

## РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-354-364](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-354-364)

УДК 621.3.08, 629.735.3

**Анатолій Леонідович Приступа<sup>1</sup>, Євгеній Миколайович Ятченко<sup>2</sup>,  
Анатолій Сергійович Ревко<sup>3</sup>, Тетяна Володимирівна Кулько<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**Email:** [anatoliy.prystupa@stu.cn.ua](mailto:anatoliy.prystupa@stu.cn.ua) **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

**ResearcherID:** F-5507-2014. **SCOPUS Author ID:** 57190807222

<sup>2</sup>аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [yevhenii.yatchenko@gmail.com](mailto:yevhenii.yatchenko@gmail.com) **ORCID:** 0009-0000-5900-0572

**Scopus author ID** 59273801700

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки

Національний Університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [asrmeister@stu.cn.ua](mailto:asrmeister@stu.cn.ua) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

**ResearcherID:** ABA-7094-2021 **Scopus Author ID:** 57188714850

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний Університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [gortv@stu.cn.ua](mailto:gortv@stu.cn.ua) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2734-5300>

**ResearcherID:** F-5520-2016 **Scopus Author ID:** 57201904162

### КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МУЛЬТИКОПТЕРНИХ ДРОНІВ

У роботі розглянуто питання розробки апаратного забезпечення системи контролю параметрів електрозабезпечення мультикоптерних безпілотних літальних апаратів. Проаналізовано підходи до вимірювання струму в силових колах, зокрема порівняно датчики на ефекті Холла та шунтові резистори. Обґрунтовано вибір елементної бази для поканального моніторингу параметрів чотирьох двигунів мультикоптера: датчиків струму ACS758 на ефекті Холла та прецизійних моніторів напруги INA226 з інтерфейсом I<sup>2</sup>C. Запропоновано модульну архітектуру системи моніторингу на базі одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano з інтеграцією з польотним контролером Pixhawk 6C через протокол MAVLink. Розроблено схему організації шини I<sup>2</sup>C для підключення вимірювальних модулів. Результати дослідження можуть бути використані при розробці систем діагностики та контролю балансу навантаження безпілотних літальних апаратів.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат; система електрозабезпечення; моніторинг параметрів; датчик.

Рис.: 3. Бібл.: 22.

**Актуальність дослідження.** У наш час мультикоптерні безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко застосовуються як у цивільній [1], так і у військовій [2] сферах. Вони набули широкого застосування та допомагають вирішувати різні задачі: фото/відеозйомка, моніторинг ліній електропередач, доставка вантажів, фермерство та останнім часом навіть виконання військових завдань. В умовах російсько-української війни БПЛА стали одним з основних інструментів ведення бойових дій та застосовуються з різною метою, що зумовлює підвищення вимоги до надійності й ефективності їхньої системи електрозабезпечення. Акумуляторні батареї, що застосовуються в сучасних дронах, мають обмежений термін служби, схильні до деградації і саморозряду та можуть становити небезпеку при неправильній експлуатації. Непередбачений розряд чи вихід із ладу таких батарей під час польоту призводить до аварійної посадки або навіть втрати апарату, а перегрів чи перезаряд можуть спричинити загоряння чи вибух.

Тому розробка ефективної системи контролю параметрів електрозабезпечення є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить підвищити безпеку польотів таких дронів, подовжити термін експлуатації акумуляторних батарей та оптимізувати використання електроенергії в бортових системах дрону загалом.

**Постановка проблеми.** Стандартні системи керування батареями (Battery Management System, BMS), що застосовуються в комерційних мультикоптерах, зазвичай обмежуються базовими функціями захисту: контроль мінімальної та максимальної напруги комірок, захист від перевантаження по струму та контроль температури [3; 4]. Такі системи не забезпечують точної оцінки залишкової ємності батареї, не враховують вплив температури та струму навантаження на доступну енергію, не здатні прогнозувати залишковий час польоту та не відстежують деградацію батареї протягом її життєвого циклу [5; 6].

Окрему категорію становлять БПЛА, що експлуатуються без вбудованої BMS. Така конфігурація є типовою для FPV-дронів та тактичних безпілотників, де критичними факторами є мінімізація ваги та запобігання раптового відключення живлення [7; 8]. Стандартна BMS при досягненні порогу мінімальної напруги комірки (приблизно 2,5 В) автоматично розриває коло живлення, що призводить до миттєвої втрати керування апаратом у польоті [9]. Для військових та спортивних застосувань таке примусове відключення є неприйнятним, тому оператори свідомо використовують батареї без захисних плат, покладаючись на телеметрію польотного контролера або власний досвід [7]. Такий підхід суттєво підвищує ризик глибокого розряду батареї, її пошкодження та скорочення терміну служби [8].

Особливо гостро ця проблема постає для БПЛА, що експлуатуються в складних умовах: при низьких або високих температурах навколишнього середовища [10], при значних коливаннях навантаження та при використанні акумуляторів з різним ступенем зношеності [11; 12].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання побудови систем моніторингу електричних параметрів БПЛА охоплює кілька напрямів досліджень.

