

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-420-429](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-420-429)

УДК 631.937.33

**Сергій Вікторович Єрмолов<sup>1</sup>, Данііл Юрійович Денисов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)E-mail: [sergey.ermolow@gmail.com](mailto:sergey.ermolow@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>

ResearcherID: MBI-0037-2025

<sup>2</sup>здобувач вищої освіти

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [den.danya.denysov@gmail.com](mailto:den.danya.denysov@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1887-068X>

Scopus Author ID: 59810175100

## МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМ КВАДРОКОПТЕРА

*Розвиток сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вимагає підвищення надійності та ефективності їхніх електроенергетичних систем. У статті досліджено метод моделювання електроенергетичних процесів у системі квадрокоптера, що дозволяє оцінити зміну напруги, струму та енергоспоживання в різних умовах польоту. Проведено аналіз впливу маси корисного навантаження, швидкості руху та форми траєкторії на стабільність роботи квадрокоптера та тривалість автономного польоту. Показано, що використання математичного моделювання дає можливість оптимізувати систему живлення й підвищити ефективність експлуатації безпілотного апарата.*

*Ключові слова: квадрокоптер; електроенергетичні процеси; моделювання; енергоспоживання; стабільність роботи; оптимізація живлення; безпілотні літальні апарати; MATLAB.*

*Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 13.*

**Актуальність теми дослідження.** Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА), зокрема квадрокоптери, набувають дедалі більшого поширення в різних сферах, включаючи аграрний сектор, екологічний моніторинг, інфраструктурний аудит та рятувальні операції. Однією з ключових складових ефективної експлуатації таких апаратів є їхня енергетична автономність та оптимізація споживання енергії. За даними дослідження “Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis”, середнього класу квадрокоптер вагою 4,689 кг використовували як тестову платформу для моделювання енергоспоживання під час маневрів, демонструє значну енергоефективність при використанні спеціально розроблених динамічних моделей для аналізу споживання енергії під час тривалих польотів на відкритому повітрі [1; 2].

Моделювання енергетичних процесів у квадрокоптерах є важливим інструментом для прогнозування тривалості польоту, оптимізації використання акумуляторних батарей та зменшення ризику втрат енергії під час маневрів. Використання спеціалізованих програмних середовищ для створення таких моделей дозволяє враховувати вплив багатьох факторів, включаючи атмосферні збурення, параметри системи керування та експериментальні дані, що забезпечує більш точний аналіз енергетичних процесів [3-5]. Зважаючи на високі вимоги до енергетичної ефективності квадрокоптерів, особливо в умовах обмеженого часу автономного польоту, дослідження в галузі моделювання енергетичних процесів є надзвичайно актуальними. Розробка та вдосконалення таких моделей сприятиме підвищенню надійності та ефективності безпілотних літальних апаратів, що, своєю чергою, розширить їхнє застосування в різних сферах діяльності [6].

**Постановка проблеми.** Квадрокоптери потребують надійних електроенергетичних систем для забезпечення стабільної та безпечної роботи під час польотів у різних сферах. Сучасні квадрокоптери мають складні системи живлення, що включають акумуляторні батареї, електроприводи та контролери, які повинні ефективно взаємодіяти між собою для підтримки необхідного рівня енергії протягом усього часу польоту.

З розвитком технологій, інтеграції нових акумуляторів, удосконалення систем управління та автоматизації польоту, квадрокоптери стали більш автономними та енергоефективними. Це дозволяє збільшувати тривалість польоту, підвищувати стабільність під час виконання маневрів і зменшувати ризик аварійних ситуацій. Однак навіть за сучасного рівня розвитку існує потреба у точному прогнозуванні роботи електроенергетичних систем у реальних умовах, що включає зміну навантажень, швидкостей та висоти польоту.

Сьогодні методи моделювання електроенергетичних процесів у квадрокоптерах залишаються недостатньо дослідженими. Особливо актуальною є відсутність комплексних моделей, що враховують вплив маси корисного навантаження, швидкості польоту та форми траєкторії на енергоспоживання. Це ускладнює оптимізацію системи живлення та підвищення надійності польотів, що обмежує можливості практичного застосування квадрокоптерів у складних та критично важливих умовах. Тому виникає необхідність у розробці ефективних методів моделювання електроенергетичних процесів, які дозволять аналізувати роботу системи живлення, прогнозувати витрати енергії та оптимізувати роботу квадрокоптера для підвищення його ефективності та надійності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема енергетичної ефективності безпілотних літальних апаратів, зокрема квадрокоптерів, останніми роками привертає значну увагу науковців. У низці праць розглядається питання моделювання енергоспоживання та впливу конструктивних і експлуатаційних параметрів на тривалість польоту.

