

**Ю. Л. Бондаренко**, канд. техн. наук

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0000-0003-0395-4275>

**І. А. Іщенко**

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0007-7150-1653>

## АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНА РОЗВІДУВАЛЬНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА І КЛАСУ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ БОЙОВИХ ЗАВДАНЬ

*У статті наведено результати аналізу режимів роботи електродвигуна розвідувальних безпілотних літальних апаратів І класу на основі телеметричних tlog-файлів, отриманих під час виконання польотів у зоні ведення бойових дій. Дослідження виконано на основі вибірки з 450 польотних журналів формату tlog, що забезпечує репрезентативність результатів та дозволяє оцінити реальні умови експлуатації безпілотних літальних апаратів. Основну увагу приділено оцінюванню рівномірності швидкості польоту.*

*Для оброблення телеметричних даних було розроблено спеціалізований програмний продукт tlog3, який забезпечує автоматизовану фільтрацію даних, формування узгоджених часових рядів параметрів польоту, згладжування випадкових шумів та побудову графіків зміни швидкості, сигналів керування й електричних параметрів силової установки. Для підвищення достовірності оцінювання в роботі застосовано критерій визначення рівномірності польоту, що ґрунтується на обмеженні відносної зміни швидкості між сусідніми вибірками телеметричних даних, із використанням ковзного середнього.*

*На основі аналізу отриманих графіків визначено структуру режимів польоту безпілотних літальних апаратів, зокрема частку часу перебування в режимах максимальної швидкості, усталеного (рівномірного) польоту та перехідних процесів. Встановлено, що значна частина польоту характеризується кусково-лінійною зміною швидкості, що створює передумови для оптимізації алгоритмів керування тягою електродвигуна.*

*Визначено основні фактори, що зумовлюють нерівномірність польоту, серед яких ключову роль відіграють маневрування безпілотних літальних апаратів, вплив атмосферних збурень та особливості роботи системи автоматичного керування. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення алгоритмів керування електродвигуном та підвищення енергоефективності розвідувальних безпілотних літальних апаратів І класу в умовах реальної експлуатації.*

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; телеметрія; електродвигун; режим польоту; енергоефективність; автопілот.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Безпілотні літальні апарати (БпЛА) І класу широко застосовують для виконання розвідувальних завдань у сучасних умовах ведення бойових дій. Одним із ключових показників ефективності таких систем є тривалість перебування в повітрі, яка визначає можливості проведення повітряної розвідки та спостереження.

Для БпЛА з електричною силовою установкою тривалість польоту безпосередньо залежить від енергетичних характеристик акумуляторної батареї та ефективності використання електричної енергії. Значну роль у цьому процесі відіграє режим роботи електродвигуна, який визначається алгоритмами керування автопілота та умовами виконання польоту.

Особливістю застосування розвідувальних БпЛА у зоні ведення бойових дій є складний характер траєкторії польоту, що включає численні маневри, зміну швидкості та висоти, а також вплив поривів вітру та турбулентності атмосфери. У результаті цього силова установка БпЛА працює в змінних режимах, що призводить до виникнення перехідних процесів у роботі електродвигуна.

Для підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів БпЛА необхідним є дослідження реальних режимів роботи силової установки на основі аналізу телеметричних даних польоту. Такі дослідження дозволяють визначити характерні режими польоту, оцінити частку часу перебування БпЛА у стабільних та перехідних режимах, а також встановити фактори, що призводять до зниження енергоефективності польоту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження у сфері БпЛА спрямовані на підвищення ефективності їх функціонування за рахунок удосконалення енергетичних систем, алгоритмів керування та методів оброблення телеметричної інформації. Особливе місце займає аналіз польотних телеметричних файлів формату tlog, які містять дані про режими роботи бортових систем, параметри руху та енергоспоживання.

У роботах [1, 2] показано, що розвиток БпЛА охоплює задачі керування, зв'язку, енергозабезпечення та оброблення даних.

Аналіз телеметричних даних є важливим етапом дослідження роботи БпЛА. У публікаціях [3, 4] розглянуто протокол MAVLink, що використовується в автопілотах ArduPilot та PX4. Показано, що телеметричні дані мають складну структуру та нерівномірну частоту надходження, що ускладнює їх оброблення.

У дослідженнях [5–7] розглянуто питання енергетичної ефективності БпЛА, зокрема з'ясовано, що обмеженість енергетичних ресурсів є одним із ключових факторів, що визначають тривалість польоту та ефективність виконання місій. Основні підходи включають оптимізацію траєкторії, управління ресурсами та розроблення енергоефективних алгоритмів зв'язку.

Статті [8, 9] присвячені процесам збирання та оброблення даних БпЛА. Встановлено, що телеметричні дані характеризуються нерівномірністю надходження, наявністю пропусків та шумів, що потребує застосування спеціальних методів попереднього оброблення, зокрема фільтрації та синхронізації.

