

*М.А. КОВАЛЕНКО, І.В. ТКАЧУК, І.Я. КОВАЛЕНКО, С.О. ЖУК, О.О. КРИШНЬОВ, О.С. ПЕРЕПЕЛИЦЯ, Є.О. ТІТОВ*

## ОГЛЯД ДВИГУНІВ ДЛЯ ВАЖКИХ ДРОНІВ

Стаття присвячена огляду двигунів, використовуваних у важких дронах. Розглядаються основні типи двигунів, їх принципи роботи, переваги та недоліки. В статті досліджується широкий спектр електродвигунів, таких як безщіткові DC (безколекторні) двигуни, що є основними компонентами у сучасних квадрокоптерах. Також розглядаються різновиди двигунів, їхні технічні характеристики, а також застосування в конкретних моделях квадрокоптерів. Ця стаття допоможе краще зрозуміти особливості різних типів двигунів та їх вплив на функціональність і продуктивність квадрокоптерів.

**Ключові слова:** квадрокоптери, двигуни, безщіткові DC двигуни, електродвигуни, технічні характеристики, принципи роботи, відмінності типів двигунів, ефективність, переваги та недоліки, застосування в аеромоделюванні.

*М.А. KOVALENKO, I.V. TKACHUK, I.Y. KOVALENKO, S.O. ZHUK, O.O. KRYSHNOV, O.S. PEREPELTSYA, E.O. TITOV*

## OVERVIEW OF MOTORS FOR HEAVY DRONES

The article is devoted to an overview of engines used in heavy drones. The main types of engines, their principles of operation, advantages and disadvantages are considered. The article examines a wide range of electric motors, such as brushless DC (collectorless) motors, which are the main components in modern quadcopters. Types of engines, their technical characteristics, as well as their use in specific models of quadcopters are also considered. This article will help you better understand the specifics of different types of motors and how they affect quadcopter functionality and performance.

**Keywords:** quadcopters, motors, brushless DC motors, electric motors, technical characteristics, principles of operation, differences in types of motors, efficiency, advantages and disadvantages, application in aeromodelling.

**Вступ.** В останні роки невпинно зростає зацікавленість у використанні безпілотних літальних апаратів (БЛА) у різних сферах життя. Однією з найбільш перспективних галузей застосування є сфера квадрокоптерів. Квадрокоптери, здатні до маневрування у повітрі за допомогою чотирьох гвинтів, використовуються від розваг і фотозйомки до пошукових та рятувальних операцій, а також у комерційних і промислових цілях [1].

Ефективне функціонування квадрокоптера залежить від його двигунів, які забезпечують необхідний тяговий потік для забезпечення стабільності та керованості. У зв'язку зі зростанням популярності цієї технології, виникає все більше питань щодо вибору оптимального типу двигуна для конкретних завдань та вимог.

У даній роботі розглянуто різноманітні типи двигунів, їх переваги та недоліки, а також важливі аспекти вибору та використання двигунів у квадрокоптерах [2]. Розглянуто такі аспекти, як потужність, ефективність, вага, розміри та інші фактори, що впливають на продуктивність та функціональність квадрокоптера.

Досліджено найпопулярніші типи двигунів, такі як бесколекторні (безщіткові) електродвигуни, колекторні (щіткові) електродвигуни, термічні двигуни, а також їх застосування та особливості у контексті квадрокоптерів.

Дана стаття стане корисним джерелом інформації для тих, хто цікавиться розвитком та використанням квадрокоптерів у різних галузях, а також для тих, хто планує вибрати оптимальний двигун для своєї багатороторної платформи [3].

**Актуальність** теми визначається широким застосуванням квадрокоптерів у різних сферах, таких як аерофотозйомка, доставка, дослідження та багато інших. Для квадрокоптерів важливо мати ефективні, потужні та надійні двигуни, щоб забезпечити стабільну роботу та високу продуктивність у різних умовах експлуатації

Отже, актуальним науковим завданням, яке має важливе практичне значення, є дослідження різних типів

двигунів для квадрокоптерів та їх порівняльний аналіз, який має велике значення для розробки та вдосконалення цих багатофункціональних пристроїв.

**Метою роботи** є проведення огляду різних типів двигунів, які використовуються для квадрокоптерів, з метою з'ясування їхніх особливостей, переваг та недоліків. Дослідження спрямоване на виявлення оптимального вибору двигуна залежно від конкретних вимог і умов експлуатації квадрокоптера.

