть у широкому діапазоні температур, що робить їх придатними для застосування в дронах та інших пристроях, які працюють у екстремальних умовах.

2. Номінальне відхилення ємності:

Виробничі допуски на відхилення ємності часто впливають на точність роботи ESC. У критичних місцях, таких як фільтрування напруги, навіть невелике відхилення може спричинити:

– Невідповідність проектних параметрів, що впливає на стабільність системи.

– Непередбачувані проблеми в роботі під навантаженням. Використання конденсаторів із малими допусками ($\pm 10\%$ або $\pm 5\%$) у ключових місцях контролера дозволяє забезпечити максимальну точність управління і запобігти проблемам у роботі.

3. Абсорбція:

Діелектрична абсорбція конденсаторів визначає швидкість їх відновлення після розряду. У ESC, де конденсатор часто швидко заряджається і розряджається, висока абсорбція може призводити до:

– Затримки в передачі енергії, що знижує ефективність переключення транзисторів.

– Високочастотних шумів або нестабільності напруги при навантаженні. Для схем із високошвидкісним перемикачів найкращими варіантами є керамічні конденсатори типу або поліпропіленові плівкові конденсатори, які мають низький рівень абсорбції.

Стабілізатор (регулятор) напруги. Стабілізатор напруги в секції вхідного живлення ESC має вирішальне значення для забезпечення того, щоб різні компоненти ESC, особливо чутлива електроніка, як-от мікроконтролери та датчики, отримували стабільні та відповідні рівні напруги для роботи.

Роль стабілізатора напруги в ESC:

- Постійна напруга живлення: стабілізує вхідну напругу, компенсуючи коливання в акумуляторі чи джерелі живлення. Це має вирішальне значення для запобігання несправностям або пошкодженням ESC та підключених компонентів.

- Енергоефективність: ефективне регулювання напруги забезпечує мінімальні втрати потужності у вигляді тепла, підвищуючи загальну ефективність ESC. Це особливо важливо для систем, що працюють від акумуляторів, таких як дрони чи електромобілі, де енергоефективність безпосередньо впливає на продуктивність і час роботи.

- Захист пристрою: стабілізатори часто включають такі функції захисту, як захист від перегріву, захист від перевантаження по струму та захист від короткого замикання, які захищають ESC та двигун від електричних аномалій.

Можна виділити два наступні види регуляторів напруги, що застосовуються у ESC:

- Лінійні регулятори напруги: забезпечують простий спосіб регулювання напруги шляхом розсіювання надлишкової напруги у вигляді тепла. Перевагами є проста конструкція, низький рівень шуму та дуже чиста вихідна напруга, що є перевагою для чутливих до шуму компонентів, таких як аналогові датчики та точна електроніка. Водночас характеризуються низькою ефективністю для великих різниць між вхідною та вихідною напругами, оскільки надлишкова потужність витрачається у вигляді тепла, що також може потребувати додаткового тепловідведення.

- Імпульсні регулятори напруги: включають понижувальні перетворювачі, підвищувальні перетворювачі і понижувально-підвищувальні перетворювачі (здатні як підвищувати, так і знижувати напругу). Вони використовують котушки індуктивності, діоди, конденсатори та перемикачі для ефективного перетворення вхідної напруги на необхідну нижчу або вищу вихідну напругу. Характеризуються високою ефективністю, навіть при значній різниці напруги між входом і виходом. Вони можуть витримувати більші струмові навантаження і, як правило, більш ефективні в різних умовах експлуатації. Водночас мають складнішу конструкцію та можуть створювати електричні

перешкоди, які можуть потребувати додаткової фільтрації.

Міркування щодо визначення параметрів регуляторів напруги:

- Вимоги до вхідної та вихідної напруги: регулятор повинен бути здатний обробляти діапазон вхідної напруги від джерела живлення та забезпечувати стабільну вихідну напругу відповідно до вимог схем ESC.