У публікаціях [10–12] розглянуто застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу даних БпЛА. Встановлено, що використання великих

масивів телеметричних та сенсорних даних дозволяє вирішувати завдання класифікації, прогнозування та виявлення аномалій, однак такі підходи є обчислювально складними та не завжди придатними для оперативного аналізу.

У роботах [13–15] досліджено питання надійності та безпеки телеметричних систем, зокрема показано, що протокол MAVLink має низку вразливостей, що може призводити до перехоплення або модифікації даних, а отже, впливати на достовірність аналізу телеметрії.

У вітчизняних працях [16–18] розглянуто застосування БПЛА у військовій сфері. З'ясовано, що експлуатація здійснюється в умовах обмежених ресурсів та впливу завад, що потребує адаптації комерційних платформ. Водночас аналіз телеметричних даних реальних польотів у цих роботах висвітлено обмежено.

Отже, аналіз наукових джерел свідчить, що відомі підходи до дослідження режимів роботи БПЛА базуються переважно на теоретичних моделях або обмежених експериментальних даних. При цьому відсутні комплексні дослідження, які враховують великі масиви телеметричних tlog-файлів, отриманих у реальних, зокрема бойових, умовах експлуатації.

**Формулювання завдання дослідження.** Наукова новизна цього дослідження полягає у використанні масиву реальних польотних даних значного обсягу для виявлення статистичних закономірностей режимів роботи електродвигуна БПЛА, встановленні взаємозв'язків між сигналами керування автопілота та параметрами споживання струму двигуном, а також у формуванні критеріїв оцінювання рівномірності польоту, що дозволяє перейти від модельних оцінок до аналізу реальної експлуатації системи.

**Метою статті** є аналіз режимів роботи електродвигуна розвідувального БПЛА I класу на основі телеметричних tlog-файлів, отриманих під час виконання реальних бойових завдань у зоні ведення бойових дій, та визначення характерних ознак усталених і перехідних режимів для формування напрямів удосконалення алгоритмів автопілота та підвищення енергоефективності.

**Виклад основного матеріалу.** Для аналізу режимів роботи електродвигуна розвідувального БПЛА I класу використано телеметричні файли формату tlog, отримані під час виконання реальних бойових завдань у зоні ведення бойових дій. Вони формуються автопілотом у процесі польоту та містять часові послідовності параметрів навігації, стану систем, команд керування та даних електроживлення.

Для оцінювання режимів роботи силової установки та витрат енергії виконано аналіз трьох взаємопов'язаних параметрів:

- швидкості польоту;
- команди автопілота на електродвигун / регулятор;
- струму споживання.

Окремо зазначимо, що за наявною інформацією знижень напруги акумуляторної батареї не спостерігалось, отже, основні коливання струму та швидкості зумовлені не деградацією живлення, а режимами керування та умовами польоту.

Для оброблення телеметричних журналів польоту було розроблено спеціалізований програмний інструмент tlog3 на мові Python (рис. 1).

Програма дозволяє проводити: автоматизований імпорт телеметричних файлів формату tlog; експорт обраних параметрів у CSV для подальшого поглибленого аналізу; фільтрацію та згладжування даних; побудову графіків основних параметрів польоту. Її використання надає можливість об'єднати дані з різних типів повідомлень MAVLink у єдиний часовий ряд, що є необхідним для подальшого коректного оцінювання взаємозв'язку між командою автопілота, фактичною швидкістю та споживаним струмом.

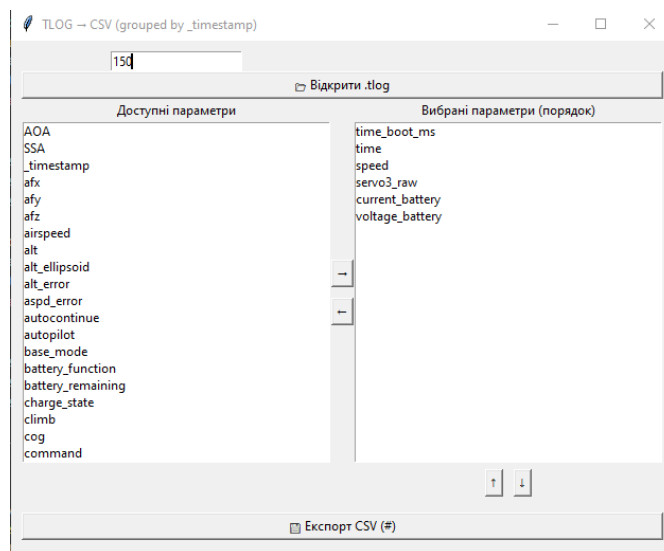


Рис. 1. Інтерфейс програмного інструмента tlog3

У процесі аналізу телеметричних даних формату .tlog враховано їх характерні особливості: нерівномірну частоту надходження повідомлень, наявність пропусків (NaN), службових значень, а також ділянок до запуску двигуна. Для усунення впливу цих факторів застосовано процедуру фільтрації та нормалізації даних. Зокрема, службові значення типу 65534 та 65535, що не мають фізичного змісту, замінено на пропущені (None) з подальшим обробленням як NaN.