У роботі Hoffmann G. M. було проведено детальний аналіз динаміки квадрокоптера та представлено методи математичного моделювання, які стали основою для подальших досліджень у цій сфері [7]. У монографії Beard і McLain наведено комплексний опис теоретичних основ керування малими безпілотними апаратами, включаючи енергетичні аспекти роботи електроприводів [8]. У більш нових дослідженнях зосереджено увагу безпосередньо на моделюванні енергоспоживання. Так, у праці Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis було представлено модель квадрокоптера середнього класу масою 4,689 кг для оцінки споживання енергії під час польотів за різних умов. Автори показали, що використання динамічних моделей дозволяє більш точно прогнозувати витрати енергії та визначити оптимальні режими роботи [1].

Окрему увагу приділено дослідженню впливу параметрів акумуляторних батарей та гвинтомоторних груп на ефективність систем живлення квадрокоптерів. У роботі Mahony, Kumar і Corke розглянуто питання оцінки та керування багатороторними апаратами, що безпосередньо пов'язано з оптимізацією енергетичних процесів [9]. Попри наявність значної кількості досліджень, питання комплексного аналізу енергоспоживання квадрокоптера з урахуванням маси корисного навантаження, швидкості польоту та форми траєкторії залишаються недостатньо вивченими. Саме тому доцільним є розроблення моделей, які б дозволяли прогнозувати витрати енергії з урахуванням цих параметрів та формувати практичні рекомендації щодо оптимізації роботи квадрокоптерів.

**Мета дослідження.** Метою даного дослідження є застосування методу моделювання електроенергетичних процесів у системі квадрокоптера для оцінки впливу основних параметрів польоту на енергоспоживання. Зокрема, поставлено завдання проаналізувати зміну стану заряду акумулятора та споживаного струму залежно від маси корисного навантаження, швидкості руху та форми траєкторії.

Реалізація цієї мети дозволяє визначити ключові фактори, що впливають на тривалість автономного польоту, та сформувані практичні рекомендації щодо оптимізації системи живлення квадрокоптера для підвищення його ефективності та надійності.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри наявність значної кількості праць, присвячених моделюванню та аналізу роботи безпілотних літальних

апаратів, низка аспектів електроенергетичних процесів у квадрокоптерах залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, більшість наявних моделей фокусуються або на аеродинамічних властивостях апарата, або на оптимізації системи керування, тоді як питання комплексного врахування енергетичних параметрів під час виконання реальних польотних завдань висвітлено фрагментарно.

Окремою проблемою є обмежена кількість досліджень, що аналізують вплив маси корисного навантаження, профілю траєкторії та швидкісних режимів на миттєве споживання струму та динаміку зміни рівня заряду акумулятора. Більшість наявних робіт описують ці залежності лише теоретично або на основі спрощених моделей, що не забезпечує достатньої точності при прогнозуванні автономності польоту. Недостатньо опрацьованими також залишаються питання взаємодії між електромеханічними процесами у двигунах, втратами на пропелерах, ефективністю перетворення енергії та реакцією системи керування в умовах змінних навантажень. Саме комплексне моделювання цих явищ у єдиному середовищі, зокрема MATLAB/Simulink, розглядається як перспективний напрям, але потребує подальшого розвитку та практичного підтвердження. Таким чином, потребує уточнення і подальшого дослідження вплив польотних параметрів на енергетичні характеристики квадрокоптера, а також формування узагальненої методики, що дозволить оцінювати енергоспоживання апарата у різних сценаріях реальної експлуатації.

**Виклад основного матеріалу.** Розвиток безпілотних літальних апаратів, зокрема квадрокоптерів, відкрив широкі можливості їх застосування в різних сферах діяльності людини – від аерофотознімання та моніторингу місцевості до доставки вантажів і виконання наукових експериментів [10]. Незважаючи на конструктивну простоту та високу маневровість, квадрокоптери характеризуються обмеженим часом автономної роботи, що визначається запасом енергії акумуляторної батареї [9]. Саме тому дослідження енергетичних процесів у їхніх системах є надзвичайно актуальним для підвищення ефективності використання таких апаратів.

