

УДК 629.7.03

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/04>

Довбиш І.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Муравйов О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Галаган Р.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Богдан Г.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Момот А.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИЛОВІ УСТАНОВКИ ТА ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ СУЧАСНИХ БПЛА

Безпілотні літальні апарати стали невід’ємною частиною життя людини: їх використовують у промисловості, для рятувальних операцій, у військовій техніці та з розважальною метою. Серед сучасних моделей є як керовані людиною, так і частково або повністю автоматизовані. Сьогодні з них створюють рої і постійно підвищують можливості корисного навантаження, що дозволяє значно розширити перелік задач, які вирішується за допомогою дронів. Розробка та вдосконалення технологій БПЛА належать сьогодні до одного з найактуальніших світових напрямків розвитку техніки, що обумовлено майже щоденною появою нових завдань, вирішення яких покладається на дрон. Єдиною проблемою, яка існує ще з початку історії конструювання БПЛА, є питання збільшення дальності та часу польоту дрона.

У даній роботі проаналізовані варіанти сучасної реалізації силових установок, що забезпечують політ БПЛА. Розглянуті двигуни внутрішнього згорання, електродвигуни та гібридні системи, що створюються шляхом поєднання цих двох типів двигунів. Коротко описаний принцип їх роботи, виявлено основні переваги, недоліки, перспективи та можливі сфери їх застосування. Обґрунтовано вибір конкретного типу силової установки БПЛА, що є необхідним для реалізації певних можливостей дрона, таких як: підйом важкого вантажу, висока тривалість польоту, вертикальний зліт, зависання у повітрі та рух з невеликою швидкістю.

Проаналізовано джерела енергії, що стали найбільш поширеними для забезпечення роботи електродвигунів. Особливу увагу приділено сонячним панелям та водневим паливним елементам, що суттєво збільшують тривалість польоту та наразі є найекологічнішими. На сьогоднішній день рекордсменом по тривалості неперервного польоту є БПЛА, в якості джерела енергії в якому використовуються сонячні батареї, виготовлені з аморфного кремнію.

Перспективними напрямками досліджень сьогодення є модифікація силових установок та джерел енергії БПЛА. Вважатися вирішеною розглянута проблема буде у результаті створення дрона з можливістю піднімати різноманітні вантажі при забезпеченні «нескінченно довгого» польоту, посадка при якому здійснюється виключно з метою ремонту та за бажанням людини.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, гібридні БПЛА, силова установка, джерела енергії, двигун внутрішнього згорання, електродвигун.*

Постановка проблеми. Сучасне життя важко уявити без безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які використовують у таких сферах життєдіяльності

людини, як медіа, геодезія, сільське господарство, нафтогазова промисловість, електроенергетика та ін. У кожній галузі одними з найважливіших харак-

теристик для БпЛА є дальність та час польоту. Питання збільшення цих можливостей виникає перед розробниками з моменту створення найпершого дрона на початку 19 ст. Важливими є також мінімізація витрат палива та реалізація високого рівня вантажопідйомності [1, с. 203–204]. Чи не єдиним способом вирішення даної задачі є модифікація двигунів та джерел живлення, з яких надходить енергія для польоту БпЛА.

Актуальним також є пошук альтернативних акумуляторам та паливу джерел енергії. Подібні дослідження викликані питанням забезпечення «нескінченно довгого» польоту БпЛА, при якому посадка буде здійснюватися для заміни запчастин та проведення ремонту [2, с. 159–161].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж історії будівництва безпілотних літальних апаратів найбільш поширеними стали двигуни внутрішнього згорання та електродвигуни. Кожен з них має свої особливості, переваги і недоліки. Вибір типу двигуна відбувається на основі задач та вимог до розроблюваного БпЛА.

Інтерес до досліджень силових установок та пошуку джерел енергії для БпЛА підтверджується великою кількістю наукових робіт. Основною темою на сьогодні є комбінування декількох джерел енергії в одному БпЛА. Найбільш поширеними варіантами поєднання є:

- сонячні батареї та акумулятори [3, с. 35–38];
- водневе паливо та сонячні батареї [4, с. 4–9];
- двигун внутрішнього згорання та електродвигуни.

Кожен з вказаних варіантів дозволяє певним чином покращити характеристики дрона. Серед переваг є збільшення часу польоту, вихідної потужності, вантажопідйомності БпЛА.