- Вимоги до потужності: регулятор повинен забезпечити достатній струм для ESC разом із будь-якими додатковими периферійними пристроями чи системами, що живляться через ESC.

- Ефективність: особливо важливо для пристроїв, що живляться від батареї, щоб максимізувати термін служби батареї та мінімізувати виділення тепла.

- Тепловий режим: міркування щодо розсіювання тепла, включаючи використання радіаторів або термопрокладок, особливо для лінійних регуляторів або потужних додатків.

- Особливості захисту: такі функції, як захист від перевантаження по струму, термовідключення та блокування від низької напруги, є важливими для надійності та безпеки.

- Розмір і інтеграція: компактні та інтегровані модулі регуляторів можуть бути корисними для застосувань з обмеженим простором, таких як невеликі дрони або портативні електронні регулятори швидкості.

Блок мікроконтролера (MCU). Блок мікроконтролера (MCU) утворює серце ESC, керуючи складними функціями, необхідними для точного керування підключеним BLDC електродвигуном. MCU відповідає за виконання вбудованого програмного забезпечення (прошивка), яке контролює всі аспекти роботи ESC, від інтерпретації вхідних сигналів до керування двигуном через відповідні сигнали керування.

Основні функції MCU в ESC:

- Інтерпретація сигналів: MCU обробляє вхідні сигнали з різних джерел керування, таких як дистанційні контролери, датчики або контролери вищого рівня. Ці сигнали можуть варіюватися від простих ШІМ до більш складних протоколів, таких як CAN або UART, що вказує на бажану швидкість, напрямок і іноді крутий момент.

- Контроль комутації двигуна: у BLDC двигунах комутація – це процес перемикання живлення фаз двигуна в правильній послідовності для генерування безперервного обертання. MCU контролює час і послідовність цих перемикань, як правило, використовуючи вхідні дані від датчиків

Холла або шляхом вимірювання зворотної ЕРС для роботи без датчиків.

– Широтно-імпульсна модуляція (ШИМ): MCU генерує сигнали ШИМ для керування затворами MOSFET транзисторів або інших силових транзисторів у каскаді живлення ESC. Ця модуляція регулює напругу та струм, що подаються на фази двигуна, регулюючи швидкість і крутний момент двигуна.

– Обробка зворотного зв'язку та керування замкнутим циклом: Удосконалені ESC використовують зворотний зв'язок від двигуна та інших датчиків для досягнення точного контролю. MCU обробляє цей зворотний зв'язок, щоб регулювати вихідні сигнали керування в реальному часі, використовуючи алгоритми керування, такі як ПІД-регулятори, щоб підтримувати бажану продуктивність двигуна, незважаючи на коливання навантаження та перешкоди.

– Функції безпеки та діагностики: MCU контролює різні параметри, такі як струм, напруга та температура, впроваджуючи протоколи безпеки, щоб запобігти пошкодженню через такі умови, як перевантаження по струму, перегрів та аномалії напруги.

Ключові характеристики MCU в ESC:

– Можливість роботи в реальному часі: MCU для ESC повинні працювати в режимі реального часу, вирішуючи завдання із суворими часовими обмеженнями, щоб забезпечити плавне та точне керування двигуном.

– Аналогові та цифрові входи/виходи: MCU повинні мати достатню кількість цифрових виходів для керування транзисторами та входів для отримання керуючих сигналів. Аналогові входи також важливі для зчитування напруги, струму та інших сенсорних даних.

– Обчислювальна потужність: достатня обчислювальна потужність і пам'ять мають вирішальне значення, особливо для виконання складних алгоритмів керування та виконання кількох завдань одночасно.

– Можливості підключення: підтримка різних протоколів зв'язку, таких як I2C, SPI, UART, CAN та інші, що забезпечує надійний і гнучкий зв'язок з іншими компонентами та системами.