Для виділення ділянки активної роботи двигуна використано параметр servo3\_raw, який відповідає сигналу керування (PWM). Із аналізу даних tlog-файлів виявлено, що значення 1000 відповідає мінімальному рівню (двигун неактивний), а перевищення цього порогу — початку роботи електродвигуна. Відповідно, з аналізу виключалися всі записи до першого моменту, коли  $\text{servo3\_raw} > 1000$ , а значення було коректним. Це дозволило усунути вплив передстартових режимів.

Для зменшення обсягу даних застосовано прорідження (downsampling) із використанням параметра divider, що визначає крок вибірки. Такий підхід забезпечує баланс між швидкістю оброблення та деталізацією аналізу.

Формування часової шкали здійснювалося на основі параметра time\_boot\_ms із приведенням до відносного часу від початку запису та масштабуванням відповідно до обраного кроку дискретизації.

Для зменшення впливу випадкових коливань і шумів вимірювань застосовано метод ковзного середнього, який дозволяє виділити постійну усереднену складову сигналу та підвищити достовірність визначення режимів роботи електродвигуна. Для дискретного сигналу ковзне середнє визначається як

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_{i-k},$$

де  $\bar{x}_i$  – значення параметра в момент часу;

$N$  – розмір вікна усереднення;

$k$  – індекс підсумовування, що визначає зміщення від поточного моменту часу й у межах вікна усереднення.

Вибір параметра  $N$  здійснювався з урахуванням частоти дискретизації телеметричних даних та характерної тривалості перехідних процесів. Під час аналізу масиву телеметричних даних було виявлено, що для значення  $N = 5$  забезпечується ефективно пригнічення високочастотного шуму в разі збереження інформативності змін, пов'язаних із маневруванням та роботою автопілота.

Для оцінювання режимів польоту ключовим показником є рівномірність зміни швидкості. Визначення рівномірного польоту прийнято таким:

$$\Delta(t_i) = \frac{|V(t_i) - V(t_{i-1})|}{V(t_{i-1})} \cdot 100\%,$$

де  $\Delta(t_i)$  – відносна зміна швидкості між сусідніми відліками;

$V(t_i)$  – швидкість польоту в поточній вибірці;

$V(t_{i-1})$  – швидкість польоту в попередній вибірці.

Політ вважається рівномірним, якщо швидкість або практично не змінюється, або змінюється рівномірно, а приріст швидкості відносно попереднього проміжку вибірки не перевищує 5%:

якщо  $\Delta(t) \leq 5\%$ , то відповідна ділянка належить до усталеного (рівномірного) режиму;

якщо  $\Delta(t) > 5\%$ , то ділянка класифікується як перехідний процес / нерівномірний режим.

Вибір порогового значення 5% обґрунтовано як з погляду теорії оброблення сигналів, так і на основі аналізу експериментальних телеметричних даних, за якого цей критерій забезпечує найбільш адекватне відокремлення усталених ділянок польоту від перехідних процесів. Це дозволяє:

оцінити відповідність між командою та реакцією системи (динаміку регулювання);

виявити ділянки, де автопілот виконує часті корекції;

пов'язати перехідні процеси зі зміною струму, що прямо впливає на витрати енергії.

У ході дослідження проаналізовано 450 графіків польотів (профілів), отриманих з log-файлів формату .tlog.

За результатами аналізу з'ясовано, що середній відсоток рівномірності польоту за вибіркою становить близько 76,8%, що підтверджує домінування усталених режимів у загальній структурі польоту.

Водночас виявлено значну варіативність режимів польоту БПЛА: від майже з повністю стабільним швидкісним профілем (90–97% рівномірності) до випадків із помітною кількістю перехідних процесів (нижче 70%).

Для систематизації результатів виконано поділ графіків на три групи (класи режимів) залежно від частки часу рівномірного польоту.

Група А з високою рівномірністю ( $\geq 90\%$ ) характеризується переважанням усталеного режиму польоту. Команда автопілота змінюється плавно або є квазіпостійною. Струм стабільний, без різких піків (рис. 2). Для кожного польоту побудовано графіки, що містять три основні криві:

- синю – команда автопілота на двигун (сигнал керування);
- червону – швидкість польоту (фактичний результат керування);
- зелену – струм споживання (реальне енергетичне навантаження).