Окремої уваги заслуговує водневе паливо, яке стало альтернативою традиційним акумуляторам і вже використовується в якості ефективного джерела енергії БпЛА [4, с. 4–9; 5]. У свою чергу сонячні батареї наразі є єдиним варіантом забезпечення польоту, в процесі якого можливе відновлення запасів енергії.

Варто зазначити, що на сьогоднішній день проводяться дослідження не лише з метою пошуку нових технологій, механізмів і систем, а й для покращення характеристик вже існуючих силових установок. Наприклад, у роботі [6, с. 131–133] представлена концепція підвищення потужності електродвигуна за рахунок збільшення радіусу ротора гвинта.

Метою роботи є аналіз та порівняння можливостей силових установок, що застосовуються

в сучасних БпЛА, виявлення перспективних напрямків розвитку розглянутих систем і дослідження залежності обраного механізму та джерела енергії від цільових функцій дрона.

Двигуни внутрішнього згорання. Найперші створені БпЛА здебільшого будувалися за прикладом відповідних літаків, а отже, у своїй конструкції мали двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). Наприклад, під час Другої світової війни був побудований БпЛА DH.82 Queen Bee, який часто називають «матір'ю дронів» [7]. Це був безпілотний радіокерований літак-мішень, створений на базі британського навчального літака, який було розроблено на початку 1930-х років. Обидва із зазначених літальних апаратів використовували 4-х циліндровий двигун внутрішнього згорання.

Сьогодні ДВЗ зустрічаються рідше, проте їх все ще використовують для БпЛА, які розраховані на підйом важкого вантажу. Основними галузями застосування таких дронів стали аграрна та військова промисловість, рятувальні операції. Обумовлено це головним недоліком при використанні ДВЗ – великою вагою та габаритами силової установки. Також для функціонування механізму необхідна наявність на борту БпЛА наступних систем: подачі пального, запуску та охолодження.

ДВЗ використовуються у БпЛА літакового та гелікоптерного типу. Щодо БпЛА з фіксованим крилом, при використанні лише ДВЗ, вони потребують злітну та посадкову смуги. Для реалізації вертикального зльоту та посадки додатково встановлюються електродвигуни. Прикладом такої реалізації є БпЛА українського виробництва PD-2 (рис. 1) компанії Ukrspecsystems. Так як основною силовою установкою є ДВЗ, корисне навантаження цього дрона може сягати 19 кг при максимальній злітній вазі 55 кг [8].



Рис. 1. БпЛА PD-2 компанії Ukrspecsystems

У мультикоптерах обертовий момент має передаватися на кожен гвинт від одного двигуна. Це значно ускладнює задачу повороту дрона, для виконання якого необхідно забезпечити різну

швидкість обертання гвинтів. Використання різноманітних передач збільшує вагу та зменшує швидкість реагування при зміні напрямку руху. Тому ДВЗ у мультикоптерах використовують здебільшого в складі гібридної силової установки, що буде розглянута далі.

Суттєвою перевагою ДВЗ перед електродвигунами є швидка дозаправка. У якості палива використовують здебільшого бензин з октановим числом не менше 85. Він є досить поширеним на ринку, що не викликає додаткових проблем із пошуком палива.

Серед недоліків ДВЗ варто окремо зазначити затримку між наданням команди та фактичною зміною швидкості або напрямку руху БПЛА, вибухонебезпечність, відносно високу ціну палива та значний шум при роботі двигуна. Використання механізму у військових цілях та для проведення розвідувальних операцій ускладнено нагріванням двигуна та високою температурою вихідних газів, що робить БПЛА дуже помітним в інфрачервоному діапазоні спектра. З точки зору екологічності ДВЗ також сильно поступаються електродвигунам.

Для забезпечення вищого значення вихідної потужності та при необхідності досягнення високих швидкостей у БПЛА встановлюють ДВЗ з турбонаддувом чи турбореактивні двигуни.

Електродвигуни. Електродвигуни наразі є найбільш поширеними джерелами енергії БПЛА. Вони дедалі більше замінюють ДВЗ та поступово отримують певні модифікації, що стосуються як покращення характеристик самого двигуна, так і джерела живлення.