У загальному випадку тривалість польоту та рівень енергоспоживання квадрокоптера залежать від низки факторів: маси апарата з корисним навантаженням, швидкості руху, форми та складності траєкторії, а також режимів роботи електроприводів [8; 11]. Зміна будь-якого з цих параметрів призводить до відчутних відмінностей у витратах енергії, що може вплинути як на час автономного польоту, так і на можливість виконання поставленого завдання. Для дослідження цих процесів використовується математичний опис взаємозв'язку між електричними та механічними величинами системи квадрокоптера. Зокрема, важливим є аналіз залежностей між струмом і напругою живлення двигунів, споживаною потужністю та сумарною енергією, що витрачається під час виконання польоту [7]. Такі співвідношення дозволяють оцінити характер зміни енергетичних параметрів у різних умовах та сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних режимів роботи.

Енергетичні процеси в системі квадрокоптера визначаються взаємодією електричних параметрів джерела живлення та механічних характеристик електроприводів. Основними елементами, що споживають енергію, є безколекторні двигуни постійного струму, які через пропелери створюють підйомну силу. Для опису цих процесів застосовується низка класичних залежностей електротехніки та механіки [8; 9].

1. Рівняння електричного кола двигуна:

$$U = E + I \cdot R \quad (1)$$

де  $U$  – напруга живлення обмотки двигуна;  $E$  – електрорушійна сила, що виникає при обертанні ротора;  $I$  – струм, споживаний двигуном;  $R$  – активний опір обмотки.

Це рівняння показує баланс між прикладеною напругою, внутрішніми втратами та корисною ЕРС, що відображає перетворення електричної енергії на механічну.

2. Зв'язок частоти обертання і кутової швидкості:

$$\omega = \pi n, \quad (2)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість ротора (рад/с);  $n$  – частота обертання вала двигуна (об/с). Цей вираз дозволяє перейти від електричних характеристик двигуна до механічних, що важливо для визначення тяги пропелерів.

3. Момент двигуна через струм:

$$T = k_t \cdot I, \quad (3)$$

де  $T$  – електромагнітний момент двигуна;  $k_t$  – коефіцієнт моменту (характеризує перетворення струму в момент). Формула підкреслює, що керування струмом безпосередньо впливає на створювану тягу квадрокоптера.

4. Потужність двигуна:

$$P = U \cdot I, \quad (4)$$

де  $P$  – споживана потужність.

Ця залежність є ключовою для аналізу енергетичних процесів, оскільки дозволяє обчислити миттєве навантаження на джерело живлення.

5. Енергія, витрачена під час польоту:

$$W = \int P dt, \quad (5)$$

де  $W$  – сумарна енергія, спожита квадрокоптером;  $t$  – час польоту.

Цей вираз дає можливість визначити повний обсяг енергії, необхідної для виконання місії. Він безпосередньо пов'язаний із ємністю акумулятора та часом автономної роботи апарата.

Значення параметрів, що використовувалися для розрахунків наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Список параметрів, що використовувалися для розрахунків

№	Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
1	Маса квадрокоптера (без навантаження)	$m_{drone}$	1,2726	кг
2	Ємність акумулятора	$C_{bat}$	22,8	А·год
3	Максимальна потужність двигуна	$P_{max}$	160	Вт
4	Максимальний крутний момент двигуна	$T_{max}$	0,8	Н·м
5	Постійна часу двигуна	$r$	0,02	С
6	ККД двигуна (номінальний)	$\eta$	≈83	%
7	Діаметр пропелера	$D$	0,254	м
8	Коефіцієнт підйомної сили пропелера	$K_{thrust}$	0,1072	-
9	Коефіцієнт опору пропелера	$K_{drag}$	0,01	-
10	Густина повітря	$\rho_{air}$	1,225	Кг/м <sup>3</sup>
11	Температура повітря	$T_{air}$	298 (25 °С)	К
12	Коефіцієнт аеродинамічного опору по осі X	$C_{dX}$	0,35	-
13	Коефіцієнт аеродинамічного опору по осі Y	$C_{dY}$	0,35	-
14	Коефіцієнт аеродинамічного опору по осі Z	$C_{dZ}$	0,6	-

Результати розрахунків

Одним із ключових факторів, що впливає на енергоспоживання квадрокоптера, є маса корисного навантаження [13]. Для аналізу було проведено серію розрахунків зі змінною масою вантажу в діапазоні від 0,5 до 2,2 кг. Результати наведено на рис. 1.