Для вимірювання струму в силових колах застосовують два основні підходи: датчики на ефекті Холла та шунтові резистори [13]. Порівняльний аналіз показує, що датчики Холла (серії ACS7xx) забезпечують гальванічну ізоляцію вимірювального кола від силового, практично нульові втрати потужності та компактні розміри, тоді як шунтові рішення мають вищу точність при низьких струмах, але потребують додаткових засобів ізоляції та розсіюють потужність у вигляді тепла [13; 19]. Для застосувань з високими струмами (понад 20 А), характерними для силових кіл мультикоптерів, датчики на ефекті Холла є більш доцільним вибором завдяки відсутності теплових втрат та спрощенню конструкції [13].

Для прецизійного вимірювання напруги широко використовуються спеціалізовані мікросхеми з цифровим інтерфейсом, зокрема INA226 та INA219 виробництва Texas Instruments [18]. Ці мікросхеми забезпечують високу роздільну здатність (до 16 біт), низьку похибку вимірювання та можливість підключення кількох пристроїв до однієї шини I<sup>2</sup>C, що спрощує побудову багатоканальних систем моніторингу [14; 18].

Інтеграція систем моніторингу з польотними контролерами здійснюється переважно через протокол MAVLink (Micro Air Vehicle Link), який підтримує передачу даних про стан батареї, напругу живлення та споживану потужність у реальному часі [15]. MAVLink є стандартом де-факто для відкритих автопілотів ArduPilot та PX4, забезпечуючи двосторонній обмін телеметрією та командами керування [15; 16].

Сучасні дослідження в галузі авіоніки БПЛА підкреслюють важливість застосування одноплатних комп'ютерів, таких як NVIDIA Jetson, для збору та обробки даних від множини датчиків завдяки їх компактності, низькому енергоспоживанню та підтримці різноманітних інтерфейсів (I<sup>2</sup>C, SPI, UART) [14].

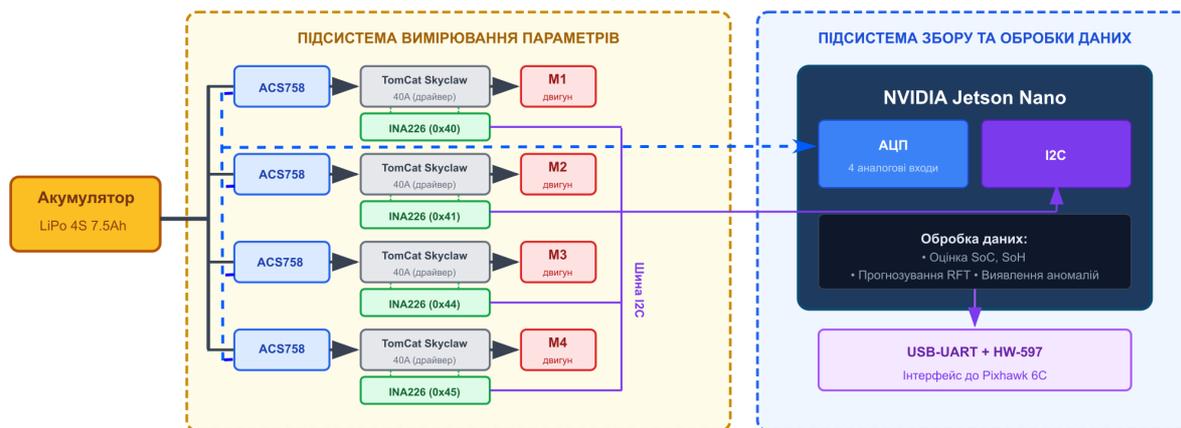
Окремим напрямком є дослідження поканального моніторингу енергоспоживання мультикоптерів, що дозволяє контролювати баланс навантаження між двигунами та виявляти аномалії в роботі окремих приводів [17]. Однак більшість існуючих рішень обмежуються вимірюванням загального струму споживання батареї, що не забезпечує достатньої інформації для діагностики стану окремих каналів силової системи.

**Метою цієї статті** є розробка та обґрунтування апаратної архітектури системи моніторингу параметрів силових кіл мультикоптерного дрона, що забезпечує вимірювання струму та напруги в каналах двигунів з інтеграцією в існуючу систему керування на базі мікрокомп'ютера NVIDIA Jetson Nano та польотного контролера Pixhawk 6C.

**Виклад основного матеріалу.**

**Загальна архітектура системи моніторингу.** Запропонована система контролю параметрів електрозабезпечення мультикоптерного дрона побудована за модульним принципом і складається з двох основних підсистем представлена на рис. 1:

1. підсистема вимірювання параметрів силових кіл;
2. підсистема збору та обробки даних.



*Рис. 1. Запропонована система контролю параметрів електрозабезпечення мультикоптерного дрона*

Джерело: розроблено авторами.

Підсистема вимірювання параметрів забезпечує отримання первинної інформації про електричні величини в силових колах чотирьох двигунів мультикоптера. Для кожного каналу двигуна передбачено вимірювання струму споживання та напруги живлення, що дозволяє визначати миттєву потужність і контролювати баланс навантаження між двигунами.

