

Аналіз обмінної потужності в системі живлення дрону

Миколаєць Д. А., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)

Кафедра електронних пристроїв та систем, Факультет електроніки

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—Представлена класифікація дронів – як військових так і цивільних за відповідними критеріями. Показані блок-схеми типового безпілотного літального апарату та його силової системи. Проаналізовано явище виникнення обмінної потужності в системах живлення електротранспорту від джерел постійного струму і конкретно в системі живлення безпілотного літального апарату. Представлена спрощена принципова схема системи живлення двигуна постійного струму. Виведено співвідношення для визначення величини обмінної потужності в системі живлення.

Ключові слова — дрон; безпілотний літальний апарат; обмінна потужність; електротранспорт.

I. Вступ

Зазвичай, система живлення дрону категорії «мікро», «міні» чи «близької відстані», згідно класифікації UVS international [1], являє собою набір з DC/DC перетворювачів з мікропроцесорною системою керування. Джерелом живлення для таких літальних апаратів, як правило є акумуляторна батарея, рідше – паливні елементи [2, 3]. В процесі польоту швидкість обертання двигунів є непостійною, а її зміна залежить не тільки від зміни швидкості польоту чи напрямку, а і від погодних умов, наприклад вітру, оскільки система стабілізації постійно вирівнює дрон. Це призводить до того, що система живлення такого апарату фактично суттєву частину часу перебуває в перехідному режимі. Це призводить до появи значного вмісту компоненту обмінної енергії в спожитій з акумулятора, яка в свою чергу, підвищуватиме втрати, а значить знижуватиме дальність ходу безпілотного літального апарату (БПЛА).

Виходячи з вище сказаного, задачею даної статті є аналіз обмінної енергії в системі живлення дрону, а також формування заходів щодо її мінімізації.

II. АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ

В літературі існує деяке непорозуміння між поняттями «дрон» та «безпілотний літальний апарат», що викликає питання, яке поняття все ж необхідно використовувати. Термін «Дрон» використовується для більш широкого класу безпілотних транспортних засобів, які запрограмовані на виконання конкретного завдання в повітрі, на суші або під водою. Тоді як «безпілотний літальний апарат» (БПЛА) визначається як безпілотний літальний апарат, який

віддалено і повністю контролюється з іншого місця (земля, інший літак, космос) або запрограмований і повністю автономний.

Існують різні критерії класифікації дронів та БПЛА. За «середовищем проживання» їх поділяють на:

- літаючі,
- наземні,
- надводні,
- підводні,
- інші.

Існує також класифікація військових БПЛА, прийнята країнами-союзниками НАТО (Таблиця 1), яка в першу чергу категоризує апарати за розміром [4].

За аналогічним критерієм розрізняються також безпілотні літальні апарати цивільного призначення. Найбільш відомою є класифікація вже згаданої організації UVS international (Таблиця 2) [1].

Безпілотна повітряна система, блок-схема якої зображена на Рис. 1, складається з трьох частин [5]:

- повітряна частина, власне сам БПЛА,
- наземна станція керування, яка може бути автономною або керованою людиною,
- система керування, яка забезпечує зв'язок та передачу даних.



Таблиця 1 Класифікація БПЛА згідно НАТО

Класифікація безпілотних літальних систем (Unmanned Aircraft Systems) NATO						
Клас	Категорія	Типове використання	Типова висота польоту	Типовий радіус дії (бойовий радіус)	Підпорядкування	Приклад
Клас III (> 600 кг)	Ударний / Бойовий*	Стратегічні / Національні	до 65 000 футів (19 812 м)	Необмежений (поза зоною видимості)	Генеральний штаб (Командир театру бойових дій)	Reaper
	Висотні довготривалі (High-Altitude Long-Endurance)	Стратегічні / Національні	до 65 000 футів (19 812 м)	Необмежений (поза зоною видимості)	Генеральний штаб (Командир театру бойових дій)	Global Hawk
	Середньовисотні довготривалі (Medium-Altitude Long-Endurance)	Оперативні / Театр бойових дій	до 45 000 футів (13 716 м) над рівнем моря	Необмежений (поза зоною видимості)	Об'єднана оперативна група (Joint Task Force)	Heron
Клас II (150 кг - 600 кг)	Тактичні	Тактичне угруповання	до 18 000 футів (5486 м) над рівнем землі	200 км (у зоні видимості)	Бригада	Hermes 450
Клас I (< 150 кг)	Малі (>15 кг)	Тактичний підрозділ	до 5 000 футів (1524 м) над рівнем землі	50 км (у зоні видимості)	Батальйон, полк	Scan Eagle
	Міні (<15 кг)	Тактичний підрозділ (ручний запуск)	до 3 000 футів (914 м) над рівнем землі	до 25 км (у зоні видимості)	Рота, відділення, взвод	Skylark
	Мікро** (<66 Дж)	Тактичний підрозділ (ручний запуск)	до 200 футів (61 м) над рівнем землі	до 5 км (у зоні видимості)	Відділення, взвод	Black Widow