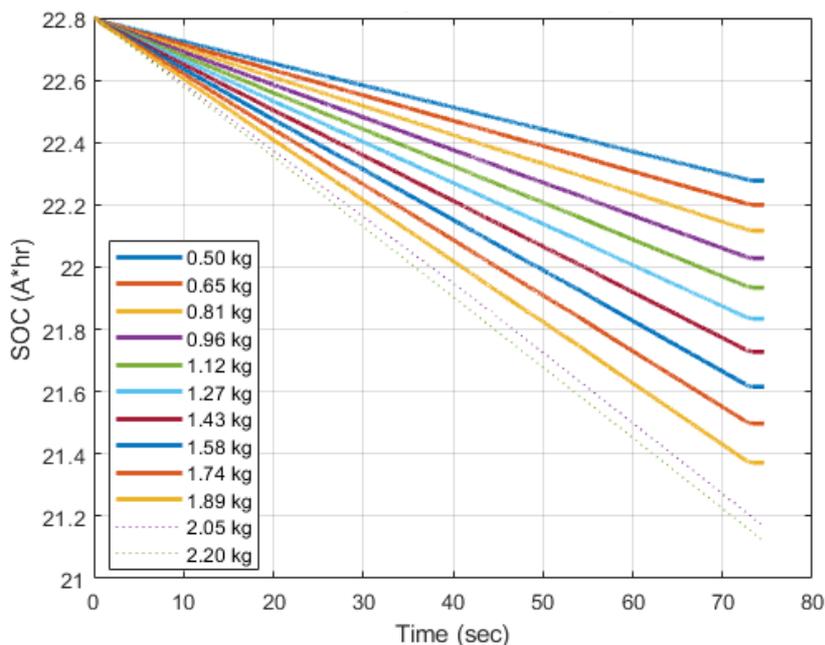


Рис. 1. Вплив маси корисного навантаження на рівень заряду акумулятора

На графіку наведено залежність стану заряду акумулятора (SOC) від часу для різних значень маси вантажу. Кожна крива відповідає окремому сценарію польоту з різною вагою вантажу. З результатів видно, що збільшення маси призводить до значного прискорення розрядження батареї. Це пояснюється тим, що при більшій вазі квадрокоптер повинен створювати вищу підйомну силу, а отже, двигуни споживають більший струм. Відповідно до формули (3) для створення більшого моменту (а отже, і тяги) потрібно збільшення струму  $I$ , що безпосередньо відображається у рівнянні миттєвої потужності (4).

Таким чином, при більшій масі вантажу відбувається підвищення потужності, яку споживає система, і як наслідок – швидше зменшення SOC.

На рис. 2 наведено накладені траєкторії польоту для різних значень маси вантажу.

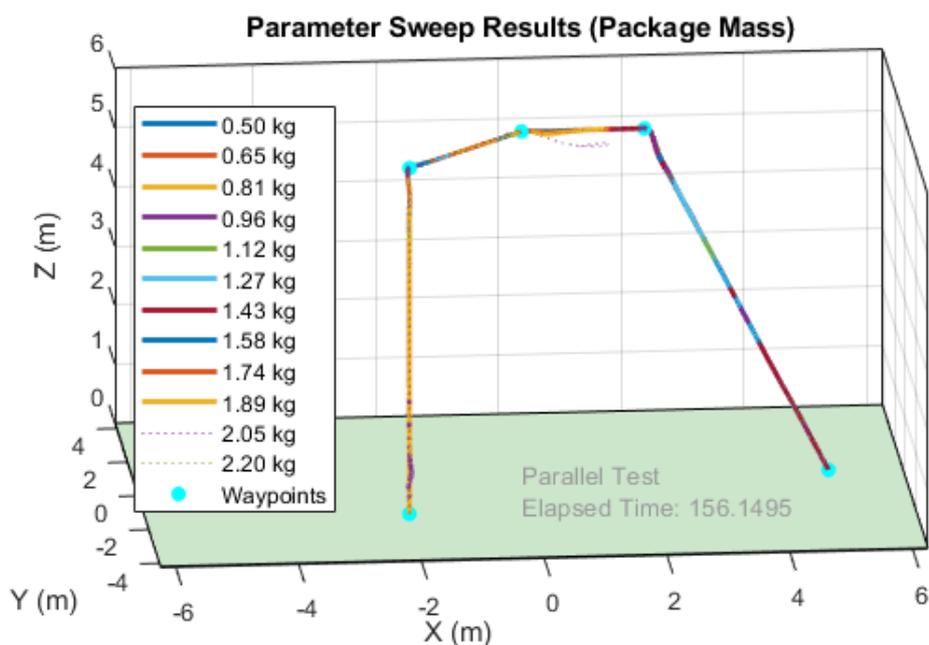


Рис. 2. Накладання траєкторій польоту для різних значень маси корисного навантаження

Видно, що при збільшенні навантаження траєкторія стає менш стабільною: з'являються відхилення від еталонного маршруту, а в окремих випадках квадрокоптер опускається нижче очікуваного рівня висоти. Ці відхилення пояснюються тим, що для підтримання рівноваги при більшій масі двигуни повинні створювати вищу тягу, що потребує збільшення струму споживання. При цьому система керування змушена вносити частіші корекції в положення та швидкість апарата.