У сучасних БПЛА використовують як колекторні (рис. 2, а), так і безколекторні (рис. 2, б) електродвигуни. Основна відмінність між ними полягає у наявності щіток та колектора. Колекторні електродвигуни мають наступну структуру: статор з постійним магнітом, ротор з обмотками та колектор. За допомогою щіток передається струм від пластин колектора до обмотки ротора, що змінює напрям струму і змушує двигун працювати. При цьому відбувається постійне тертя між щітками та пластинами, на подолання якого необхідно витратити певну енергію. Також даний механізм є досить шумним. Для збільшення обертового моменту такого двигуна інколи використовують редуктори, що додатково ускладнює конструкцію та процедуру ремонту БПЛА.

Безколекторний двигун, окрім того, що не має зазначених недоліків колекторного, має меншу вагу, більший коефіцієнт корисної дії та обертовий момент. Він складається зі статора з обмот-

ками, ротора з постійним магнітом та електронного регулятора, за рахунок якого змінюється подача струму на обмотки та контролюється швидкість обертів двигуна. Використовують трьохкратну кількість обмоток (здебільшого 3, 6, 9 або 12). Розглянемо принцип роботи такого двигуна на прикладі трьох наявних у ньому обмоток. Струм подається до кожної обмотки по черзі, що робить її електромагнітом і змушує обертатися ротор. Безколекторний двигун також називають трьохфазним. Дана конструкція не має колектора та щіток, що спрощує обслуговування та збільшує час експлуатації. Для захисту від вологи та пилу, які можуть пошкодити даний механізм, використовується корпус закритого типу.

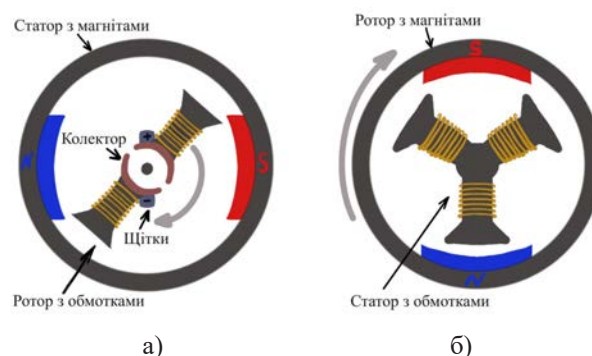


Рис. 2. Схеми електродвигунів: а) колекторний електродвигун, б) безколекторний електродвигун

Широке використання колекторних двигунів сьогодні обумовлене їх меншою вартістю у порівнянні з безколекторними. Найдорожчим компонентом в останніх є електронний регулятор.

Електродвигуни є достатньо простими у встановленні та експлуатації. Їх можна зустріти у всіх видах сучасних БПЛА: гелікоптерного та літакового типу, мультикоптерах. В останніх для кожного гвинта наявний окремий електродвигун. Швидкість обертання ротора двигуна, а отже, й швидкість та напрям польоту регулюється за допомогою коригування напруги, поданої на кожен двигун контролером польоту.

Здебільшого електродвигуни працюють від акумуляторів, що є найпростішим та найдешевшим варіантом живлення. Найбільш вживаними на сьогодні є літій-полімерні (Li-Pol) та літій-іонні (Li-Ion) акумуляторні батареї. Також активно впроваджується використання літій-залізо-фосфатної (Li-Fe-Po) технології, що допоможе знизити вагу акумуляторів, майже вдвічі продовжити час польоту та збільшить діапазон температур, при яких БПЛА зможе виконувати завдання (від -20 до +40°C). Також вони є безпечнішими за інші типи батарей.

Говорячи про акумулятори в якості джерел живлення, варто згадати низку їх недоліків:

- робота акумуляторів залежить від температури: за низьких температур їх продуктивність значно знижується. Отже, в залежності від погодних умов БПЛА зможе пролетіти різну відстань, що неможливо передбачити;
- з часом ємність акумуляторів зменшується. У середньому рекомендується змінювати акумулятор БПЛА кожні 150-200 циклів перезарядок;
- для перезарядки акумулятора потрібна досить велика кількість часу, а отже БПЛА неможливо використовувати одразу для вирішення наступної задачі.

Наведені вище недоліки акумуляторів та необхідність збільшення часу польоту спонукали до пошуку альтернативних джерел енергії. Гідною заміною стали водневі паливні елементи (рис. 3), що отримують енергію з хімічних реакцій. Сам паливний елемент складається з аноду, катоду та мембрани з електроліту. Електричний струм створюється за рахунок електронів, що відокремлюються від атомів водню при проходженні через анод. В основі роботи паливного елемента покладений процес горіння водню, під час якого відбувається відновлення атомів кисню та окиснення атомів гідрогену.