Підсистема збору та обробки даних побудована на базі одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano. Вибір даної платформи обумовлений тим, що вона широко використовується в сучасних мультикоптерних системах для керування польотним контролером, збору телеметричної інформації та її опрацювання за інтелектуальними алгоритмами, у тому числі із застосуванням технологій штучного інтелекту. Наявність апаратної шини I2C на платі Jetson Nano дозволила безпосередньо підключити датчики напруги INA226, а для оцифрування аналогових сигналів від датчиків струму ACS758 використано зовнішній АЦП ADS1115, який також підключено до шини I2C. Така конфігурація забезпечує компактне апаратне рішення з мінімальною кількістю з'єднувальних провідників.

Для інтеграції з польотним контролером Pixhawk 6C передбачено інтерфейс USB-UART з конвертером логічних рівнів HW-597, що забезпечує обмін даними через протокол MAVLink.

**Вибір та обґрунтування елементної бази.** Зовнішній вигляд обраних датчиків приведений на рис. 2.

Схему електричну принципову бортової електроніки мультикоптера наведено на рис. 3.

На схемі представлено силову частину та керування, включаючи елементи системи моніторингу параметрів електрозабезпечення (давачі струму ACS758, модулі A13 – A16, давачі напруги, струму та потужності INA226, модулі A4 та A7, АЦП ADS1115, модуль A8) у складі цілісної системи авіоніки дрона.

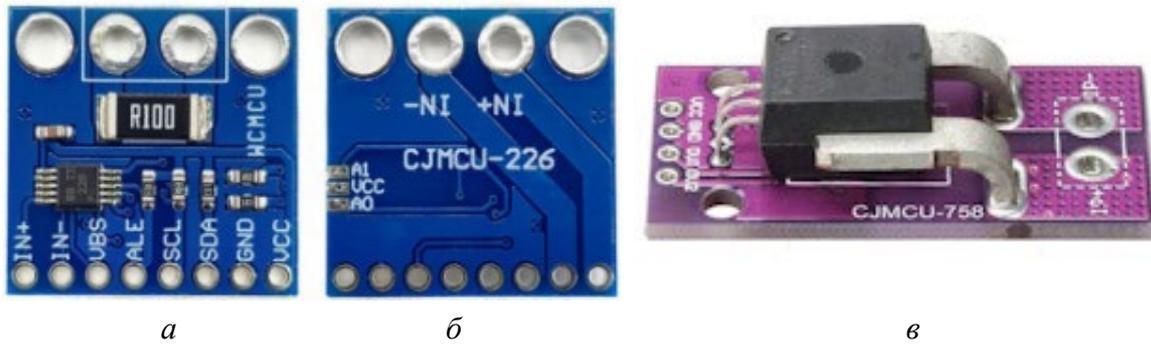


Рис. 2. Вимірювальні модулі: а, б – на базі INA226 [18]; в – датчик струму ACS758 [19]