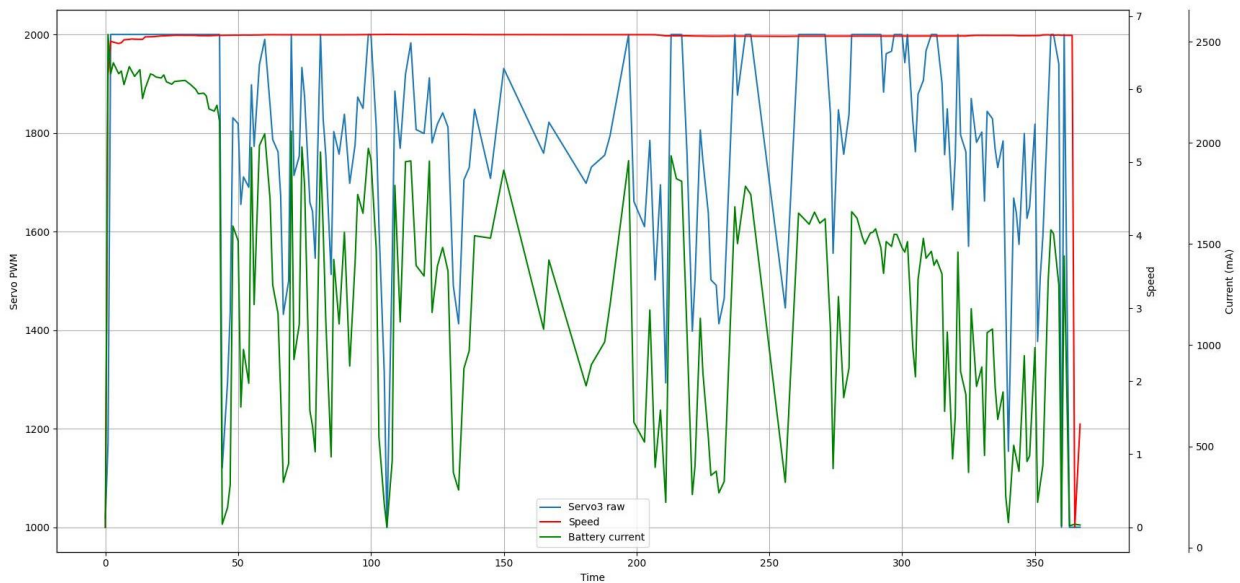
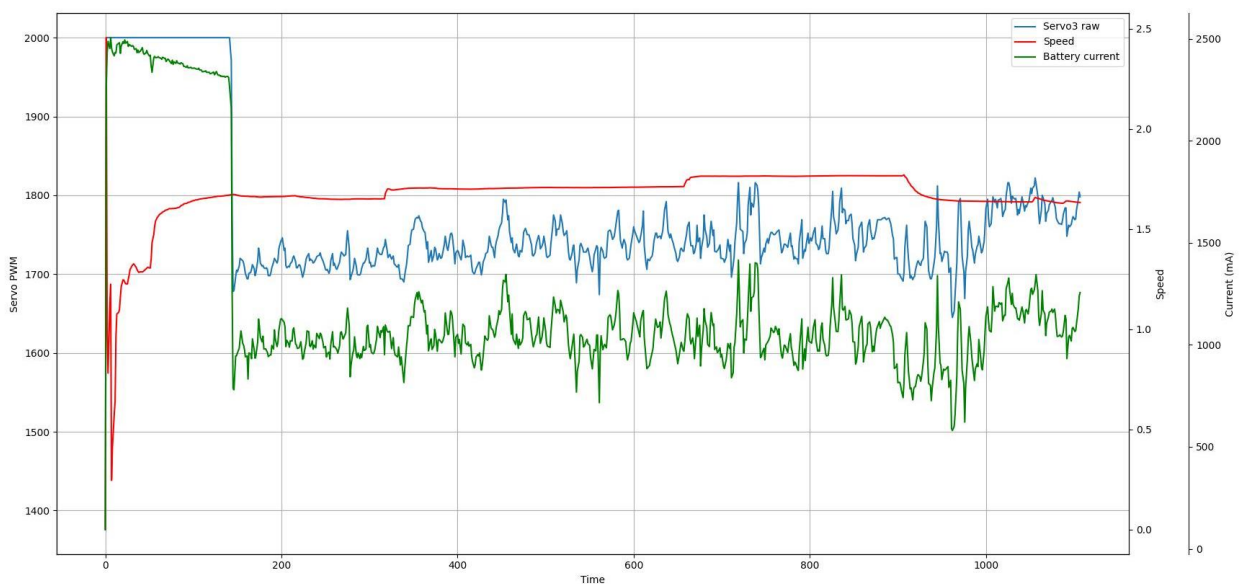


Рис. 2. Усталений крейсерський режим (група А)

Група В із середньою рівномірністю (80–89%) характеризується польотом переважно в усталеному режимі, але присутні короткі перехідні ділянки: корекція курсу, невеликі зміни висоти, реакція на пориви вітру, уточнення маршруту (рис. 3).