*Примітка: У випадку, якщо безпілотна літальна система знаходиться на озброєнні, експлуатант повинен відповідати кваліфікаціям Об'єднаної Місії, наведеним у ATP-3.3.7 (STANAG 4670), а система повинна відповідати стандартам льотної придатності, правилам, політиці, договорам та правовим нормам.

**Примітка: Безпілотні літальні системи, які мають стан максимальної енергії менший 66 Дж, не можуть завдати значної шкоди життю чи майну, і їх не потрібно класифікувати та регулювати за льотною придатністю, підготовкою тощо, якщо вони не здатні переносити небезпечне корисне навантаження (вибухової речовини, токсини, хімічні/біологічні агенти тощо).

Таблиця 2 Класифікація БПЛА згідно UVS INTERNATIONAL

Назва категорії	Маса, кг	Дальність, км	Висота польоту, м	Тривалість польоту, годин
Мікро	< 5	< 10	< 250	1
Міні	< 25/30/150	< 10	150/250/300	< 2
Близької дальності	25 - 150	10 - 30	3000	2 - 4
Середньої дальності	50 - 250	30 - 70	3000	3 - 6
Висотні довго-тривалі	> 250	> 70	> 3000	> 6

Як показано на Рис. 1, повітряна частина включає бортову систему керування польотом, блоки якої виконують такі важливі завдання, як навігація, алгоритми керування, збір і аналіз даних у польоті, зв'язок із наземною станцією та ін. Інша важлива частина це силова система, що включає джерела живлення, регулятор швидкості, різні перетворювачі, двигун і пропелер. Також в системі присутні необхідні датчики для підтримки автономного польоту та корисне навантаження: обладнання, необхідне для виконання завдань, таке як приводи, камери та радари.

Більшу частину корпусу БПЛА займає силова система, вона ж є найбільшим споживачем енергії. Саме вона приводить апарат до руху і забезпечує живлення всієї бортової техніки. Типова блок-схема силової частини представлена на Рис. 2.

В якості джерела живлення такої системи зазвичай використовується акумулятор, до якого під'єднаний до DC-DC перетворювача, який в свою чергу забезпечує постійне значення напруги на вході інвертора.

Часто в якості рушійної сили для дронів використовують безщіткові двигуни постійного струму [6, 7] і для живлення такого в системі присутній інвертор, який на основі даних з датчиків контролює швидкість обертання.

В публікаціях [8-10] описано, що в електротранспорті, що живиться постійним струмом, існує проблема наявності обмінних процесів між джерелом та навантаженням. Таке явище спричинює додаткові втрати в силових колах систем живлення.