**Об'єкт дослідження.** В даній роботі об'єктом дослідження є різноманітні типи двигунів, використовуваних для квадрокоптерів, включаючи безщіткові DC двигуни, щіткові DC двигуни, бесколекторні DC двигуни та інші. 3D модель конструкторки двигуна квадрокоптера представлена на рис. 1.

**Двигун БПЛА** для підйому великих вантажів відноситься до силової системи, яка використовується в безпілотних літальних апаратах, призначених для підйому важкого корисного вантажу [4]. Ці двигуни, як правило, потужніші та міцніші порівняно з тими, що використовуються в стандартних безпілотних літальних апаратах, оскільки вони повинні забезпечувати достатню тягу, щоб переносити значну вагу. Безпілотники широко використовуються в різних галузях промисловості, таких як сільське господарство, будівництво, кінематограф і логістика, де здатність перевозити значні корисні вантажі має вирішальне значення.

Потужні БПЛА зазвичай оснащені потужними безщітковими двигунами, розробленими для забезпечення значної тяги та вантажопідйомності для доставки великих вантажів [5]. Візьмемо багатороторний безпілотний літальний апарат PH-20, оснащений надійною комбінацією шини ESC, високоефективного безщіткового двигуна (рис. 2) та високопродуктивного гвинта.

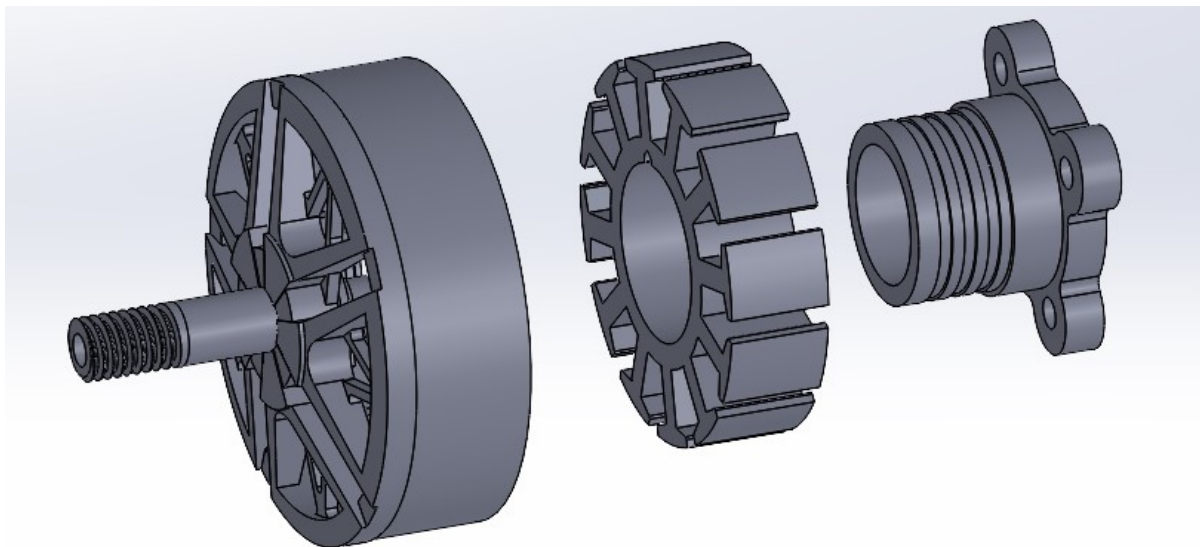


Рис. 1. 3D модель конструкції електродвигуна квадрокоптера

Створений для забезпечення потужності та ефективності, RH-20 відмінно справляється з складними умовами, витримуючи навантаження до 10 кг із вражаючою витривалістю до 70 хвилин.



Рис. 2. Двигун багатороторного безпілотного літального апарату RH-20

Двигуни, що використовуються у потужних безпілотних літальних апаратах, особливо ті, що призначені для великих корисних навантажень, зазвичай використовують електричні безщіткові двигуни постійного струму [6]. Ці двигуни є кращими перед щітковими через їх вищий ККД. У безщітковому двигуні передача струму від колектора до ротора відбувається безконтактним способом, зменшуючи втрати енергії, пов'язані з тертям.