Рису. 3. Робочий режим із корекціями (група В)

Для групи С із низькою рівномірністю (< 80%) відмічається значна частка перехідних процесів. Команда автопілота має часті зміни, струм проявляє підвищену коливальність або пікові значення. Швидкість має хвилеподібний або ступінчастий характер (рис. 4).

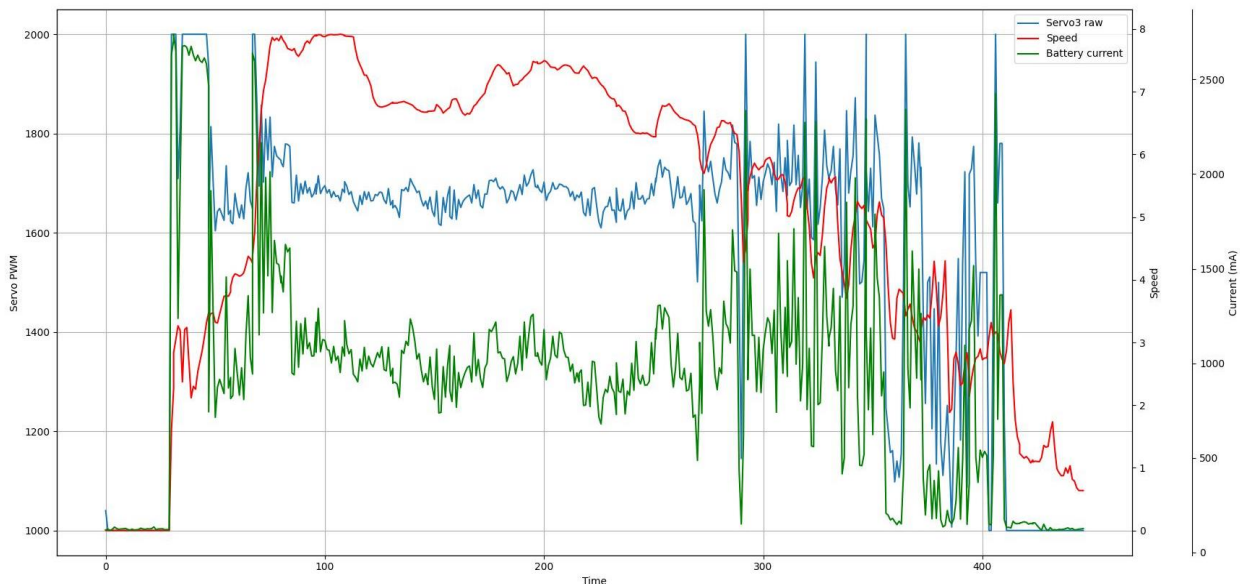


Рис. 4. Домінування перехідних процесів (група С)

Отримані результати свідчать, що коливання швидкості польоту та струму споживання формуються під впливом поєднання кількох факторів, серед яких ключову роль відіграють зовнішні аеродинамічні збурення, особливості виконання бойового завдання та характеристики алгоритмів керування автопілота.

У реальних умовах експлуатації БпЛА суттєвий вплив на характер швидкісного профілю польоту мають зовнішні аеродинамічні збурення, зокрема пориви зустрічного або бокового вітру, а також турбулентність атмосфери, яка може виникати внаслідок особливостей рельєфу місцевості або змін температурної стратифікації повітря. Такі збурення призводять до короткочасних змін аеродинамічного навантаження на літальний апарат, що, у свою чергу, викликає реакцію системи керування у вигляді корекцій тяги. У телеметричних даних це проявляється у вигляді хвилеподібних або ступінчастих змін швидкості польоту та відповідних коливань струму електродвигуна.

Ще одним важливим фактором нерівномірності польоту є необхідність виконання маневрів, пов'язаних із реалізацією польотного або бойового завдання. У процесі виконання місії безпілотний літальний апарат може здійснювати корекцію маршруту, зміну висоти, розвороти або інші маневри, спрямовані на уточнення траєкторії польоту чи уникнення потенційних загроз. Такі дії неминуче супроводжуються перехідними процесами в роботі силової установки, що проявляється у зміні швидкості польоту та збільшенні варіативності струму споживання.

Одним із важливих факторів, що впливає на рівномірність польоту, є особливості роботи системи автоматичного керування. Аналіз графіків сигналу керування автопілота показує, що в окремих випадках команда на електродвигун змінюється з підвищеною частотою навіть за відносно незначного коливання швидкості польоту. Це може бути

зумовлено надто чутливими налаштуваннями контурів регулювання, зокрема параметрів регулятора швидкості або тяги, а також недостатнім згладжуванням вимірювань швидкості. У таких умовах навіть незначні відхилення швидкості можуть призводити до повторних корекцій сигналу керування, що проявляється у вигляді коливань тяги електродвигуна та відповідних змін струму споживання.