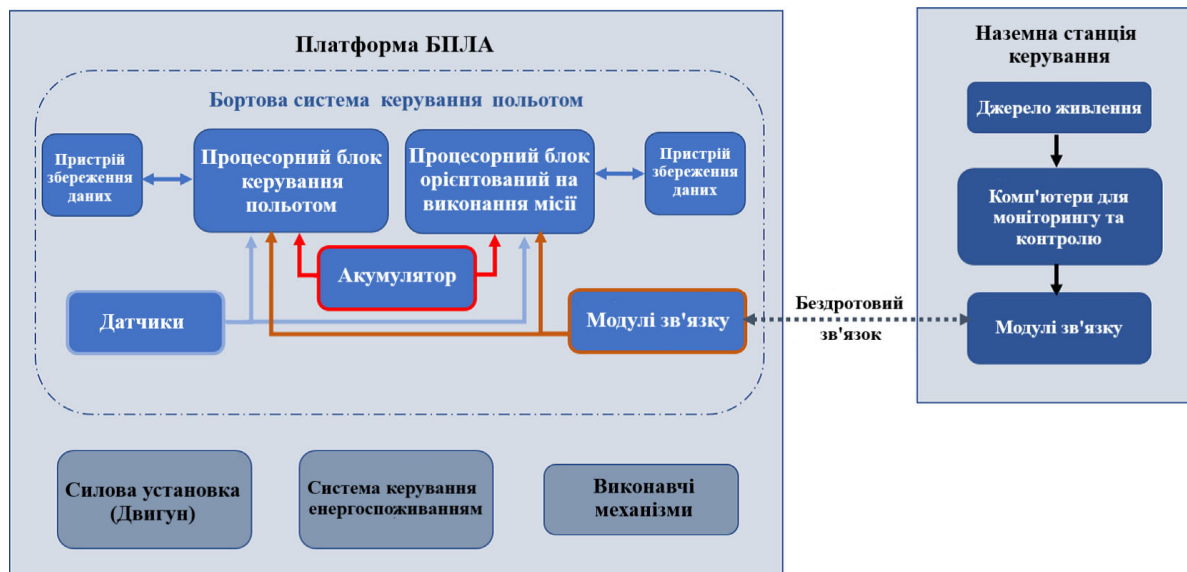


Рис. 1 Блок-схема типового БПЛА

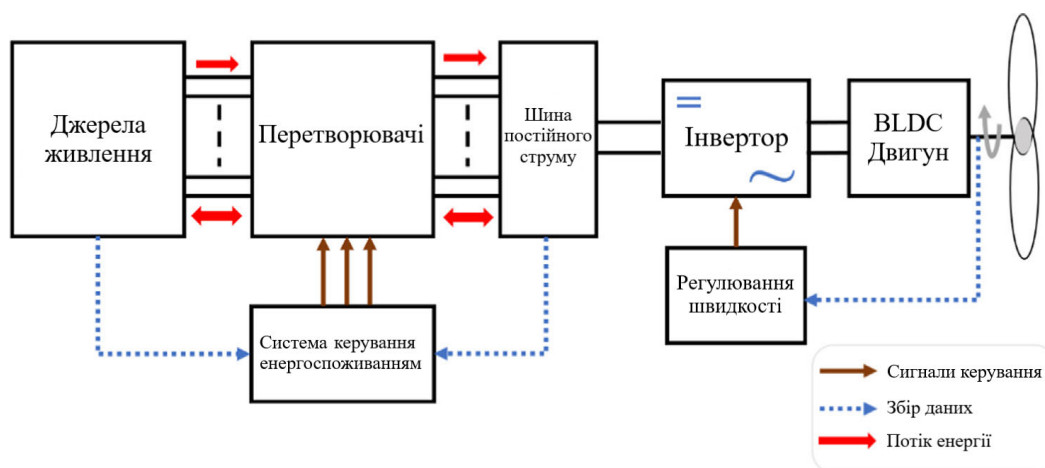


Рис. 2 Блок-схема силової частини типового БПЛА

На Рис. 3 проілюстровані часові діаграми струму, напруги, активної і неактивної складових потужності, що споживаються з мережі для живлення електровоза ДЕ1. Видно, що при різкій зміні режимів роботи тягових установок присутня суттєва складова обмінної потужності в системі електродвигун-мережа. Подібні процеси характерні практично для будь-якого електротранспорту і пов'язані з наявністю значної кількості реактивних елементів в системах живлення, а також частою зміною параметрів навантаження.

Зазначені вище фактори особливо помітні в системах живлення БПЛА. Якщо розглянути класичну конструкцію квадрокоптера, то такий літальний апарат постійно підлаштовується для забезпечення стійкого положення по трьом координатах, що реалізується за допомогою зміни швидкості обертів пропелерів, а відповідно і двигунів. Такий принцип

приводить до того, що значну кількість часу система живлення знаходиться в перехідному режимі, що додатково збільшує перетікання обмінної потужності.

III. ОБМІННА ЕНЕРГІЯ В СИСТЕМІ ЖИВЛЕННЯ ДРОНУ

Для прикладу аналізу обмінних процесів в системі живлення БПЛА обраний перетворювач на базі понижуючого ШПП, навантажений двигуном постійного струму. Схема заміщення такого джерела (Рис. 4) містить в собі акумулятор GB1 та його внутрішній опір R1, а також схему заміщення двигуна, яка складається з індуктивності якоря, його опору та джерела зворотної напруги.