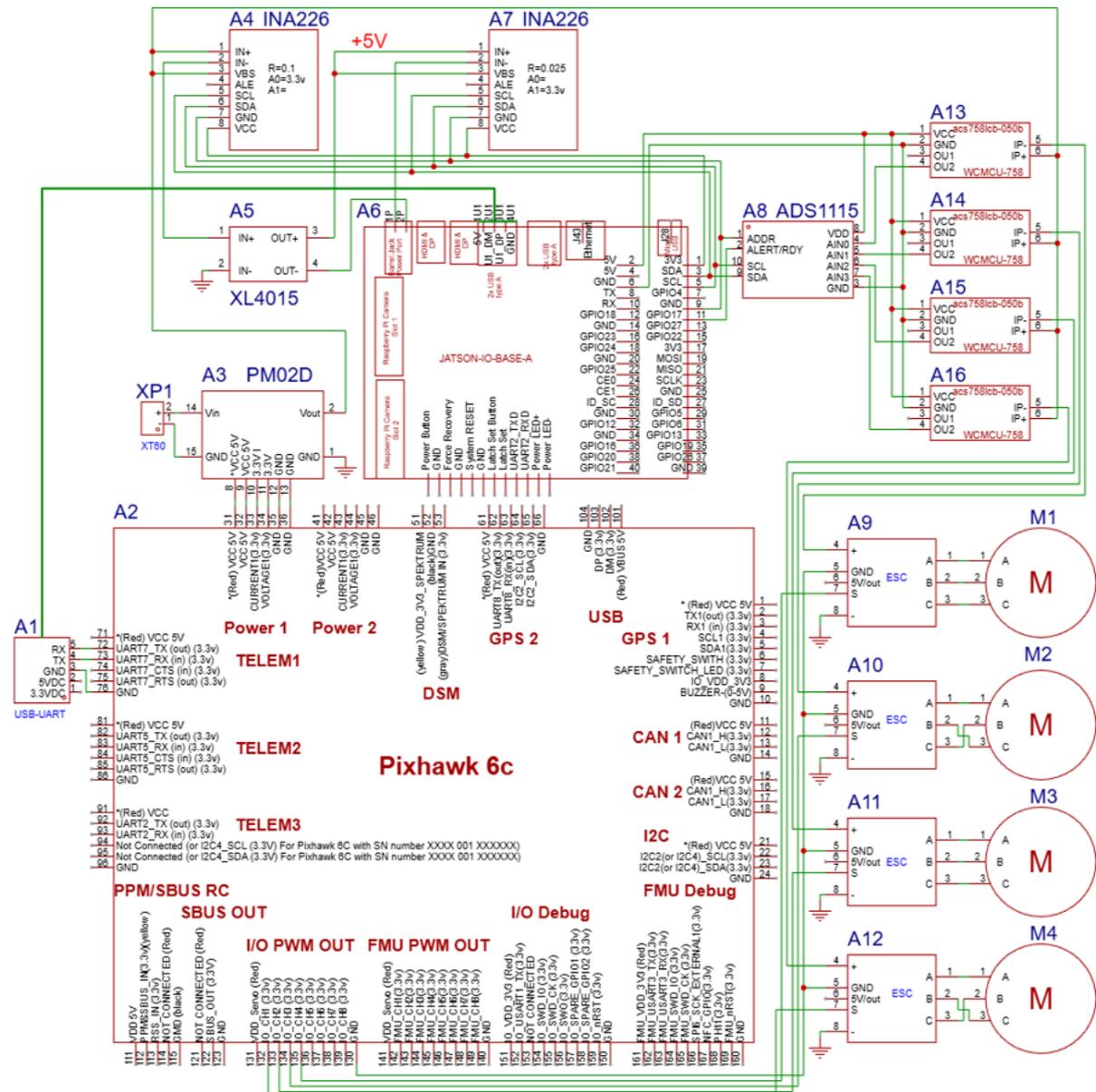


Рис. 3. Схема електрична принципова бортової електроніки мультикоптерного дрона  
Джерело: розроблено авторами.

**Датчики струму ACS758.** Для вимірювання струму споживання двигунів обрано датчики ACS758 на ефекті Холла з діапазоном вимірювання до 50 А. Принцип роботи таких датчиків базується на явищі виникнення поперечної різниці потенціалів у провіднику зі струмом, розміщеному в магнітному полі. Струм, що протікає через силовий провідник, створює магнітне поле, яке реєструється елементом Холла та перетворюється у пропорційний вихідний сигнал напруги.

Основні характеристики датчиків струму ACS758:

- діапазон вимірювання: від 0 до 50 А;
- вихідний сигнал: аналогова напруга;
- чутливість: 40 мВ/А;
- напруга живлення: від 3,0 до 5,5 В;
- гальванічна ізоляція силового та вимірювального кіл.

Вибір датчиків ACS758 на ефекті Холла обумовлений такими перевагами порівняно з шунтовими датчиками: відсутність втрат потужності в силовому колі, гальванічна ізоляція, широкий діапазон вимірювання та можливість вимірювання як постійного, так і змінного струму. Діапазон 50 А обрано з урахуванням максимального струму споживання двигунів мультикоптера з запасом на пікові навантаження при маневруванні. Існує варіант такого ж датчика з максимальним струмом 100 А.

**Датчики напруги INA226.** Для вимірювання напруги в кожному каналі двигуна та іншого навантаження бортової системи застосовано спеціалізовані мікросхеми INA226 виробництва Texas Instruments. INA226 є прецизійним монітором напруги з цифровим інтерфейсом I<sup>2</sup>C, що дозволяє вимірювати напругу на вході драйвера двигуна.

Основні характеристики INA226:

1. діапазон вимірювання напруги: від 0 до 36 В;
2. роздільна здатність АЦП: 16 біт;
3. максимальна похибка вимірювання:  $\pm 0,1\%$ ;
4. інтерфейс: I<sup>2</sup>C з програмованою адресою (16 можливих адрес);
5. частота вибірки: до 2,5 кГц;
6. напруга живлення: від 2,7 В до 5,5 В.

Перевагами INA226 є висока точність вимірювання, можливість програмного налаштування параметрів (час інтегрування, режим усереднення) та підтримка до 16 пристроїв на одній шині I<sup>2</sup>C. Це дозволяє побудувати компактну систему моніторингу з мінімальною кількістю провідників.

**Порівняльний аналіз елементної бази.** У таблицях 1 та 2 наведено порівняння характеристик обраних компонентів з альтернативними рішеннями.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика датчиків струму

Параметр	ACS758	ACS712	Шунт та АЦП
Діапазон струму	0–50 А	0–30 А	0–100 А
Втрати потужності	Відсутні	Відсутні	0,1–0,5 Вт
Гальванічна ізоляція	Так	Так	Ні
Точність	$\pm 1,5\%$	$\pm 1,5\%$	$\pm 0,5\%$
Вихідний сигнал	Аналоговий	Аналоговий	Цифровий

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика датчиків напруги

Параметр	INA226	INA219	Дільник напруги та АЦП
Роздільна здатність	16 біт	12 біт	10–12 біт
Точність	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 1–2\%$
Інтерфейс	I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C	Аналоговий
Кількість адрес I <sup>2</sup> C	16	4	—

**Підключення датчиків.** Кожен канал вимірювання складається з датчика струму ACS758. Датчик струму встановлюється в розрив силового проводу між акумуляторною батареєю та драйвером двигуна TomCat Skyclaw 40A. Аналоговий вихід датчика струму підключається до АЦП ADS1115, який підключено до NVIDIA Jetson Nano через шину I<sup>2</sup>C. Модуль INA226 підключається паралельно до силового кола для вимірювання напруги на вході всіх драйверів двигунів, а виводи датчика напруги підключено також до шини I<sup>2</sup>C. Ще один модуль INA226 встановлено в колах 5В для вимірювання напруги живлення низьковольтних споживачів (NVIDIA Jetson Nano, Pixhawk 6c).