Іншим важливим фактором, що визначає енергоспоживання квадрокоптера, є швидкість руху по траєкторії. Для дослідження було виконано параметричний аналіз при різних швидкостях польоту. Результати зображено на рис. 3.

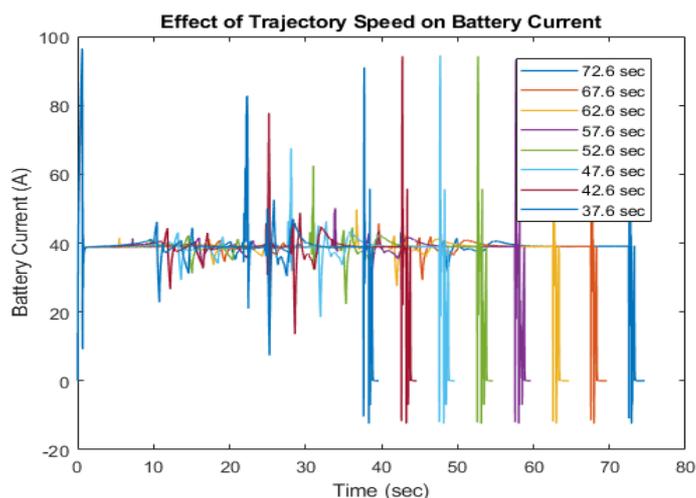


Рис. 3. Вплив швидкості руху по траєкторії на струм, споживаний акумулятором

На графіку наведено зміни струму акумулятора залежно від часу для різних швидкостей польоту. Криві показують, що зі зростанням швидкості збільшується як середнє значення струму, так і його пікові значення. Найбільш інтенсивні стрибки спостерігаються у моменти маневрів та зміни напрямку руху. З позиції теоретичних співвідношень, це відповідає рівнянню (4) де зростання струму  $I$  при незмінній напрузі живлення призводить до збільшення миттєвої потужності  $P$ . Таким чином, при вищих швидкостях польоту акумулятор працює в режимах з підвищеним навантаженням, що може створювати додаткові теплові проблеми.

На рис. 4 видно залишковий рівень заряду батареї (SOC) після виконання польоту з різними швидкостями.

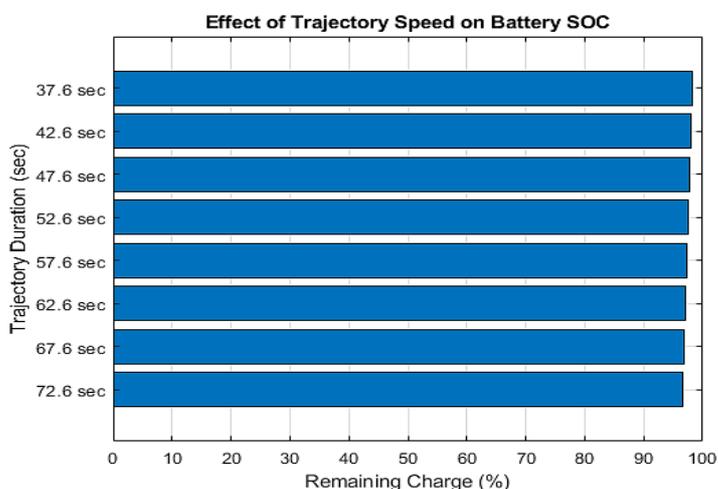


Рис. 4. Вплив швидкості польоту на залишковий рівень заряду акумулятора

Чітко видно, що чим вищою є швидкість руху, тим менший залишковий заряд після завершення місії. Це пояснюється тим, що при швидшому русі квадрокоптер витрачає більше енергії на підтримку стабільності та подолання аеродинамічного опору. Таким чином, збільшення швидкості польоту призводить до двох наслідків:

- зростання пікових струмів, що підвищує миттєве енергоспоживання;
- більш швидке зниження SOC, що скорочує загальну тривалість польоту.

Практично це означає, що при виборі режимів руху необхідно враховувати компроміс між швидкістю доставки та часом автономної роботи квадрокоптера.

Крім маси навантаження та швидкості руху, на енергоспоживання квадрокоптера впливає геометрія траєкторії польоту. Для дослідження було обрано два різних маршрути: «Zig-Zag» (зі значною кількістю поворотів і маневрів) та «L-shaped» (із простішою формою). Результати зображено на рис. 5.