Вибір MCU має бути зроблений ретельно, щоб відповідати конкретним характеристикам та умовам, забезпечуючи надійне керування двигуном:

– Швидкість процесора та пам'ять: MCU повинен мати адекватну тактову частоту та пам'ять (як оперативну, так і флеш-пам'ять), щоб відповідати вимогам мікропрограми, включаючи здатність виконувати алгоритми керування без затримок.

– Підтримка периферії: доступність і продуктивність вбудованих периферійних пристроїв, таких як таймери, АЦП (аналогово-цифрові перетворювачі) та комунікаційних інтерфейсів, які мають вирішальне значення для керування двигуном та підключенні.

– Енергоспоживання та ефективність: особливо важливо в додатках із живленням від батареї, де енергоефективність може безпосередньо впливати на час роботи та продуктивність.

– Стійкість до навколишнього середовища: залежно від застосування MCU має бути здатний працювати в потенційних умовах навколишнього середовища, з якими він зіткнеться, включаючи екстремальні температури та вібрацію.

– Інструменти розробки та підтримки: наявність інструментів розробки, бібліотек і підтримка від виробника або спільноти може значно вплинути на час розробки та простоту програмування прошивки.

Хоча виробники часто не розкривають детальну інформацію про MCU, інтегровані в ESC, можна зробити висновок про ймовірні типи MCU на основі сумісності з прошивками, галузевих норм та схожих конструкцій ESC. Наприклад, ESC із підтримкою прошивки AM32, такі як Tekko32 F4 45A ESC, зазвичай використовують високопродуктивні MCU серії STM32F4, які побудовані на базі ядра ARM Cortex-M4 і забезпечують підтримку передових алгоритмів керування двигунами, таких як DShot1200 із частотою до 32kHz [11]. У свою чергу, ESC, такі як ZTW Beatles G2 30A ESC, описуються як такі, що використовують високопродуктивні 32-бітні мікропроцесори із потужними обчислювальними можливостями та швидкістю обробки [12], що свідчить про ймовірне використання MCU серій STM32F0 або STM32F3 для виконання завдань керування двигунами. Виходячи з типів прошивок (наприклад, BLHeli_32, AM32) і тенденцій у проектуванні ESC, більшість високопродуктивних ESC використовують 32-бітні MCU на базі ARM Cortex-M, такі як пристрої серії STM32, тоді як економічно вигідніші або простіші конструкції ESC часто використовують 8-бітні MCU, такі як ATmega або Silabs EFM8.

У сучасних ESC важливу роль відіграє вибір прошивки як ключового фактору в проектуванні та сумісності. Саме тип прошивки (BLHeli, SimonK, AM32 та інші), а також його можливості керування двигунами визначають, який саме MCU буде інтегровано всередині ESC [13, с. 123]. В табл. 2 наведено відповідність прошивок та типів MCU.

Таблиця 2

Зв'язок між прошивками та MCU в ESC

Прошивка	Типові MCU
BLHeli	ATMEL
SimonK	ATMEL
BLHeli_S	SILABS BusyBee BB1 & BB2
BLHeli_32	ARM STM32 F0, F3, L4
AM32	ARM STM32 F0, F3, L4
BlueJay	SILABS BusyBee
KISS	ARM STM32 F0

Тип MCU у ESC зазвичай залежить від призначення пристрою. Наприклад, гоночні дрони потребують високопродуктивних STM32 MCU серій F3 або F4, які забезпечують швидкість протоколів і низьку затримку, необхідну для точного управління. У той час як недорогі ESC можуть використовувати 8-бітні ATmega MCU, промислові або відкриті системи, такі як AM32, часто вимагають потужних ARM Cortex-M MCU. В табл. 3 наведено типи MCU в ESC в залежності від призначення.

Драйвери ключів. Драйвери ключів в ESC є компонентами, які взаємодіють між блоком мікроконтролера (MCU) і силовими транзисторами, зазвичай MOSFET або IGBT. Основна роль ключів полягає в посиленні керуючих сигналів від MCU до рівнів, які підходять для ефективного та надійного перемикавання силових транзисторів.