Водневі паливні елементи можуть працювати значно довше за акумулятори, а отже забезпечують більшу дальність та час польоту БПЛА. Після закінчення протікання хімічної реакції в елементі його можна швидко замінити на новий. Також використання такого джерела енергії є досить екологічним, адже єдиною вихідною речовиною є вода.

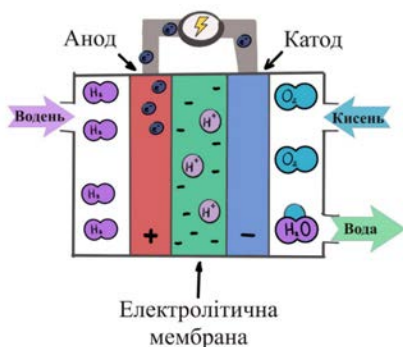


Рис. 3. Схема водневого паливного елемента

Сьогодні часто зустрічаються БПЛА, що працюють на сонячних батареях. Їх використання спричинене необхідністю забезпечення польоту, час якого буде обмеженим лише потребою у ремонті БПЛА або бажанням людини. Напряга, яку може надавати сонячна батарея, різняться в залежності

від погоди та часу доби. Тому такі БПЛА мають накопичувати енергію в акумуляторах.

Саме завдяки джерелу енергії – сонячному світлу політ може здійснюватися впродовж років, не повертаючись на землю та без негативного впливу на довкілля. Це стало великим проривом у технології БПЛА. Розглядається, що такі дрони зможуть у перспективі замінити штучні супутники, ведучи постійне спостереження за поверхнею Землі, та, у якості ретрансляторів, забезпечити зв'язок у важкодоступних та віддалених областях. Прикладом такого дрона є Zephyr (рис. 4), розроблений компанією Airbus. Його розвиток бере початок у 2001 році. У 2022 цей БПЛА зміг протриматися у повітрі впродовж 64 днів. При його будівництві використані високо енергетичні сонячні батареї з аморфного кремнію, товщина яких не перевищує товщину аркуша паперу. Навіть найсучасніші технології виготовлення фотоелементів не можуть забезпечити високу потужність, тому у даному випадку особливо важливо максимально зменшити вагу та приділити велику увагу структурі БПЛА. Не зважаючи на свої вражаючі розміри (розмах крил сягає 25 метрів), Zephyr важить всього 75 кг [9]. Даний БПЛА літає на висоті вище 21 км, тому хмари не є проблемою для отримання сонячної енергії.



Рис. 4. БПЛА Zephyr компанії Airbus

Гібридні силові установки. Гібридними називають БПЛА, що використовують одночасно два типи розглянутих вище двигунів. Такі дрони наразі дуже поширені в аграрній промисловості. Одними з цільових задач БПЛА є розпіркання добрив та спостереження за рослинами, для чого необхідна можливість зависати у повітрі та рухатися з невеликою швидкістю. Таким функціоналом володіють мультироторні дрони. Їх робота забезпечується шляхом встановлення окремого електродвигуна для кожного гвинта. Також важливим для розглянутої галузі є забезпечення високого рівня вантажопідйомності, що можливо отримати за рахунок використання ДВЗ.

Якщо необхідним є отримання потужності від ДВЗ, а управління рухом відбувається за рахунок електродвигунів, така система реалізується в гібридних БпЛА, де поєднуються переваги обох типів двигунів. Також під час роботи ДВЗ паралельно відбувається зарядка акумулятора. Це дозволяє подовжити час польоту після вичерпання палива та робить БпЛА надійнішим: у разі виходу з ладу ДВЗ можливим буде здійснення безпечної посадки.

Серед переваг гібридних установок, окрім значної тягової сили, варто виокремити незалежність від злітних та посадкових смуг, мобільність управління.

Проте установка даного типу не є ефективною для БпЛА гелікоптерного або літакового типу масою вище 50 кг. У цьому випадку краще використовувати ДВЗ, не втрачаючи потужність на передачу енергії до електродвигунів.

Висновки. У сучасному світі обраний тип силової установки відповідає вимогам, що висуваються до конкретного БпЛА. Для підйому важких вантажів використовують двигуни внутрішнього

згорання, для ведення спостереження – електродвигуни. Синтез цих систем, тобто гібридні силові установки, використовують у ситуаціях, де необхідною є наявність переваг обох типів двигунів.