**Організація шини I<sup>2</sup>C.** Модулі INA226 підключені до спільної шини I<sup>2</sup>C. Для забезпечення унікальної адреси кожного модуля використовується комбінація станів виводів A0 та A1, які можуть бути підключені до GND, VCC або залишені непідключеними. Обрана схема адресації наведена в табл. 3.

Таблиця 3 – Адресація модулів INA226 та ACS758 на шині I<sup>2</sup>C

Пристрій	Двигун	A1	A0	Адреса I2C (7-біт)
INA226 1	M1	GND	GND	0x40
INA226 2	M2	GND	VCC	0x41
ADS1115	АЦП (4× ACS758)	GND	-	0x48

АЦП ADS1115 має 4 аналогові входи, що дозволяє оцифровувати сигнали від усіх чотирьох датчиків струму ACS758 за допомогою одного модуля. Таким чином, на шині I<sup>2</sup>C розміщено 5 пристроїв із унікальними адресами.

**Розташування датчиків у силовому колі.** Структура силового кола мультикоптера має таку конфігурацію: акумуляторна батарея через датчики струму ACS758 підключена до чотирьох драйверів двигунів TomCat Skyclaw 40A, що керують безколекторними двигунами. Датчики струму встановлені в розрив силового проводу між акумулятором та входом драйвера. Таке розташування дозволяє вимірювати повний струм споживання кожного каналу, включаючи втрати в драйвері двигуна. Датчики напруги INA226 вимірюють напругу безпосередньо на вході драйвера, що дає можливість контролювати падіння напруги на з'єднувальних проводах та датчиках струму.

**Підключення до Jetson Nano.** Одноплатний комп'ютер NVIDIA Jetson Nano має 40-контактний роз'єм GPIO, сумісний з Raspberry Pi, який забезпечує доступ до інтерфейсів I<sup>2</sup>C, SPI, UART та GPIO. Для підключення датчиків використовується шина I<sup>2</sup>C (контакти 3 та 5 роз'єму GPIO), яка підтримує напругу логічних рівнів 3,3 В.

**Протокол MAVLink та структура потоків даних.** MAVLink (Micro Air Vehicle Link) – це легкий протокол обміну повідомленнями, розроблений для комунікації між компонентами безпілотних систем. Протокол забезпечує двосторонній обмін даними з контролем цілісності та підтвердженням доставки.

Через інтерфейс MAVLink система моніторингу отримує від польотного контролера такі дані:

- 1) повідомлення BATTERY\_STATUS (ID 147): загальна напруга батареї, залишковий заряд, струм споживання, температура;
- 2) повідомлення SYS\_STATUS (ID 1): напруга батареї, залишок заряду у відсотках (SoC);
- 3) повідомлення POWER\_STATUS (ID 125): напруга на шинах живлення 5 В та 3,3 В.

Дані від датчиків струму (через АЦП ADS1115) та модулів INA226 надходять до Jetson Nano через інтерфейс I<sup>2</sup>C з періодом опитування 100 мс. Одночасно через MAVLink надходить інформація від вбудованого датчика живлення Pixhawk 6C. Обчислювальний модуль на базі Jetson Nano здійснює первинну обробку даних, обчислення похідних параметрів (сумарна потужність, баланс навантаження) та формує пакети даних для передачі на наземну станцію керування.

**Аналіз обмежень запропонованої системи.** Запропонована апаратна архітектура має ряд обмежень, які необхідно враховувати при практичній реалізації системи моніторингу.

**Обмеження шини I<sup>2</sup>C.** Стандартний режим I<sup>2</sup>C (100 кГц), типовий для зовнішніх шин систем на базі PiHawk [14], забезпечує сумарний час циклу опитування п'яти пристроїв на рівні від 15 мс до 20 мс, що є прийнятним для періоду 100 мс, але залишає обмежений запас для обробки помилок. В умовах вібрацій та імпульсних завад від ESC можливі збої передачі даних. Для підвищення надійності рекомендується використання Fast Mode (400 кГц), який підтримується обома типами вимірювальних мікросхем [18; 22], та екранованих провідників довжиною не більше 30 см.

**Похибки вимірювального каналу.** Сумарна похибка каналу вимірювання струму складається з кількох компонентів: зміщення нуля ACS758 ( $\pm 120$  мА), температурний дрейф чутливості ( $\pm 0,06$  %/°C), нелінійність ( $\pm 1,5$  %) [13, 19] та похибка квантування ADS1115 ( $\pm 3$  мА при діапазоні  $\pm 4,096$  В) [22]. З урахуванням діапазону робочих температур від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  [10; 11] сумарна похибка без калібрування оцінюється на рівні від 3% до 5%, що потребує індивідуальної калібрувальної процедури для кожного каналу. Канал вимірювання напруги на базі INA226 (похибка  $\pm 0,1$  %, 16 біт) [18] є суттєво точнішим.