Значення активної потужності, яка споживається двигуном може бути розрахована виходячи з середніх значень напруги і струму акумулятора:



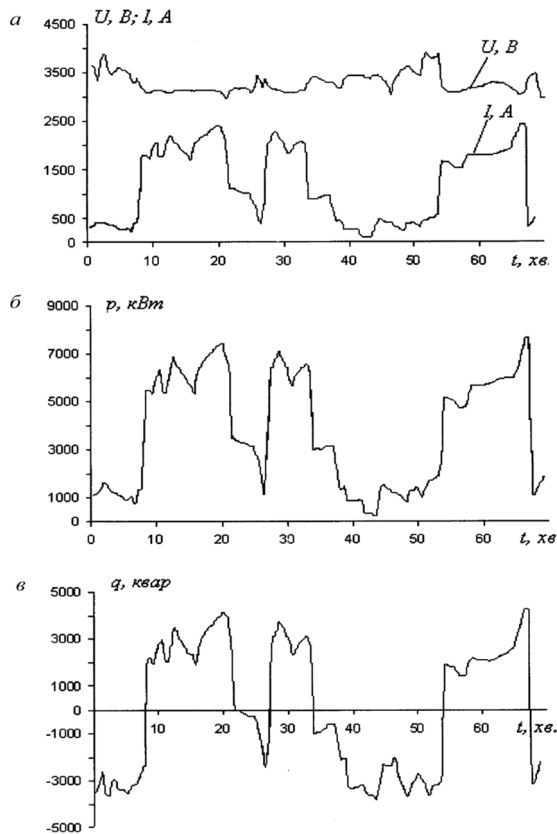


Рис. 3 Електротранспорт: часові діаграми

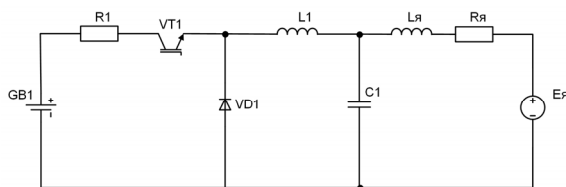


Рис. 4 Спрощена схема живлення двигуна БПЛА

$$P = E_a I_a,$$

де I_a – середнє значення споживаного струму

$I_a = \frac{1}{T} \int i_a(t) dt$. В подальших розрахунках припущено,

що напруга акумулятора незмінна.

Значення обмінної потужності виражається, як різниця повної і активної потужності:

$$q(t) = E_a i_a(t) - E_a I_a. \quad (1)$$

З аналізу схеми на рис. 6 виведена часова залежність струму акумулятора:

$$i_a(t) = \frac{E_a t - L_я i_я(t) - i_я(t) R_я t - E_я t}{R_1 t + L_1}, \quad (2)$$

де $I_я$ – струм якоря двигуна.

Звідси, значення обмінної потужності в даній системі:

$$q(t) = E_a \frac{E_a t - L_я i_я(t) - i_я(t) R_я t - E_я t}{R_я t + L_1} - E_a I_a. \quad (3)$$

Таким чином, значення обмінної потужності в даній системі:

$$q(t) = E_a \frac{E_a t - L_я i_я(t) - i_я(t) R_я t - E_я t}{R_я t + L_1} - E_a I_a. \quad (4)$$

Як вже зазначалося раніше, система зазнає постійних змін струму навантаження, тому при врахуванні цього явища:

$$q(t) = E_a \left[\frac{\frac{E_a t - L_я (i_я(t) + \Delta I_я)}{R_я t + L_1} - \frac{(i_я(t) + \Delta I_я) R_я t - E_я t}{R_я t + L_1}}{R_я t + L_1} \right] - E_a I_a. \quad (5)$$

Таким чином, очевидна присутність додаткової обмінної потужності, пов'язаної зі зміною параметрів навантаження.

ВИСНОВКИ

Отримані результати наочно ілюструють проблему наявності обмінної енергії в системі живлення безпілотного літального апарату, що в підсумку призводить до зменшення тривалості польоту. Для зменшення впливу наведеного явища необхідно модифікувати систему електроживлення шляхом додавання ланок компенсації неактивної складової потужності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] N. Darwin, A. Ahmad, and W. A. A. Wan Mohd Akib, "The Potential of Low Altitude Aerial Data for Large Scale Mapping", *Jurnal Teknologi*, vol. 70, no. 5, Sep. 2014. DOI: [10.11113/jtv70.3523](https://doi.org/10.11113/jtv70.3523).
- [2] K. Kaya and Y. Hames, "A Study on Fuel Cell Electric Unmanned Aerial Vehicle", in *2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)*, Elazig, Turkey, 2019, pp. 1–6. DOI: [10.1109/ICPEA1.2019.8911131](https://doi.org/10.1109/ICPEA1.2019.8911131).
- [3] M. Kim, S. Lee, and S. Bae, "Decentralized Power Management for Electrical Power Systems in More Electric Aircrafts", *Electronics*, vol. 7, no. 9, p. 187, Sep. 2018. DOI: [10.3390/ELECTRONICS7090187](https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS7090187).
- [4] R. Szabolcsi, "Beyond Training Minimums – A New Concept of the UAV Operator Training Program", *International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION*, vol. 22, no. 3, pp. 560–566, Jun. 2016. DOI: [10.1515/kbo-2016-0096](https://doi.org/10.1515/kbo-2016-0096).
- [5] M. N. Boukoberine, Z. Zhou, and M. Benbouzid, "A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects", *Applied Energy*, vol. 255, p. 113823, Dec. 2019. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.113823](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113823).