Основні функції драйверів ключів в ESC:

- Зміна рівня: перетворюють логічні сигнали низької напруги від MCU на більш високі рівні напруги, необхідні для повного ввімкнення або вимкнення силових транзисторів. Це гарантує, що транзистори працюють у своєму оптимальному діапазоні ефективності, мінімізуючи втрати потужності та виділення тепла.

- Захист: драйвери ключів можуть надавати різні захисні функції для підвищення надійності ESC. Це включає в себе блокування низької

напруги, яке запобігає вмикаю сирових транзисторів, якщо напруга затвора недостатня, і виявлення десатурації, яке захищає від ситуацій надлишкового струму шляхом виявлення аномальної напруги на транзисторі.

- Контроль сили приводу: належне керування силою приводу допомагає керувати характеристиками перемикавання транзисторів, балансує між швидшим часом перемикавання (що зменшує втрати під час перемикавання) та пом'якшенням таких проблем, як електромагнітні перешкоди і стрибки напруги.

- Ізоляція: у системах більшої потужності, особливо там, де використовуються IGBT, драйвери затворів можуть також забезпечувати електричну ізоляцію між ланцюгами керування (низька напруга) і ланцюгами живлення (висока напруга). Це критично важливо для безпеки та запобігання перешкодам від високовольтних перехідних процесів для MCU та іншої чутливої електроніки.

- Управління перемиканням ключів: щоб запобігти ситуації, коли транзистори високого та низького боку включені одночасно, драйвери ключів ретельно керують коротким періодом під час переходів перемикавання, коли всі силові транзистори вимкнені.

Міркування щодо вибору драйверів ключів:

- Сумісність з обраним силовим транзистором: важливо переконатися, що драйвер ключів може виконувати вимоги до заряду затвора вибраних силових транзисторів на бажаних швидкостях перемикавання.

- Робоча напруга та струм: драйвер повинен підтримувати рівні напруги та вимоги до струму застосування ESC, забезпечуючи стабільну роботу в усьому робочому діапазоні.

- Тепловиділення: потрібно враховувати розсіювану потужність драйвера ключів для визначення заходів з охолодження.

Таблиця 3

Типові MCU в ESC в залежності від призначення

Тип ESC	Типовий MCU	Причини вибору MCU	Призначення ESC
ESC для гоночних дронів	STM32F3/F4	Висока швидкість протоколів DShot1200, низька затримка	FPV-дрони для перегонів або фристайлу
ESC початкового рівня	ATmega 8-біт	Економічність, просте керування двигунами	Недорогі споживчі дрони
ESC для промислових дронів	Infineon XMC1000 серії	Інтегроване керування моторами, стійкість до високих напруг	Великі промислові BLDC двигуни
ESC на базі AM32	STM32F0/F3 ARM Cortex-M	Висока точність обчислень, відкрите програмне забезпечення	Високопродуктивні ESC із відкритим кодом

– Особливості інтеграції: драйвери воріт із інтегрованими функціями, такими як визначення струму або діагностичні функції, можуть спростити конструкцію ESC і покращити його загальну функціональність.

– Захисні властивості: такі функції, як блокування низької напруги, теплове відключення та захист від високого струму, важливі для забезпечення довгострокової надійності та безпеки ESC.

Основні види драйверів ключів в ESC:

– High-Side і Low-Side драйвери: транзистор, підключений до позитивної шини напруги, називається перемикачем High-Side, а той, що підключений до землі, називається перемикачем Low-Side. High-Side драйвери призначені для керування затвором транзистора високої сторони в конфігурації напівмосту. Low-Side драйвери керують затворами транзисторів низької сторони в напівмості.

– Half-Bridge драйвери: об'єднують драйвери High-Side і Low-Side в єдиний пакет. Вони часто включають функції для керування мертвим часом між перемиканням транзисторів High-Side і Low-Side, щоб запобігти прострілу.

– Трьохфазні драйвери: спеціально розроблені для трифазних двигунів, ці драйвери можуть керувати до шести транзисторів у типовій конфігурації трифазного інвертора.