**Вплив електромагнітних завад.** Датчики Холла принципово чутливі до зовнішніх магнітних полів [13], а безколекторні двигуни та ESC є потужними джерелами електромагнітних завад на борту БПЛА [20]. Попри наявність внутрішнього екрану в ACS758 [19], рекомендується розміщувати датчики на відстані щонайменше 5 см від двигунів та застосовувати програмну фільтрацію (ковзне середнє або фільтр Калмана) для придушення імпульсних завад.

**Додаткова вага.** Орієнтовна маса системи моніторингу складає від 67 г до 77 г (4 модулі ACS758, 4 модулі INA226, АЦП ADS1115, конвертер HW-597 та кабелі), що становить менше 3 % злітної ваги мультикоптера класу від 3 кг до 5 кг. Для легких FPV-дронів (500–800 г), що експлуатуються без BMS [7; 8], таке навантаження може бути критичним. Додаткове енергоспоживання (150–250 мВт) є незначним порівняно із загальним споживанням силової системи [17].

**Надійність.** Спільна шина I<sup>2</sup>C створює єдину точку відмови: зависання одного пристрою блокує зв'язок з усіма іншими. Для підвищення відмовостійкості доцільно застосувати мультиплексор TCA9548A [21] з функцією апаратного скидання, програмний тайм-аут з автоматичним відновленням шини та перехід у деградований режим при відмові окремих каналів з повідомленням оператора через MAVLink [15; 16].

**Масштабованість.** Архітектура оптимізована для квадрокоптера. Масштабування на 6–8 двигунів обмежується 4 аналоговими входами ADS1115 [22] та потребує додаткових модулів АЦП або переходу на інтерфейс SPI [14].

Попри зазначені обмеження, більшість з них можуть бути компенсовані програмно (фільтрація, калібрування, контроль відмов) або конструктивно (екранування, оптимізація розміщення компонентів). Кількісна оцінка впливу зазначених факторів є предметом експериментальних досліджень у реальних умовах польоту.

**Висновки.** У роботі розроблено та обґрунтовано апаратну архітектуру системи моніторингу параметрів силових кіл мультикоптерного дрона. Основні результати дослідження:

1. Запропоновано модульну архітектуру системи контролю параметрів електрозабезпечення, що складається з підсистеми вимірювання параметрів силових кіл та підсистеми збору й обробки даних на базі одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano.

2. Обґрунтовано вибір датчиків струму ACS758 на ефекті Холла для вимірювання струму споживання двигунів. Порівняльний аналіз показав, що для застосувань з високими струмами (до 100 А) датчики Холла є більш доцільним рішенням порівняно з шунтовими завдяки гальванічній ізоляції, відсутності втрат потужності та компактним розмірам.

3. Для прецизійного вимірювання напруги обрано мікросхеми INA226 з роздільною здатністю 16 біт та похибкою  $\pm 0,1\%$ , що забезпечують високу точність вимірювання та можливість підключення до 16 пристроїв на одній шині I<sup>2</sup>C.

4. Розроблено схему організації шини I<sup>2</sup>C з унікальною адресацією п'яти пристроїв (чотири модулі INA226 та АЦП ADS1115), що забезпечує поканальний моніторинг чотирьох силових кіл двигунів з мінімальною кількістю з'єднувальних провідників.

5. Забезпечено інтеграцію системи моніторингу з польотним контролером Pixhawk 6С через протокол MAVLink, що дозволяє отримувати додаткові дані телеметрії та передавати інформацію на наземну станцію керування.

Запропонована система забезпечує вимірювання струму та напруги в кожному каналі двигуна, що дозволяє визначати миттєву потужність споживання та контролювати баланс навантаження між двигунами. На відміну від типових рішень, що обмежуються вимірюванням загального струму батареї, поканальний моніторинг створює передумови для раннього виявлення аномалій у роботі окремих складових дрона.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці алгоритмічного забезпечення для оцінки рівня заряду (SoC) та стану здоров'я (SoH) акумуляторної батареї на основі даних поканального моніторингу, а також у проведенні експериментальних досліджень точності та надійності запропонованої системи в реальних умовах польоту.