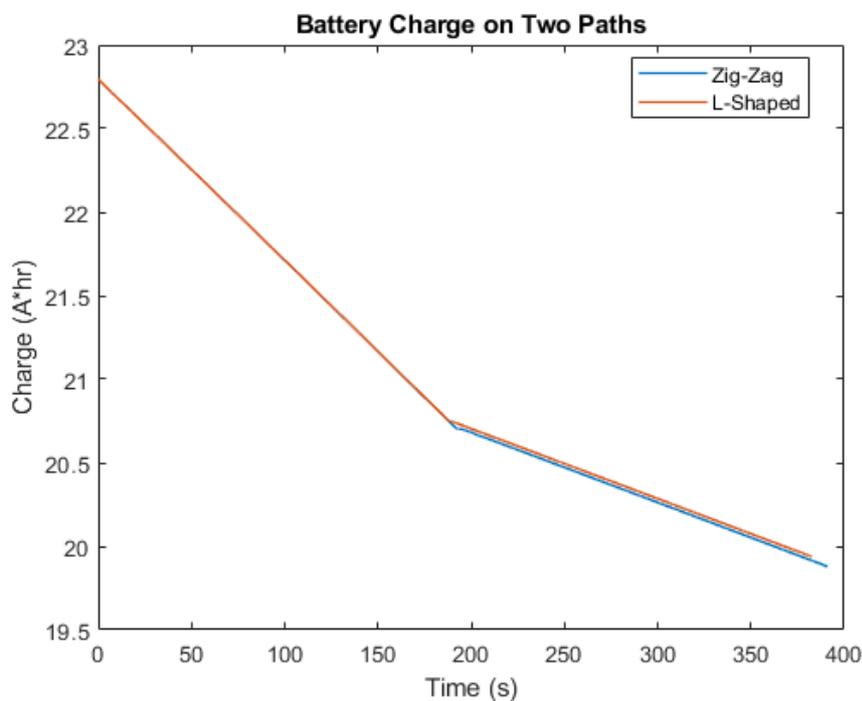


Рис. 5. Порівняння зміни заряду батареї для двох варіантів траєкторій польоту

На графіку наведено залежність зміни заряду акумулятора (в ампер-годинах) від часу для двох розглянутих маршрутів. Видно, що при русі за траєкторією типу «Zig-Zag» витрати енергії є більшими, ніж при польоті за маршрутом «L-shaped». Це пояснюється тим, що часті зміни напрямку потребують від двигунів додаткових зусиль для стабілізації апарата, що призводить до зростання споживаного струму.

Фізично цей ефект узгоджується з виразами (3) та (4) Оскільки в моменти маневрів збільшується потрібний момент  $T$ , відповідно зростає струм  $I$ , що викликає короточасні піки потужності  $P$ . При множинних маневрах ці пікові навантаження накопичуються й значно прискорюють розряд акумулятора.

Отже, проведений аналіз залежності споживання енергії від форми траєкторії показав, що складні маршрути з частими маневрами призводять до зростання миттєвих струмових навантажень та швидшого зниження рівня заряду акумулятора. Порівняння двох шляхів демонструє, що траєкторії зі збільшеною кількістю поворотів формують додаткові енергетичні витрати, що узгоджується з відомими моделями динаміки квадрокоптерів. Таким чином, форма траєкторії є суттєвим фактором, який необхідно враховувати під час планування польотних завдань.

**Висновки.** Проведене дослідження електроенергетичних процесів у системі квадрокоптера дозволило встановити декілька важливих закономірностей:

1. **Маса корисного навантаження** має прямий вплив на витрати енергії. Зі збільшенням маси відбувається зростання струму споживання двигунами, що призводить до швидшого зниження стану заряду (SOC) та скорочення часу автономної роботи.

2. **Швидкість польоту** визначає як середній рівень енергоспоживання, так і пікові навантаження на систему. При підвищенні швидкості зростають пікові струми, що супроводжується підвищенням миттєвої потужності та швидшим розрядженням батареї. Це створює додаткові вимоги до вибору джерела живлення й системи охолодження.

3. **Форма маршруту** також є важливим фактором. Складні траєкторії з великою кількістю маневрів («Zig-Zag») вимагають більших енергетичних витрат у порівнянні з простішими («L-shaped»), навіть при однаковій довжині шляху. Це пояснюється частими корекціями положення та орієнтації квадрокоптера.

Загалом отримані результати підтверджують правильність теоретичних співвідношень між електричними та механічними величинами та демонструють їх практичне значення для оцінки ефективності роботи квадрокоптера. На основі цих висновків можна сформулювати рекомендації щодо планування місій: оптимізація маси вантажу, вибір помірних швидкостей та спрощення траєкторій здатні значно збільшити тривалість автономного польоту.