- [6] S. Nijandan, G. Gokulakrishnan, R. Nagendra Prasad, S. Mahendran, and P. S. B. Kirubakaran, "Autonomous Onboard Power Generation System in Uavs for Long Range", *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT)*, vol. 04, no. 02, Jan. 2015. URL: <https://www.ijert.org/autonomous-onboard-power-generation-system-in-uavs-for-long-range>.
- [7] O. Solomon and P. Famouri, "Dynamic Performance of a Permanent Magnet Brushless DC Motor for UAV Electric Propulsion System - Part I", in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Paris, France, 2006, pp. 1400–1405. DOI: [10.1109/IECON.2006.347808](https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347808).
- [8] N. A. Kostin and O. H. Sheikina, "The signs of availability of exchange power in electric traction circuits of the direct current system", *STP*, no. 42, pp. 98–102, Dec. 2012. URL: <http://stp.diit.edu.ua/article/view/9295> DOI: [10.15802/stp2012/9295](https://doi.org/10.15802/stp2012/9295).
- [9] Kostyn N. A.; Sablyn O. Y., "Reaktyvnaia moshchnost v systemakh elektrycheskoho transporta postoiannoho toka," *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu : zb. nauk. prats*, vol. 2, no. 15, pp. 75-80, 2005. URL: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/1220>.
- [10] Y. A. Yatsenko, V. E. Tonkal, A. V. Novoseltsev, S. P. Denisyuk, V. Y. Zhuykov, and V. T. Strelkov, *Balans energii v elektricheskikh tsepyah*. Kyiv: Nauk. dumka, 1992.

Надійшла до редакції 10 лютого 2022 р.

Прийнята до друку 27 квітня 2022 р.

UDC 621.314

Analysis of Exchange Power in the Power System of Drone

D. A. Mykolaiets, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-9152-8593](https://orcid.org/0000-0002-9152-8593)

Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Kyiv, Ukraine

Abstract—The classification of drones - both military and civilian according to the relevant criteria - is presented. Block diagrams of a typical unmanned aerial vehicle and its power system are shown. Typically, a drone power system of the "micro", "mini" or "short range" category, according to the UVS international classification, is a set of DC / DC converters with a microprocessor control system. The power source for such aircraft is usually a battery, less often - fuel cells. During the flight, the engine speed is variable, and its change depends not only on changes in flight speed or direction, but also on weather conditions, such as wind, as the stabilization system constantly aligns the drone. This leads to the fact that the power supply system of such a device is actually a significant part of the time in transition condition. This leads to a significant content of the component of exchange energy that battery consumed which in turn will increase losses, and thus reduces the range of the unmanned aerial vehicle. The phenomenon of the occurrence of exchange power in the power supply systems of electric vehicles which powered from DC sources and specifically in the power supply system of an unmanned aerial vehicle is analyzed. The time diagrams of current, voltage, active and inactive components of power consumed from the mains power supply network of electric locomotive DE1 are illustrated. It can be seen that with a sharp change in the modes of operation of traction units there is a significant component of exchange power in the motor-network system. Such processes are typical for almost any electric vehicle and are associated with the presence of a significant number of reactive elements in the power supply systems, as well as frequent changes in load parameters. A block diagram of a typical unmanned aerial vehicle is presented. The unmanned aerial vehicle system consists of three parts: the air part, the unmanned aerial vehicle itself, the ground control station, which can be autonomous or manned, the control system, which provides communication and data transmission. The block diagram of the power system of a typical unmanned aerial vehicle is presented. A simplified schematic diagram of the DC motor power supply system is presented. The relations for determining the amount of exchange power in the power supply system of an unmanned aerial vehicle are derived. It is concluded that to reduce the impact of this phenomenon, it is necessary to modify the power supply system by adding compensation units of inactive power component.

Keywords — drone; unmanned aerial vehicle; exchange power; electric vehicles.