Основні переваги таких двигунів [7]:

1. Інтегровані відцентрові вентилятори. Деякі потужні двигуни мають вбудовані відцентрові вентилятори для покращення охолодження. Ефективне охолодження має вирішальне значення для запобігання перегріву під час тривалих операцій підйому важких предметів.

2. Високотемпературні мідні обмотки з суцільним сердечником. Використання високотемпературних мідних обмоток з суцільним сердечником сприяє здатності дви-

гуна витримувати високі температури, що може викликати коливання під час важких операцій безпілотника.

3. Радіально-упорні кулькоподшипники з радіально-упорним контактом. Двигуни, призначені для важкого підйому, можуть включати радіально-упорні та радіально-контактні кулькові підшипники. Ці підшипники підвищують загальну довговічність і ефективність двигуна.

Безщіткові двигуни потужних дронів часто мають конструкцію із зовнішнім ротором. У цій конфігурації ротор обертається поза статором, а не всередині нього [8]. Цей вибір конструкції збільшує крутний момент, створюваний за рахунок розширення діаметра. Більший діаметр, до якого прикладаються зусилля, призводить до більшого крутного моменту, що робить ці двигуни добре придатними для потреб важкого підйому.

**Протилежно обертові двигуни дронів.** Окрім безщіткових двигунів, деякі потужні дрони мають унікальну конструкцію двигуна, що обертається протилежно, для подальшого підвищення ефективності (рис. 3) [9].



Рис. 3. Загальний вигляд БПЛА RH-20

Основні елементи даних двигунів [10, 11]:

1. Механізм із контактними кільцями: конструкція двигуна, що обертається протилежно, використовує механізм із контактними кільцями. Цей механізм дозволяє вловлювати енергію як від активних, так і від реактивних сил, що генеруються двигуном, що обертається.

2. Використання енергії: використовується енергія реактивної сили протидії, яка зазвичай поглинається

нерухомим статором і корпусом БПЛА. Ця зібрана енергія потім перенаправляється на рух гвинта, що обертається протиілежно, на тому ж двигуні.

Налаштування протиілежного обертання забезпечує більшу загальну ефективність порівняно зі стандартними двигунами. Ефективно використовуючи як активну, так і реактивну сили, ці двигуни можуть сприяти покращенню тяги та підйомної сили, що робить їх особливо придатними для застосування у важких вантажопідйомних безпілотниках, де максимізація ефективності має вирішальне значення.

**Вибір правильних двигунів** для важкого дрона є критичним рішенням, яке безпосередньо впливає на продуктивність, стабільність і ефективність дрона. Основні параметри, які слід враховувати – це вага та рама БПЛА [12].

Щоб почати будувати безпілотник, почніть з розрахунку його ваги, враховуючи такі компоненти, як рама, контролер польоту, ESC, двигуни, пропелери, акумулятор, камера та антена. Додайте буфер на 10-20%, щоб врахувати можливі неточності або майбутні зміни.

Отримавши приблизну вагу дрона, визначте розмір рами. В ідеалі рама повинна вмещувати максимальний розмір гвинта, що дорівнює одній третині його розмірів. Ця пропорційність оптимізує аеродинамічні характеристики, встановлюючи баланс між підйомною силою та стабільністю для ефективного польоту [13].

**Співвідношення тяги до ваги.** Після того, як ви визначили приблизну вагу свого дрона та вибрали відповідний розмір рами, наступним важливим кроком у процесі проектування є встановлення вимог до тяги [14].

Основна вказівка, якої слід дотримуватися, полягає в тому, що сумарна максимальна тяга, створювана всіма двигунами, повинна принаймні подвоювати вагу дрона. Наприклад, якщо ваш безпілотник важить 1 кілограм, загальна тяга від усіх двигунів має становити мінімум 2 кілограми. У випадку квадрокоптера це означає, що кожен двигун створює максимальну тягу щонайменше 500 грамів. Цей поріг гарантує, що дрон має вантажопідйомність, необхідну для зльоту [15].

В ідеалі для стандартних дронів рекомендоване співвідношення тяги до ваги 3:1 або 4:1. Це співвідношення гарантує, що дрон не тільки ефективно злітає, але й володіє маневреністю, необхідною для плавного та контрольованого польоту.

Крім того, це дозволяє дрону розміщувати додаткові корисні навантаження без шкоди для його загальної продуктивності.