**Перспектива подальших досліджень.** Отримані результати підтверджують важливість урахування маси вантажу, швидкості руху та форми маршруту при аналізі електроенергетичних процесів квадрокоптера. Водночас проведене дослідження відкриває багато напрямів для подальшої роботи.

1. **Розширення моделі живлення.** Доцільним є врахування детальніших характеристик акумулятора, зокрема залежності внутрішнього опору від рівня заряду та температури. Це дозволить точніше оцінювати динаміку розрядження в реальних умовах експлуатації.

2. **Урахування зовнішніх впливів.** Перспективним є моделювання впливу поривів вітру, зміни температури навколишнього середовища та аеродинамічних збурень, що можуть суттєво впливати на споживання енергії.

3. **Аналіз системи керування.** Важливим напрямом є дослідження ефективності алгоритмів стабілізації та навігації, оскільки їхня робота визначає характер струмових піків і загальну економію енергії під час польоту.

4. **Використання альтернативних джерел живлення.** Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оцінку застосування високоефективних літій-полімерних та літій-сірчаних акумуляторів, а також гібридних рішень (поєднання акумуляторів із сонячними панелями чи паливними елементами).

5. **Практичні експерименти.** Наступним кроком є експериментальна перевірка результатів моделювання на реальному зразку квадрокоптера. Це дозволить верифікувати модель та зробити висновки щодо її точності й застосовувати їх у практичних завданнях.

### **Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.**

Під час написання наукової статті в деяких випадках був використаний штучний інтелект (GPT-5). ШІ дозволяє швидше знайти потрібну інформацію, яка була перевірена та вказана в списку використаних джерел.

#### **Список використаних джерел**

1. Jacewicz, M., Żugaj, M., Głębocki, R., & Bibik, P. (2022). Quadrotor model for energy consumption analysis. *Energies*, 15(19), 7136. <https://doi.org/10.3390/en15197136>.
2. Ghafir, S., Alam, M. A., Siddiqui, F., & Naaz, S. (2023). Load balancing in cloud computing via intelligent pso-based feedback controller. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 100948. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100948>.

3. Тихоміров, М. Н. Р. (2025). *Моделивання процесів керування безпілотних літальних апаратів*. ЧНУ ім. П. Могили. <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2935/1/%D0%A2%D1%96%D1%85%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%9C%D0%9D%D0%A0.pdf>.
4. Data-efficient modeling for power consumption estimation of quadrotor operations using ensemble learning. (2023). *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 39, 100687. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1270963823006879>.
5. Betancourt, H., Rahman, A., & Vasant, P. (2024). Predicting power consumption of drones using explainable optimized mathematical and machine learning models. *The Journal of Supercomputing*. <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07105-0>.
6. Choudhury, S., & Prasad, R. (2023). *A comparative study on energy consumption models for drones*. SSRN. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4356073](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4356073).
7. Hoffmann, G., Huang, H., Waslander, S., & Tomlin, C. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. In *AIAA guidance, navigation and control conference and exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>.
8. Beard, R., & McLain, T. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
9. Mahony, R., Kumar, V., & Corke, P. (2012). Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), 20-32. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6290694>.
10. Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>.
11. Zhang, J., Campbell, J. F., Sweeney II, D. C., & Hupman, A. C. (2021). Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102668. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102668>.
12. Grewe, L., Dreier, D., & Heuermann, H. (2022). Drone flight data reveal energy and greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 13, 4829. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32486-0>.
13. Kierzkowski, A., Dziewoński, B., Kaliszuk, K., & Kucharski, M. (2025). Evaluation of light electric flying-wing unmanned aerial system energy consumption during holding maneuver. *Energies*, 18(5), 1300. <https://doi.org/10.3390/en18051300>.