Окрім цього, певну роль відіграють динамічні властивості самої силової установки, яка включає електродвигун, електронний регулятор швидкості та повітряний гвинт. Реакція цієї системи на зміну сигналу керування має певну інерційність, що може призводити до короточасних перехідних процесів під час зміни режимів роботи. Особливості алгоритмів керування електронного регулятора швидкості, а також відповідність характеристик гвинта робочим режимам польоту також можуть впливати на характер зміни струму та тяги.

Отже, результати аналізу телеметричних даних свідчать, що нерівномірність польоту розвідувального БпЛА I класу має багатофакторну природу. Найбільш імовірними джерелами її виникнення є реакція системи автоматичного керування на зовнішні аеродинамічні збурення, маневри, необхідні для виконання бойового завдання, а також особливості налаштування алгоритмів керування тягою. Сукупна дія зазначених факторів призводить до виникнення перехідних процесів у роботі силової установки, що проявляється у вигляді коливань швидкості польоту та струму споживання електродвигуна.

**Висновки.** У ході дослідження проведено аналіз телеметричних даних 450 польотів розвідувального БпЛА I класу, отриманих у вигляді журналів формату .tlog. На основі вивчення змін швидкості польоту, сигналу керування автопілота та струму споживання електродвигуна виконано класифікацію режимів роботи силової установки за характером їх зміни й визначено частку рівномірного польоту в загальній структурі польотного профілю.

Встановлено, що режими роботи електродвигуна розвідувальних БпЛА I класу мають чітко виражену структуру та можуть бути класифіковані за характером зміни швидкості польоту, сигналу керування автопілота та струму споживання.

З'ясовано, що переважну частину польотного часу займають усталені режими, для яких характерна незначна або плавна зміна швидкості. Середнє значення частки рівномірного польоту становить близько 76,8%, що свідчить про домінування квазіусталених режимів у його структурі та створює передумови для підвищення енергоефективності на цих ділянках.

Показано, що перехідні режими супроводжуються підвищеними коливаннями струму електродвигуна та змінами швидкості польоту, а це потенційно може призводити до зниження енергоефективності силової установки.

Виявлено узгоджену реакцію на сигнали керування від автопілота на струм споживання та швидкість польоту, що підтверджує взаємозв'язок між алгоритмами керування тягою та енергетичними характеристиками польоту.

Проведений аналіз показав, що рівномірність польоту змінюється орієнтовно в діапазоні від 60% до 97%, що свідчить про значну варіативність режимів експлуатації БпЛА залежно від особливостей виконання місії та впливу зовнішніх аеродинамічних збурень.

Встановлено, що в більшості випадків швидкісний профіль польоту та сигнали керування можуть бути апроксимовані кусково-лінійними залежностями, що створює передумови для розроблення методів оптимізації енергоспоживання на окремих ділянках польоту.

Отримані результати свідчать про доцільність удосконалення алгоритмів автопілота шляхом зменшення високочастотних корекцій сигналів керування у крейсерському режимі, впровадження адаптивних методів реагування на зовнішні збурення та оптимізації переходів між режимами польоту.

Крім того, вони підтверджують, що аналіз телеметричних файлів формату .tlog є ефективним інструментом для оцінювання режимів роботи електродвигуна розвідувального БПЛА I класу в умовах реальної експлуатації та може бути використаний для подальшого вдосконалення алгоритмів керування автопілота.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні на основі аналізу телеметричних .tlog-файлів реальних польотів закономірностей зміни швидкості польоту, сигналу керування автопілота та струму електродвигуна, а також у виявленні кусково-лінійного характеру швидкісних режимів, що створює передумови для оптимізації алгоритмів керування тягою БПЛА.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення багатofакторних моделей, що враховують взаємозв'язок режимів польоту, параметрів керування та енергоспоживання, для створення адаптивних систем керування електроприводом БПЛА, здатних підвищувати ефективність їх функціонування в реальних умовах експлуатації.

Розглянемо можливі шляхи підвищення енергоефективності БПЛА.

1. Для оптимізації керування тягою на квазіусталених (крейсерських) ділянках польоту доцільно мінімізувати високочастотні корекції тяги електродвигуна. Це може бути реалізовано шляхом згладжування команд автопілота та введення «мертвої зони» за швидкістю, коли за малих її відхилень команда тяги не змінюється. Такий підхід дозволяє зменшити пульсації струму електродвигуна, стабілізувати режим роботи силової установки та знизити енергетичні втрати.

2. Оскільки в реальних умовах значний вплив на політ БПЛА мають пориви вітру та атмосферна турбулентність, то для підвищення енергоефективності доцільним також є використання адаптивних алгоритмів керування, які допускають більшу похибку швидкості польоту без формування різких коригувальних команд. Такий підхід дозволяє уникнути надмірних змін тяги у відповідь на короткочасні збурення та зменшити кількість непотрібних перехідних процесів.