Різняться й цілі використання різних джерел енергії для БпЛА, політ яких здійснюється за рахунок електродвигунів. Акумулятори застосовують у найменших БпЛА та для виконання найпростіших задач, що обумовлено відносно низькою їх вартістю. Також акумулятори використовують для накопичення залишкової енергії, отриманої з фотоелементів або гібридної силової установки.

Саме завдяки впровадженню сонячних панелей реальною стала ідея забезпечення «нескінченно довгого» польоту БпЛА. У свою чергу водневі паливні елементи активно замінюють акумулятори, забезпечуючи більший час польоту.

Перспективними напрямками розвитку технологій БпЛА на сьогодні є удосконалення силових установок та джерел живлення, пошук альтернативних варіантів та застосування відновлюваних джерел енергії.

Список літератури:

1. Муравйов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2023. Том 34 (73). № 2. С. 199–205.
2. Довбиш І.О., Муравйов О.В. Залежність архітектури рою від рівня автономності БпЛА. *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»*, м. Київ, збірник праць конференції. 2023. С. 158–161.
3. Nguyen C.V., Quyen T.V., Le A.M., Truong L.H., Nguyen M.T. Advanced Hybrid Energy Harvesting Systems for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2020. Vol. 5, No. 1. 34–39.
4. Skarka W., Peciak M. Designing Hybrid Energy Source System for Long Endurance Electric UAV. *Transdisciplinary Engineering for Complex Socio-technical Systems*. 2019. pp. 3–11.
5. Pourrahmani H., Bernier C.M.I., Van herle J. The Application of Fuel-Cell and Battery Technologies in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Dynamic Study. *Batteries*. 2022. 8. 73.
6. Журиленко Б.Є., Ніколаєв К.І., Ніколаєва Н.К. Зміна конструкції електродвигунів транспортних систем з метою економії енергоресурсів автономних джерел живлення. *Наукові технології*. 2018. № 1 (37). С. 130–135.
7. Vintage wings of Canada, The mother of all drones. URL: <https://www.vintagewings.ca/stories/mother-of-all-drones> (дата звернення: 15.09.2023).
8. Ukspecsystems, PD-2 unmanned aerial system. URL: <https://ukspecsystems.com/drones/pd-2-uas> (дата звернення: 15.09.2023).
9. BBC, Zephyr breaks own record for longest unmanned flight. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-62123819> (дата звернення: 15.09.2023).

Dovbysh I.O., Muraviov O.V., Galagan R.M., Bohdan H.A., Momot A.S. POWER SYSTEMS AND ENERGY SOURCES OF MODERN UAVS

Unmanned aerial vehicles have become an integral part of human life. They are used in industry, rescue operations, military equipment and for entertainment purposes. Among modern models, there are both human-controlled and partially or fully automated ones. Today, swarms are created from them and the capabilities of useful payloads are constantly being increased, which significantly expands the list of tasks solved by drones. The development and improvement of UAVs technologies are currently one of the most relevant global trends in technical science and engineering, due to the almost daily emergence of new tasks, the solution of which is

entrusted to the drone. The only problem that has existed since the beginning of UAV construction history is the issue of increasing the drone's range and flight time.

In this paper, options for the modern implementation of power systems that ensure UAV flight are analyzed. Internal combustion engines, electric motors and hybrid systems, which are created by combining these two types of engines, have been considered. The principle of their operation is briefly described also as main advantages, disadvantages, prospects and possible areas of application. The choice of a specific type of UAV power system, which is necessary for the implementation of certain drone capabilities such as heavy lift, high flight duration, vertical take-off, hovering and slow speed motion is substantiated.

Sources of energy, that have become most common for powering electric motors, are analyzed. Special attention is paid to solar panels and hydrogen fuel cells, which significantly increase flight duration and are currently the most environmentally friendly. At present, the continuous flight duration record is held by a UAV that uses solar batteries made of amorphous silicon as an energy source.

Nowadays promising areas of research include the modification of power systems and energy sources for UAVs. The considered issue will be deemed solved as a result of creating a drone with the ability to lift various loads while providing an "infinitely long" flight, which lands solely for the purpose of repair and at the discretion of human.

Key words: *unmanned aerial vehicle, hybrid UAVs, power system, energy sources, internal combustion engine, electric motor.*