При виборі двигунів BLDC для дронів їх розміри, зокрема ширина та висота статора, відіграють вирішальну роль у продуктивності [16].

Двигуни з ширшим статором мають більшу інерцію, що робить їх менш чутливими до змін швидкості, але забезпечує ефективне охолодження завдяки збільшеній площі поверхні. Крім того, їх конструкція дозволяє використовувати більші підшипники, що підвищує довговічність, ефективність і стабільність.

Двигуни з вузьким статором більш чуйні, але можуть зіткнутися з проблемами охолодження через їх компактну конструкцію [17].

Вибір між широким і вузьким статорами залежить від призначення дрона. Для безпілотників, які піднімають корисні вантажі, де чутливість менш критична, краще використовувати ширші двигуни.

Безпілотники з корисним навантаженням вимагають ретельного пілотування, але втрата чутливості компенсується кращим охолодженням та надійністю двигуна.

**Значення KV.** Наступним важливим кроком є розгляд співвідношення між значенням KV і вибором гвинта для оптимальної роботи дрона.

Вищі значення KV вказують на більше обертів за хвилину (RPM), коли один вольт прикладається до невантаженого двигуна [18]. Двигуни з вищим значенням KV зазвичай мають коротші обмотки та менший внутрішній опір, але вони схильні до раннього нагрівання. Ця проблема з нагріванням більш очевидна у високих двигунах із вищим значенням KV через їхню більшу швидкість обертання та генерацію тяги.

Традиційна стратегія передбачає поєднання двигунів з вищим KV з легшими пропелерами та двигунів з нижчим KV з більш важкими пропелерами. Такий підхід забезпечує баланс між характеристиками двигуна та навантаженням на гвинт. Коли двигун з високим KV поєднується з важким пропелером, він намагається обертати пропелер на максимальній швидкості, вимагаючи більшого крутного моменту та споживаючи підвищений струм. Така ситуація може потенційно пошкодити електронний контролер швидкості (ESC) або силові елементи MOSFET [19].

І навпаки, двигун з низьким KV у поєднанні з легшим пропелером може мати проблеми з виробленням достатньої тяги. Для тих, хто обирає ширші двигуни для покращення маневреності на низьких швидкостях, рекомендується двигун із низьким KV і важкими гвинтами. Навпаки, для безпілотних літальних апаратів, орієнтованих на швидкісні перегони без перевезення корисного навантаження, краще вибрати вищий двигун із високим значенням KV і легшими пропелерами.

Важливо зауважити, що значення KV є оцінкою, наданою виробником, і фактичні оберти двигуна можуть відрізнятись через такі фактори, як опір повітря [20].

Незалежно від того, чи ви обираєте двигун із низьким значенням KV із важчим гвинтом або двигун із високим значенням KV із легшим пропелером, ключовим є досягнення бажаного співвідношення тяги до ваги.

**Крутний момент двигуна.** Крутний момент, який створює двигун, залежить від таких факторів, як габарити статора, типи магнітів, якість котушки та деталі конструкції (наприклад, кількість полюсів, ізоляційний проміжок). Більший габарит статора зазвичай означає важчий двигун, але якщо два двигуни мають однаковий габарит статора, перевага віддається легшому [21].

Крутний момент двигуна впливає на реакцію пілота. Надмірний крутний момент може призвести до різких рухів дрона, що спричинить труднощі з керуванням і потенційне пошкодження блоку ESC через стрибки напруги чи струму.

Вибір легшого двигуна забезпечує баланс між потужністю та контролем, зменшуючи ці проблеми.

Для оптимальної продуктивності вирішальним є вибір двигунів, які відповідають конкретним потребам [7, 8].

У сценаріях, де потрібен повільний стабільний політ з корисним вантажем, рекомендується вибрати двигуни з меншим крутним моментом і частотою обертання. Це забезпечує більш точний і контрольований політ, одночасно захищаючи електронні компоненти.

Константа крутного моменту двигуна дрона визначає струм, необхідний для створення крутного моменту. Хоча це теоретично не пов'язано, практичні спостереження показують тенденцію: двигуни з вищим номінальним значенням KV зазвичай мають вищі константи крутного моменту, тоді як двигуни з нижчим значенням KV мають нижчі постійні крутного моменту. На практиці це означає, що двигуни з високим номінальним значенням KV споживають більше струму для досягнення заданого крутного моменту, що впливає на енергоефективність. Двигуни з високим номінальним значенням KV є менш енергоефективними, ніж їхні аналоги з низьким значенням KV через підвищене споживання струму.