3. Оптимізація переходів між режимами польоту. Під час виконання бойових завдань перехідні режими польоту (набір висоти, зниження, розвороти, корекція маршруту) є неминучими. Для зменшення їх енергетичної вартості доцільно обмежувати швидкість зміни сигналу керування електродвигуна, а також використовувати елементи прогнозування профілю польоту, що дозволяє підготувати силову установку до маневру заздалегідь і зменшити величину перехідних процесів.

Реалізація наведених рекомендацій може сприяти збільшенню частки квазіусталених режимів польоту БПЛА, зменшенню коливань струму електродвигуна та підвищенню його енергоефективності.

1. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on UAVs / K. Telli, O. Kraa, Y. Himeur et al. // *Systems*. 2023. Vol. 11, No. 8. P. 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
2. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges / H. Shakhathreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha et al. // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
3. Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell: A Survey / A. Koubaa et al. // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>
4. MAVLink Protocol Analysis and Applications / A. Allouch et al. // *ArXiv*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.10641>
5. Fotouhi A., Moghaddam M. N., Zadeh M. K. Energy Consumption Optimization in UAV Systems: A review // *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 4. P. 1323. <https://doi.org/10.3390/s21041323>
6. Zeng Y., Zhang R. Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2017. Vol. 16, No. 6. P. 3747–3760. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328>
7. A Survey of Energy Efficient Methods for UAV communication / H. Jin, X. Jin, Y. Zhou et al. // *Vehicular Communications*. 2023. Vol. 41. P. 100594. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100594>
8. A Survey of UAV-Based Data Collection: Challenges, Solutions and Future Perspectives / K. Messaoudi, O. S. Oubbati, A. Rachedi et al. // *Journal of Network and Computer Applications*. 2023. Vol. 216. P. 103670. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103670>
9. Vasylenko M. P., Karpyuk I. S. Telemetry System of Unmanned Aerial Vehicles // *Electronics and Control Systems*. 2018. No. 4. P. 32–38. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.57.13244>
10. A Review on Deep Learning in UAV Remote Sensing / L. P. Osco, M. S. Arruda, J. Marcato Junior et al. // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No. 9. P. 1–36. <https://doi.org/10.3390/rs13091709>
11. A Survey on Energy Optimization Techniques in UAV-Based Cellular Networks: From Conventional to Machine Learning Approaches / A. I. Abubakar, I. Ahmad, K. G. Omeke et al. // *Drones*. 2023. Vol. 7, No. 3. P. 214. <https://doi.org/10.3390/drones7030214>
12. Reis M. J., Reis A. J. Edge-Based Real-Time Fault Detection in UAV Systems via B-Spline Telemetry Reconstruction and Lightweight Hybrid AI // *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 16. P. 4944. <https://doi.org/10.3390/s25164944>
13. MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for UAV Systems / A. Allouch et al. // *ArXiv*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.00265>
14. Security Analysis of Drone Systems: Attacks, Limitations, and Recommendations / J.-P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman., A. Chehab // *Internet of Things*. 2020. Vol. 11. P. 100218. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218>
15. Lin W., Huang C. Microcontroller Limitations in Implementing Advanced Motor Control Algorithms for UAVs // *Electronics*. 2021. Vol. 10, No. 11. P. 1342. <https://doi.org/10.3390/electronics10111342>

16. Коваль В. В., Шмельов В. О. Аналіз застосування БПЛА у сучасних збройних конфліктах // Наука і оборона. 2022. № 3. С. 5–22.
17. Методичні рекомендації щодо застосування безпілотних авіаційних комплексів у Збройних Силах України. Київ : МОУ, 2023. 120 с.
18. Бондаренко Ю. Л., Іщенко І. А. Аналіз систем живлення електродвигунів розвідувальних безпілотних літальних апаратів І класу // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 29. С. 107–124. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.08>

Стаття надійшла до редакції 04.05.2026.

Прийнято до друку 20.05.2026.

Дата публікації 30.06.2026.