– Інтегровані мікросхеми драйверів: пропонують повне системне рішення, що включає в себе як функцію управління затвором, так і додаткові функції, такі як визначення струму, інтерфейси мікроконтролерів і розширені функції захисту від перевантаження по струму, перегріву та зниженої напруги.

Висновки. ESC є невід'ємною частиною сучасних систем управління BLDC. Незважаючи

на різноманітність застосувань – від компактних дронів і радіокерованих моделей до промислових установок та електротранспорту – основна структурна схема ESC зберігається незмінною незалежно від виробника чи сфери використання. Така уніфікація тісно пов'язана з використанням однакових компонентів, функцій, і принципів роботи, які становлять фундамент для керування BLDC двигунами.

У статті розглянуто структурну схему ESC і проаналізовано ключові компоненти, які включають:

– силові транзистори (MOSFET, IGBT, GaN, SiC), що відповідають за управління енергією, що подається до двигуна;

– фільтруючі конденсатори, стабілізатори напруги, блок мікроконтролера (MCU), драйвери ключів, які забезпечують ефективність, точність і надійність роботи ESC;

– інтерфейси зворотного зв'язку, що дозволяють адаптацію ESC до різних систем управління.

У рамках роботи виконано порівняння різних типів силових транзисторів, таких як MOSFET, IGBT, BJT, GaN і SiC. Показано переваги та недоліки кожного типу залежно від умов використання та технічних вимог. Також наведено приклади практичного застосування мікроконтролерів у реальних моделях ESC, що дозволяє визначитися з їх вибором для конкретних завдань.

Таким чином, наведений аналіз підтверджує, що підхід до проектування ESC характеризується високим рівнем стандартизації, що дозволяє спрощувати інтеграцію систем у різних областях. Результати роботи можуть слугувати орієнтиром для подальших досліджень і розробок, спрямованих на оптимізацію ESC для застосування в нових, більш вимогливих галузях.

Список літератури:

1. The MathWorks, Inc. Introduction to Brushless DC Motor Control. URL: <https://www.mathworks.com/campaigns/offers/next/introduction-to-brushless-dc-motor-control.html> (дата звернення: 25.09.2025).
2. Matsui N. Sensorless PM brushless DC motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996. №43(2). pp. 300–308. DOI: doi.org/10.1109/41.491354
3. Shrutika C., Matani S., Chaudhuri S., Gupta A., Gupta S., Singh N. Back-EMF estimation based sensorless control of Brushless DC motor. 2021 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE). 2021. DOI: doi.org/10.1109/ICPEE50452.2021.9358657
4. Lee W., Han D., Sarlioglu B. GaN-based single phase brushless DC motor drive for high-speed applications. *40th Annual Conference of the IEEE*. 2014. DOI: doi.org/10.1109/IECON.2014.7048700
5. Östling M., Zetterling C.-M., Ghandi R. SiC power devices – Present status, applications and future perspective. 2011 Ieee 23rd international symposium on power semiconductor devices and ics (ISPSD). 2011. DOI: doi.org/10.1109/ISPSD.2011.5890778
6. Lumbreras D., Zaragoza J., Berbel N., Mon J., Galvez E., Collado A. Efficiency Comparison of Power Converters Based on SiC and GaN Semiconductors at High Switching Frequencies. 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2021. DOI: doi.org/10.1109/ISIE45552.2021.9576446
7. Wu R., Chen Y., Ke H. STM32 microcontroller-based closed-loop speed control drive system design for FOC motors. 2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC). 2022. DOI: doi.org/10.1109/IPEC54454.2022.9777600

8. Awaar V., Jampally N., Gali H., Simhadri R Real-Time BLDC Motor Control and Characterization Using TMS320F28069M with CCS and GUI. 2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT). 2022. DOI: doi.org/10.1109/SeFeT55524.2022.9908662