Оптимальна енергоефективність вимагає вибору значення KV, який збалансовує продуктивність і ефективність, запобігаючи надмірній константі крутного моменту, яка перешкоджає загальній ефективності [11, 21].

Використання двигуна з надмірно високим постійним крутним моментом створює ризики, включаючи пошкодження електронного контролера швидкості (ESC) і проблеми з нагріванням двигуна.

Довгострокові наслідки включають скорочення терміну служби батареї та збільшення зносу проводів, двигунів і МОП-транзисторів (метал-оксид-напівпровідникові польові транзистори).

**Поточна напруга та ефективність.** Вибір відповідного безщіткового двигуна постійного струму (BLDC) для дрона залежить від ретельної оцінки номінальної напруги та струму [1-3, 12-15].

Співвідношення між напругою двигуна та споживаним струмом має вирішальне значення — вища напруга двигуна зазвичай призводить до збільшення споживання струму від акумулятора під час роботи.

Щоб визначити максимальний струм, споживаний двигуном, обчисліть це значення, коли двигун працює при найвищій напрузі, створюючи максимальну тягу.

Цей розрахунок є ключовим для вибору електронного регулятора швидкості (ESC) з відповідним номінальним струмом.

Вибираючи ESC, переконайтеся, що його номінальний струм перевищує максимальний струм, споживаний двигуном.

Хоча постійний номінальний струм ESC важливий, він не обов'язково повинен перевищувати максимальний струм двигуна.

Однак для забезпечення надійної та безпечної роботи вкрай важливо, щоб номінальний струм розриву перевищував максимальний струм двигуна.

В ідеалі краще вибрати ESC з номінальним струмом безперервного струму, вищим за максимальний струм двигуна.

Ця надлишкова потужність забезпечує додатковий запас міцності, сприяючи довговічності та надійності силової установки дрона.

Це гарантує, що ESC справляється з несподіваними різкими стрибками навантаження, запобігаючи перегріву та потенційному пошкодженню.

**N та P в двигуні.** Двигуни дронів позначені рейтингами N та P, наприклад 12N15P, із зазначенням кількості полюсів у статорі двигуна та постійних магнітах [13-17].

Менша кількість полюсів, як видно в 12N15P, призводить до більшого крутного моменту, тоді як більше полюсів сприяє більш плавній роботі завдяки однорідному магнітному полю.

Оскільки двигуни дронів є трифазними, номери полюсів завжди кратні 3. Для двигунів 22XX і 23XX BLDC загальною конфігурацією є 12N15P.

Важливо зазначити, що кількість полюсів і магнітів безпосередньо не впливає на продуктивність двигуна, але має важливе значення для налаштування контролерів польоту, наприклад для ввімкнення фільтрів обертів.

Розуміння цих рейтингів гарантує оптимальну продуктивність і чутливість систем дронів.

**Схема монтажу.** Дронові двигуни, зокрема серії 22XX, 23XX і 24XX, мають різноманітні схеми кріплення 16x16 мм або 16x19 мм [18].

Для забезпечення сумісності з різними фреймами рама дрона повинна підтримувати обидва ці шаблони.

Для кріплення цих двигунів стандартним вибором є гвинти M3.

Ключовим моментом тут є довжина цих гвинтів, яка має перевищувати товщину кронштейна дрона на 2 мм.

Наприклад, якщо товщина кронштейна дрона 5 мм, рекомендована довжина гвинтів M3 становить 7 мм.

Ця точність у довжині гвинта має вирішальне значення для надійного та стабільного з'єднання між двигунами та рамою.

Дотримання цих вказівок забезпечує надійне та міцне складання, що сприяє загальній продуктивності та структурній цілісності дрона.

**Обмотка двигуна.** Вибір обмотки двигуна істотно впливає на продуктивність двигуна.

Товсті дроти витримують більші струми, але зменшують електромагнітне поле, що впливає на крутний момент [5-7, 12-14].

Тонкі дроти чудово створюють сильні електромагнітні поля та крутний момент, але борються із високим споживанням струму через підвищений внутрішній опір.

Щоб досягти цього балансу, виробники часто вибирають товсті мідні дроти з більшою кількістю обмоток.