## REFERENCES

1. Telli, K., Kraa, O., & Himeur, Y. et al. (2023). A Comprehensive Review of Recent Research Trends on UAVs. *Systems*, 11, 8, 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
2. Shakhathreh, H., Sawalmeh, A. H., & Al-Fuqaha, A. et al. (2019). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
3. Koubaa, A. et al. (2019). Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell: A Survey. *IEEE Access*, 7, 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>
4. Allouch, A. et al. (2019). MAVLink Protocol Analysis and Applications. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.10641>
5. Fotouhi, A., Moghaddam, M. N., & Zadeh, M. K. (2021). Energy Consumption Optimization in UAV Systems: A review. *Sensors*, 21, 4, 1323. <https://doi.org/10.3390/s21041323>
6. Zeng, Y., & Zhang, R. (2017). Energy-Efficient UAV Communication with Trajectory Optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16, 6, 3747–3760. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328>
7. Jin, H., Jin, X., & Zhou, Y. et al. (2023). A Survey of Energy Efficient Methods for UAV communication. *Vehicular Communications*, 41, 100594. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100594>
8. Messaoudi, K., Oubbati, O. S., & Rachedi, A. et al. (2023). A Survey of UAV-Based Data Collection: Challenges, Solutions and Future Perspectives. *Journal of Network and Computer Applications*, 216, 103670. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103670>
9. Vasylenko, M. P., & Karpyuk, I. S. (2018). Telemetry System of Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics and Control Systems*, 4, 32–38. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.57.13244>
10. Osco, L. P., Arruda, M. S., & Marcato Junior, J. et al. (2021). A Review on Deep Learning in UAV Remote Sensing. *Remote Sensing*, 13, 9, 1–36. <https://doi.org/10.3390/rs13091709>
11. Abubakar, A. I., Ahmad, I., & Omeke, K. G. et al. (2023). A Survey on Energy Optimization Techniques in UAV-Based Cellular Networks: From Conventional to Machine Learning Approaches. *Drones*, 7, 3, 214. <https://doi.org/10.3390/drones7030214>

12. Reis, M. J., & Reis, A. J. (2025). Edge-Based Real-Time Fault Detection in UAV Systems via B-Spline Telemetry Reconstruction and Lightweight Hybrid AI. *Sensors*, 25, 16. 4944. <https://doi.org/10.3390/s25164944>
13. Allouch, A. et al. (2019). MAVSec: Securing the MAVLink Protocol for UAV Systems. *ArXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.00265>
14. Yaacoub, J.-P., Noura, H., Salman, O., & Chehab, A. (2020). Security Analysis of Drone Systems: Attacks, Limitations, and Recommendations. *Internet of Things*, 11, 100218. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100218>
15. Lin, W., & Huang, C. (2021). Microcontroller Limitations in Implementing Advanced Motor Control Algorithms for UAVs. *Electronics*, 10, 11, 1342. <https://doi.org/10.3390/electronics10111342>
16. Koval, V. V., Shmelov, V. O. (2022). Analiz zastosuvannia BpLA u suchasnykh zbroinykh konfliktakh [Analysis of the Use of UAVs in Modern Armed Conflicts]. *Nauka i oborona [Science and Defense]*, 3, 5–22. [in Ukrainian].
17. *Metodychni rekomendatsii shchodo zastosuvannia bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv u Zbroinykh Sylakh Ukrainy [Methodological Recommendations for the Use of Unmanned Aircraft Complexes in the Armed Forces of Ukraine]*. (2023). Kyiv [in Ukrainian].
18. Bondarenko, Yu. L., & Ishchenko, I. A. (2025). Analiz system zhyvlennia elektrodvyhuniv rozviduvalnykh bezpilotnykh litalnykh aparativ I klasu [Analysis of Power Supply Systems of Reconnaissance Electric Motors Unmanned Aerial Vehicles of the 1<sup>st</sup> Class]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 29, 107–124. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.08> Zhytomyr: KZhMI [in Ukrainian].

**Yu. L. Bondarenko, I. A. Ishchenko**

### **ANALYSIS OF THE OPERATING MODES OF THE RECONNAISSANCE ELECTRIC MOTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE OF THE 1ST CLASS DURING COMBAT MISSIONS**

*The article presents the results of the analysis of the operating modes of the electric motor of reconnaissance unmanned aerial vehicles of the 1st class based on telemetry tlog files obtained during flights in the combat zone. The study was carried out on the basis of a sample of 450 flight logs of the tlog format, which ensures the representativeness of these results and allows to assess the real operating conditions of unmanned aerial vehicles. The main attention is paid to the assessment of the uniformity of the flight speed.*

*For the processing of telemetry data, a specialized software product tlog3 was developed, which provides automated data filtering, formation of agreed time series of flight parameters, smoothing of random noise and construction of speed change graphs, control signals and electrical parameters of the power plant. To increase the reliability of the assessment, the work uses the criterion for determining the uniformity of the flight, which is based on the limitation of the relative change in speed between neighboring samples of telemetry data, using a moving average.*

*Based on the analysis of the obtained graphs, the structure of the flight modes of unmanned aerial vehicles was determined, in particular, the share of the time spent in the maximum speed modes, steady (uniform) flight and transient processes. It was established that a significant part of the flight is characterized by a piecewise linear change in speed, which creates prerequisites for optimizing the traction control algorithms of the electric motor.*

*The main factors causing the unevenness of the flight have been determined, among which the maneuvering of the UAV, the influence of atmospheric disturbances and the peculiarities of the operation of the automatic control system play a key role. The obtained results can be used to further improve electric motor control algorithms and increase the energy efficiency of reconnaissance unmanned aerial vehicles of the 1st class in real operating conditions.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle; telemetry; electric motor; flight mode; energy efficiency; autopilot.*