#### Список використаних джерел

1. UAV applications for monitoring and management of civil infrastructures. (2025). *Infrastructures*, 10(5), 106. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10050106>.
2. Drone wars: Developments in drone swarm technology. (2025, January 21). *Defense Security Monitor*. <https://dsm.forecastinternational.com/2025/01/21/drone-wars-developments-in-drone-swarm-technology>.
3. Zhao, T., Zhang, Y., Wang, M., Feng, W., Cao, S., & Wang, G. (2025). A critical review on the battery system reliability of drone systems. *Drones*, 9(8), 539. <https://doi.org/10.3390/drones9080539>.
4. Alrayes, F. S., Alotaibi, S. S., Alghamdi, K. K., Alqahtani, F., & Hamza, M. A. (2023). A machine learning-based battery management system for state-of-charge prediction and state-of-health estimation for unmanned aerial vehicles. *Journal of Energy Storage*, 66, 107380. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107380>.
5. Cao, X., & Liu, L. (2025). A multi-timescale method for state of charge estimation for lithium-ion batteries in electric UAVs based on battery model and data-driven fusion. *Drones*, 9(4), 247. <https://doi.org/10.3390/drones9040247>.
6. Kulkarni, C., Hogge, E., & Quach, C. (2018). Remaining flying time prediction implementing battery prognostics framework for electric UAV's (Report No. 20180004466). NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180004466/downloads/20180004466.pdf>.
7. How does a drone battery management system work. (2024). *Grepow Blog*. <https://www.grepow.com/blog/what-is-a-drone-battery-management-system.html>.
8. FPV drones and military use. (2025). *Drone Industry Insights*. <https://droneii.com/military-fpv-drones>.
9. Liang, O. (2025). Using LiPo batteries for FPV drones: Beginner's guide. *Oscar Liang Blog*. <https://oscarliang.com/lipo-battery-guide/>
10. Luo, H., Wang, Y., Feng, Y.-H., Fan, X.-Y., Han, X., & Wang, P.-F. (2022). Lithium-ion batteries under low-temperature environment: Challenges and prospects. *Materials*, 15(22), 8166. <https://doi.org/10.3390/ma15228166>.
11. Li, N., Liu, X., Yu, B., Li, L., Xu, J., & Tan, Q. (2021). Study on the environmental adaptability of lithium-ion battery powered UAV under extreme temperature conditions. *Energy*, 217, 119374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119481>.
12. Luan, Z., Qin, Y., Hu, B., Zhao, W., & Wang, C. (2023). Estimation of state of charge for hybrid unmanned aerial vehicle Li-ion power battery for considering rapid temperature change. *Journal of Energy Storage*, 55(Part C), 105718. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106479>.

13. Allegro MicroSystems. (2024). Comparing parameters of shunt-based and hall current sensing (Application Note AN296301). [https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296301\\_shunt-vs-hall.pdf](https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296301_shunt-vs-hall.pdf).
14. Osmani, K., & Schulz, D. (2024). Comprehensive investigation of unmanned aerial vehicles (UAVs): An in-depth analysis of avionics systems. *Sensors*, 24(10), 3064. <https://doi.org/10.3390/s24103064>.
15. Koubâa, A., Allouch, A., Alajlan, M., Javed, Y., Belghith, A., & Khalgui, M. (2019). Micro air vehicle link (MAVLink) in a nutshell: A survey. *IEEE Access*, 7, 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>.
16. Allouch, A., Cheikhrouhou, O., Koubâa, A., Khalgui, M., & Abbes, T. (2019). MAVSec: Securing the MAVLink protocol for Ardupilot/PX4 unmanned aerial systems. In *Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)* (pp. 621–628). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667>.
17. Fronza, I., Corral, L., & Pastorelli, M. (2017). Monitoring multicopters energy consumption. In *Proceedings of the ACM Conference on Computer Science in Cars Symposium (CSCS'17)*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3131726.3131730>.
18. Texas Instruments. (2015). INA226: High-side or low-side measurement, bi-directional current and power monitor with I2C compatible interface [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>.
19. Allegro MicroSystems. (2020). ACS758xCB: Thermally enhanced, fully integrated, hall-effect-based linear current sensor IC with 100  $\mu\Omega$  current conductor [Datasheet]. <https://www.allegromicro.com/~/-/media/Files/Datasheets/ACS758-Datasheet.ashx>.
20. Wang, J., Yuan, Z., Wu, Z., & Gao, C. (2024). Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. *Electronics*, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
21. Texas Instruments. (2019). TCA9548A: Low-voltage 8-channel I2C switch with reset [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>.
22. Texas Instruments. (2018). ADS111x: Ultra-small, low-power, I2C-compatible, 860-SPS, 16-bit ADCs with internal reference, oscillator, and programmable comparator [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.

## References

1. UAV applications for monitoring and management of civil infrastructures. (2025). *Infrastructures*, 10(5), 106. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10050106>.
2. Drone wars: Developments in drone swarm technology. (2025, January 21). *Defense Security Monitor*. <https://dsm.forecastinternational.com/2025/01/21/drone-wars-developments-in-drone-swarm-technology>.
3. Zhao, T., Zhang, Y., Wang, M., Feng, W., Cao, S., & Wang, G. (2025). A critical review on the battery system reliability of drone systems. *Drones*, 9(8), 539. <https://doi.org/10.3390/drones9080539>.
4. Alrayes, F. S., Alotaibi, S. S., Alghamdi, K. K., Alqahtani, F., & Hamza, M. A. (2023). A machine learning-based battery management system for state-of-charge prediction and state-of-health estimation for unmanned aerial vehicles. *Journal of Energy Storage*, 66, 107380. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107380>.
5. Cao, X., & Liu, L. (2025). A multi-timescale method for state of charge estimation for lithium-ion batteries in electric UAVs based on battery model and data-driven fusion. *Drones*, 9(4), 247. <https://doi.org/10.3390/drones9040247>.
6. Kulkarni, C., Hogge, E., & Quach, C. (2018). Remaining flying time prediction implementing battery prognostics framework for electric UAV's (Report No. 20180004466). NASA Technical Reports Server. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180004466/downloads/20180004466.pdf>.
7. How does a drone battery management system work. (2024). *Grepow Blog*. <https://www.grepow.com/blog/what-is-a-drone-battery-management-system.html>.
8. FPV drones and military use. (2025). *Drone Industry Insights*. <https://droneii.com/military-fpv-drones>.
9. Liang, O. (2025). Using LiPo batteries for FPV drones: Beginner's guide. *Oscar Liang Blog*. <https://oscarliang.com/lipo-battery-guide/>