Ця комбінація підтримує стійкість до струму, одночасно посилюючи електромагнітне поле статора, що призводить до збільшення крутного моменту.

Обмотки двигуна бувають двох варіантів: одножильні і багатожильні.

Одножильний використовується товстий дріт для більшого споживання струму, підходить для високовольтних акумуляторних блоків.

Багатожильний, із трьома і більше тоншими жи-

лами, створює потужні електромагнітні поля та крутний момент, але стикається з ризиком пошкодження через високе споживання струму, що призводить до нижчого значення KV.

**Підшипник двигуна.** Розмір підшипника двигуна безпосередньо впливає на його довговічність і плавність роботи [11-13, 20, 21].

Більші підшипники підвищують довговічність, розподіляючи навантаження та ефективно розсіюючи тепло, що робить їх придатними для застосування у важких умовах.

З іншого боку, менші підшипники сприяють стабільності та плавній роботі, що ідеально підходить для точних машин.

Внутрішній діаметр підшипника визначає розмір вала двигуна, підкреслюючи взаємопов'язаність компонентів двигуна.

Деякі виробники рекламують двигуни з керамічними підшипниками для їх плавної роботи, хоча вони можуть бути більш схильні до поломки порівняно зі сталевими підшипниками.

Двигуни дронів обертаються в протилежних напрямках для стабільності під час польоту. Якби всі двигуни оберталися однаково, дрону було б важко піднятися та зберегти контроль.

Щоб досягти балансу, двигуни, встановлені по діагоналі один навпроти одного, обертаються в протилежних напрямках – один за годинниковою стрілкою, інший проти годинникової стрілки [7, 8].

Ця конфігурація протидіє крутному моменту, забезпечуючи стабільний і контрольований політ, важливий принцип конструкції, застосований у багатороторних дронах для оптимальної роботи.

**Ефективність** є критичним фактором у виборі двигуна. Двигуни BLDC загалом перевершують як двигуни змінного струму, так і електродвигуни постійного струму з точки зору енергоефективності [12].

Двигуни постійного струму, особливо щіткові, виграють від використання постійних магнітів, уникаючи витрат енергії на створення електромагніту, процесу, властивого двигунам змінного струму.

Відсутність щіток у двигунах BLDC зменшує тертя, підвищуючи ефективність, особливо в умовах низького навантаження [17].

Менший розмір двигунів BLDC додатково сприяє підвищенню ефективності, оскільки вони розсіюють менше тепла.

**Сервіс і технічне обслуговування.** У застосуванні безпілотних літальних апаратів для важкої вантажопідйомності термін служби та вимоги до обслуговування є вирішальними міркуваннями.

Щіткові двигуни (рис.4), хоч і більші за розміром, мають менший термін служби через знос вугільних або графітових щіток [11].

Необхідні регулярне технічне обслуговування та заміна, що може призвести до поломки [5].

Навпаки, безщіткові двигуни демонструють довший термін служби, чистоту та тихішу роботу, оскільки в них відсутні компоненти, схильні до зносу та тертя.

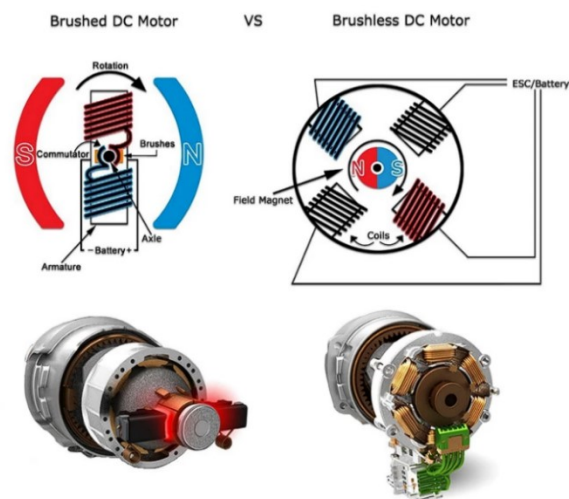


Рис. 4. Щітковий та безконтактний двигуни

**Стабільність швидкості.** Двигуни BLDC забезпечують чудову стабільність швидкості завдяки вбудованим датчикам Холла.

Ці датчики виявляють зміни полярності під час обертання ротора, що дозволяє точно контролювати швидкість [20].