9. Малий О.Ю., Поспєєва, Фурманова Н.І., Онищенко В.Ф., Залужний М.Ю., Іванов В.В. Методика передпроектного вибору компонентів FPV квадрокоптерного типу за заданими значеннями тяги, швидкості та часу польоту. *Електротехніка та електроенергетика*. 2024. №1. С. 35–49. DOI:doi.org/10.15588/1607-6761-2024-1-4

10. Colton S. Design and prototyping methods for brushless motors and motor control. *Massachusetts Institute of Technology*. 2010. pp. 82–85

11. Holybro Store. Tekko32 F4 45A ESC (AM32) datasheet. URL: <https://holybro.com/collections/autopilot-peripherals/products/tekko32-f4-45a-esc> (дата звернення: 25.09.2025).

12. ZTW ESC. ZTW Beatles G2 30A ESC 2-4S SBEC For RC Airplane Fixed-wing datasheet. URL: <https://ztwesc.com/products/ztw-beatles-g2-30a-2-4s-sbec-for-rc-airplane-fixed-wing> (дата звернення: 25.09.2025).

13. Машковський Р.А., Козлов В.В. Порівняльний аналіз прошивок ESC регуляторів для безколекторних двигунів постійного струму у мультикоптерах. Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: XII Міжнародна науково-практична конференція, 10-12 грудня 2024 р.: тези доп. / Редкол.: Д.М. Піза, О.Ю. Малий Електрон. дані. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024. С. 123–127. 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM). назва з тит. екрана.

Mashkovskiy R.A., Malyi O.Yu. OVERVIEW OF TECHNICAL SOLUTIONS AND COMPONENTS FOR THE IMPLEMENTATION OF ELECTRONIC SPEED CONTROLLERS (ESC) FOR BRUSHLESS DC MOTORS (BLDC)

The study aims to analyze and develop recommendations for designing and implementing electronic speed controllers (ESC) for brushless direct current (BLDC) motors. The study takes into account modern technological solutions, including power transistors, gate drivers, microcontrollers (MCU), and filtering capacitors. The research relies on analytical and experimental approaches to analyze the component base of ESCs, their functional properties, and their adaptation to various operating conditions. The methods involve a comparison of the characteristics of power transistors (MOSFET, IGBT, GaN, SiC), an analysis of MCU compatibility with firmware (BLHeli, AM32, KISS), and an evaluation of the energy efficiency of ESCs for various applications, such as drones, industrial devices, and electric vehicles. The study conducted a comprehensive analysis of the ESC structural design, key components, and their impact on the efficiency of BLDC motor control. It has explored the features of power transistors (MOSFET, BJT, GaN, SiC) and filtering capacitors, including temperature stability, capacity tolerances, and absorption, which are critically important for the reliable operation of the system. The compatibility between firmware types (BLHeli, AM32, KISS) and microcontrollers has been systematized, and their application in various types of ESCs is described, depending on use cases such as drones, robotics, and industrial systems. Methods for component selection for ESCs in multisystem applications have been refined. The article demonstrates a systematic approach to implementing modern technologies in the design of ESCs for BLDC motors. The compatibility of MCUs with firmware (BLHeli_S, BLHeli_32, AM32) has been analyzed and generalized to enable optimization for practical applications. Additionally, methods for evaluating components have been proposed. The results contribute to existing scientific knowledge by offering a more comprehensive approach to the control of BLDC motors. The study results are useful for the development of next-generation ESCs capable of ensuring high efficiency, accuracy, and reliability. The findings can be applied to motor control solutions for drones, robotics, electric vehicles, aerospace systems, and industrial systems. Recommendations are provided to ESC component manufacturers regarding the adaptation of modern communication protocols (DShot, CAN) and automated diagnostic functions for integrating telemetry into multi-motor systems.

Key words: electronic speed controller, ESC, brushless motor, BLDC motor, power transistors, microcontroller, MCU, firmware, filtering capacitors.

Дата надходження статті: 25.09.2025

Дата прийняття статті: 16.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025