## References

1. Sánchez-García, J., Heredia, G., & Ollero, A. (2022). Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis. *Energies*, 15(19), 7136. <https://doi.org/10.3390/en15197136>.
2. Torabbeigi, M., Maghsoudi, A., & de Koster, R. (2023). Power consumption model for Unmanned Aerial Vehicles. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 39, 100948. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100948>.
3. Tikhomirov, M. (2021). *Modeliuvannia protsesiv keruvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ [Modeling of control processes of unmanned aerial vehicles]*. Petro Mohyla Black Sea National University. <https://krs.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2935/1/%D0%A2%D1%96%D1%85%D0%BE%D0%BC%D1%96%D1%80%D0%BE%D0%B2%20%D0%9C%D0%9D%D0%A0.pdf>.
4. Data-efficient modeling for power consumption estimation of quadrotor operations using ensemble learning. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 39, 100687 (2023). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1270963823006879>.
5. Betancourt, H., Rahman, A., & Vasant, P. (2024). Predicting power consumption of drones using explainable optimized mathematical and machine learning models. *The Journal of Supercomputing*. <https://doi.org/10.1007/s11227-025-07105-0>.
6. Choudhury, S., & Prasad, R. (2023). A Comparative Study on Energy Consumption Models for Drones. *SSRN Electronic Journal*. [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4356073](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4356073).
7. Hoffmann, G. M., Huang, H., Waslander, S. L., & Tomlin, C. J. (2007). Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2007-6461>.
8. Beard, R., & McLain, T. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
9. Mahony, R., Kumar, V., & Corke, P. (2012). Multirotor Aerial Vehicles: Modeling, Estimation, and Control. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), 20–32. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6290694>.

10. Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>.
11. Al Zamil, A. M., & Jaradat, M. A. (2020). Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102418. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102418>.
12. Grewe, L., Dreier, D., & Heuermann, H. (2022). Drone flight data reveal energy and greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 13, 4829. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9403403>.
13. Kierzkowski, A., Dziewoński, B., Kaliszuk, K., & Kucharski, M. (2025). Evaluation of Light Electric Flying-Wing Unmanned Aerial System Energy Consumption During Holding Maneuver. *Energies*, 18(5), 1300. <https://doi.org/10.3390/en18051300>.

Дата першого надходження статті до видання: 30.10.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.11.2025

UDC631.937.33

**Sergey Yermolov<sup>1</sup>, Daniil Denisov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Postgraduate student of the Department of Electric Engineering and Information and Measuring Technologies  
National University «Chernihiv Polytechnic» (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [sergey.ermolow@gmail.com](mailto:sergey.ermolow@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>

ResearcherID: [MBI-0037-2025](https://orcid.org/0009-0002-8786-2430)

<sup>2</sup> Higher Education Student

National University «Chernihiv Polytechnic» (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [den.danya.denysov@gmail.com](mailto:den.danya.denysov@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1887-068X>

Scopus Author ID: [59810175100](https://orcid.org/0009-0006-1887-068X)

## WAYS TO MODEL THE ELECTROENERGY PROCESSES OF A QUADCOPTER SYSTEM

*The rapid development of unmanned aerial vehicles (UAVs), in particular quadcopters, requires ensuring high reliability and efficiency of their power supply systems. Since the duration of autonomous flight is strictly limited by battery capacity, accurate modeling of electrical energy consumption processes is crucial for predicting performance and optimizing system operation.*

*Quadcopters are complex technical systems which energy consumption depends on load mass, trajectory shape, and flight speed. However, the analysis of these dependencies is still insufficiently covered in scientific research, which limits the ability to optimize UAV operation.*

*Numerous works by researchers are devoted to UAV dynamics and control. For example, Hoffmann et al. (2007) presented quadrotor flight dynamics, and Mahony, Kumar & Corke (2012) described multirotor modeling and control. Recent studies focus on energy consumption, such as the Quadrotor Model for Energy Consumption Analysis (Sánchez-García et al., 2022), which demonstrated the effect of payload mass on battery discharge. However, comprehensive studies combining payload, trajectory, and speed remain scarce.*

*The combined influence of payload weight, trajectory parameters, and flight speed on UAV energy consumption has not yet been sufficiently studied. There is also a lack of models that would integrate these factors into a unified analysis of quadcopter electroenergy processes.*

*The objective of this study is to develop and apply a method of modeling electroenergy processes in a quadcopter system in order to evaluate how payload mass, flight trajectory, and speed affect energy consumption, current, and battery state of charge (SOC).*

*The research used MATLAB/Simulink models of a quadcopter system. Mathematical relationships between power, current, and energy were defined, and simulation results were analyzed. The obtained graphs demonstrate: the effect of payload mass on battery SOC; the effect of trajectory speed on battery current and SOC; the difference in battery charge for various flight paths. The analysis confirmed that an increase in payload mass or flight speed leads to higher energy consumption and faster battery discharge.*

*The conducted study confirmed that energy consumption of a quadcopter system strongly depends on payload mass, flight trajectory, and speed. Simulation results demonstrated clear correlations between these factors and battery performance, which allows for optimizing power supply systems and extending flight duration.*

**Keywords:** quadcopter; UAV; power supply; energy consumption; modeling; MATLAB/Simulink; battery SOC; optimization.

**Figures:** 5. **Tables:** 1. **References:** 13.