Потім зібрана інформація використовується схемою приводу для налаштування послідовності перемикачів, забезпечуючи стабільне та точне регулювання швидкості [9].

**Високошвидкісна робота.** Щіткові та безщіткові системи постійного струму вирізняються тим, що забезпечують рівний крутний момент у широкому діапазоні швидкостей, що робить їх придатними для застосування у важких дронах [8, 10].

Двигуни змінного струму, з іншого боку, часто відчувають втрату крутного моменту зі збільшенням швидкості.

Пакети BLDC, такі як ті, що пропонуються Oriental Motor, забезпечують універсальний діапазон контролю швидкості, пристосовуючись до швидкості від 3 об/хв до 4000 об/хв.

Безщіткові двигуни постійного струму (BLDC) стали популярним і кращим вибором для безпілотних літальних апаратів для важкої вантажопідйомності, головним чином через виняткову комбінацію високої ефективності, вигідного співвідношення потужності до ваги та точного керування [12-14].

**Висновки.** Правильний вибір двигунів має велике значення для стабільності, маневреності і надійності важких дронів.

Різноманітність типів двигунів: Існує широкий спектр двигунів для важких дронів, включаючи безщіткові, щіткові, безколекторні і гібридні варіанти, кожен з яких має свої особливості і переваги.

Ключові властивості двигунів: Ефективність, потужність, вага і розмір - це ключові параметри, на які слід звертати увагу при виборі двигунів для важких дронів.

Важливість налаштування і сумісності: Правильна настройка і сумісність двигунів з іншими компонентами дрона можуть значно вплинути на його продуктивність і довговічність.



Подальші напрямки досліджень: Розвиток нових технологій і матеріалів може привести до появи ще більш ефективних і потужних двигунів для важких дронів.

Загальний висновок полягає в тому, що розумний вибір і правильне налаштування двигунів відіграють ключову роль у досягненні успішних польотів важких дронів.

#### References

1. Park, J.S.; Lee, K.D. Design and Implementation of BLDC Motor with Integrated Drive Circuit. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* 2017, 8, 1109–1116.
2. Felix Niessen, Homebuilt Electric Motors—Winding Scheme Calculator. Available online: <http://www.bavaria-direct.co.za/> (accessed on 18 February 2021).
3. Shahri, P.K.; Izadi, V.; Ghasemi, A.H. Design a High Efficiency and Low Ripple BLDC Motor Based on Multi-Objective Optimization Methods. In Proceedings of the 2020 American Control Conference (ACC), Denver, CO, USA, 1–3 July 2020; pp. 156–161.
4. Ullah, N.; Khan, F.; Ullah, W.; Umair, M.; Khattak, Z. Magnetic equivalent circuit models using global reluctance networks methodology for design of permanent magnet flux switching machine. In Proceedings of the 2018 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 9–13 January 2018; pp. 397–404.
5. Mariani, G.B.; Besri, A.; Voyer, N.; Chillet, C.; Fassenet, M.; Garbuio, L. Synchronous reluctance motor multi-static MEC model. In Proceedings of the IECON 2015—41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, 9–12 November 2015; pp. 843–848.
6. Chumak, V. V., Kovalenko M. A., Trotsenko, Y. O., Stulishenko, A. S., & Tymoshchuk, O. L. (2023). High-frequency methods for detecting insulation defects in mesh winding generators of power plants based on renewable energy sources. *Renewable and Hydrogen Energy*, 4 (71), 56–63. doi: 10.36296/1819-058.2022.4(71).56-63.
7. M. Ostroverkhov, V. Chumack, M. Kovalenko and Y. Ihnatiuk, "Magnetolectric Generator with Magnetic Flux Shunting for Electric Power Complexes," 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2022, pp. 160–164, doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969246.
8. M. Ostroverkhov, V. Chumack, M. Kovalenko and M. Falchenko, "Voltage Control of the Magnetolectric Generator Based on the Change of the Magnetic Resistance of the Auxiliary Flux Circuits," 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2022, pp. 169–174, doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969289.
9. Huh, N.; Park, H.-S.; Lee, M.H.; Kim, J.-M. Hybrid PWM Control for Regulating the High-Speed Operation of BLDC Motors and Expanding the Current Sensing Range of DC-link Single-Shunt. *Energies* 2019, 12, 4347.
10. Huang, C.; Chen, G.; Yang, S.; Hsu, Y. Comparison of High Speed Permanent Magnet Machine Sensorless Drive using Trapezoidal BLDC and Sinusoidal FOC under Insufficient PWM Frequency. In Proceedings of the 2019 IEEE Energy Conversion Congress and

- Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 29 September–3 October 2019; pp. 321–325.
11. Xiaobo, Y.; Xiao, L. Sensor-less brushless DC motor control system design for electric vehicle. In Proceedings of the 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), Ningbo, China, 9–11 September 2011; pp. 2829–2833.
  12. Ekmen, Ş.; Fincan, B.; Imeryuz, M. A BLDC motor drive with four switch three phase inverter. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, UK, 20–23 November 2016; pp. 804–808.
  13. Kolano, K. Determining the Position of the Brushless DC Motor Rotor. *Energies* 2020, 13, 1607.
  14. Krishnakumar, V.; Jeevanandhan, S. Four switch three phase inverter control of BLDC motor. In Proceedings of the 2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems, Tamilnadu, India, 3–5 January 2011; pp. 139–144.
  15. Kalyani, B.S.; Mukkavilli, V.M.; Naik, G. Performance Enhancement of Permanent Magnet Brushless DC Motor Using Multilevel Inverter. In Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC), Hyderabad, India, 5–7 January 2017; pp. 472–476.
  16. Deshpande, P.; Mopari, S.S.; Swami, P.S. Power factor correction and power quality improvement in BLDC motor drive using SEPIC converter. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), Coimbatore, India, 20–22 February 2019; pp. 1–4.
  17. V.M. Golovko, M.Ya. Ostroverkhov, M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, D.V. Tsyplenkov Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetolectric generator // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, (5): 074 – 079. doi: 10.33271/nvngu/2022-5/074..
  18. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Ihnatiuk, Y. (2022). Designing a voltage control system of the magnetolectric generator with magnetic flux shunting for electric power systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologists* this link is disabled, 2022, 5 (5-119), pp. 16–25. doi: 10.15587/1729-4061.2022.265861.
  19. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M., & Kovalenko, I. (2022). Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetolectric generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (2(118)), 67–78. doi: 10.15587/1729-061.2022.263432.
  20. Siadatan, A.; Fatahi, N.; Sedaghat, M. Optimum Designed Multilayer Switched Reluctance Motors for use in Electric Vehicles to Increase Efficiency. In Proceedings of the 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy, 20–22 June 2018; pp. 304–308.
  21. M. Ostroverkhov, V. Chumack, M. Kovalenko and Y. Ihnatiuk, "Electrical Generator with Magnetic Flux Shunting for Autonomous Power Units," 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916440.

Надійшла (received) 29.04.2024

#### Відомості про авторів / About the authors

**Коваленко Михайло Анатолійович (Mykhaylo Kovalenko)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри електромеханіки, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: [kovalenko\\_ma@i.ua](mailto:kovalenko_ma@i.ua).

**Ткачук Ігор Валерійович (Tkachuk Ihor)** – аспірант кафедри електромеханіки, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5717-2458>; e-mail: [baja0073@gmail.com](mailto:baja0073@gmail.com).

**Коваленко Ірина Яківна (Kovalenko Iryna)** – асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", аспірант кафедри нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5602-2001>; e-mail: [2048141@ukr.net](mailto:2048141@ukr.net).

**Жук Сергій Олександрович (Zhuk Serhiy)** – менеджер ТОВ "НТТ Енергія", ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0409-5580>; e-mail: [asmedia.zhuk@gmail.com](mailto:asmedia.zhuk@gmail.com).

**Кришньов Олег Олександрович (Kryshnov Oleg)** – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 03056, м.Київ, пр. Перемоги 37, ORCID: 0009-0008-1140-5544, e-mail: [okrihnov@gmail.com](mailto:okrihnov@gmail.com).

**Перепелиця Олександр Сергійович (Perepelytsia Oleksandr)** – по Автоелектрику, "ТеслаКиїв", ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3352-2140>; e-mail: [alex.perpelitsa01@gmail.com](mailto:alex.perpelitsa01@gmail.com).

**Тітов Єгор Олександрович (Titov Yehor)** – головний інженер, ТОВ "ТЕКО-ЦЕНТР"; <https://orcid.org/0009-0007-8222-7477>; e-mail: [egor.shabadash@gmail.com](mailto:egor.shabadash@gmail.com).