10. Luo, H., Wang, Y., Feng, Y.-H., Fan, X.-Y., Han, X., & Wang, P.-F. (2022). Lithium-ion batteries under low-temperature environment: Challenges and prospects. *Materials*, 15(22), 8166. <https://doi.org/10.3390/ma15228166>.
11. Li, N., Liu, X., Yu, B., Li, L., Xu, J., & Tan, Q. (2021). Study on the environmental adaptability of lithium-ion battery powered UAV under extreme temperature conditions. *Energy*, 217, 119374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119481>.
12. Luan, Z., Qin, Y., Hu, B., Zhao, W., & Wang, C. (2023). Estimation of state of charge for hybrid unmanned aerial vehicle Li-ion power battery for considering rapid temperature change. *Journal of Energy Storage*, 55(Part C), 105718. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106479>.
13. Allegro MicroSystems. (2024). Comparing parameters of shunt-based and hall current sensing (Application Note AN296301). [https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296301\\_shunt-vs-hall.pdf](https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296301_shunt-vs-hall.pdf).
14. Osmani, K., & Schulz, D. (2024). Comprehensive investigation of unmanned aerial vehicles (UAVs): An in-depth analysis of avionics systems. *Sensors*, 24(10), 3064. <https://doi.org/10.3390/s24103064>.
15. Koubâa, A., Allouch, A., Alajlan, M., Javed, Y., Belghith, A., & Khalgui, M. (2019). Micro air vehicle link (MAVLink) in a nutshell: A survey. *IEEE Access*, 7, 87658–87680. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924410>.
16. Allouch, A., Cheikhrouhou, O., Koubâa, A., Khalgui, M., & Abbes, T. (2019). MAVSec: Securing the MAVLink protocol for Ardupilot/PX4 unmanned aerial systems. In *Proceedings of the 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)* (pp. 621–628). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWCMC.2019.8766667>.
17. Fronza, I., Corral, L., & Pastorelli, M. (2017). Monitoring multicopters energy consumption. In *Proceedings of the ACM Conference on Computer Science in Cars Symposium (CSCS'17)*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3131726.3131730>.
18. Texas Instruments. (2015). INA226: High-side or low-side measurement, bi-directional current and power monitor with I2C compatible interface [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf>.
19. Allegro MicroSystems. (2020). ACS758xCB: Thermally enhanced, fully integrated, hall-effect-based linear current sensor IC with 100  $\mu\Omega$  current conductor [Datasheet]. <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS758-Datasheet.ashx>.
20. Wang, J., Yuan, Z., Wu, Z., & Gao, C. (2024). Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. *Electronics*, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>.
21. Texas Instruments. (2019). TCA9548A: Low-voltage 8-channel I2C switch with reset [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>.
22. Texas Instruments. (2018). ADS1115: Ultra-small, low-power, I2C-compatible, 860-SPS, 16-bit ADCs with internal reference, oscillator, and programmable comparator [Datasheet]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>.

Дата першого надходження статті до видання: 30.22.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025

UDC 621.3.08, 629.735.3

**Anatolii Prystupa<sup>1</sup>, Yevhenii Yatchenko<sup>2</sup>,  
Anatolii Revko<sup>3</sup>, Tetiana Kulko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

Email: [anatoliy.prystupa@stu.cn.ua](mailto:anatoliy.prystupa@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>

ResearcherID: [F-5507-2014](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698). SCOPUS Author ID: [57190807222](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698)

<sup>2</sup>PhD student at the Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies Department

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [yevhenii.yatchenko@gmail.com](mailto:yevhenii.yatchenko@gmail.com). ORCID: [0009-0000-5900-0572](https://orcid.org/0009-0000-5900-0572), Scopus author ID [59273801700](https://orcid.org/0009-0000-5900-0572)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** asrmeister@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6818-2961>

**ResearcherID:** ABA-7094-2021 **Scopus Author ID:** 57188714850

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Electrical Engineering and Information and Measurement  
Technologies Department

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** gortv@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2734-5300>

**ResearcherID:** F-5520-2016 **Scopus Author ID:** 57201904162

## CONTROL OF ELECTRICAL PARAMETERS OF MULTICOPTER DRONES

*Multicopter unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in both civilian and military applications, including aerial photography, power line monitoring, cargo delivery, agriculture, and combat operations. The reliability and efficiency of their power supply systems are critical for safe operation. Battery failures during flight, such as unexpected discharge or overheating, can lead to emergency landings, loss of the vehicle, or even fire and explosion hazards. Standard battery management systems (BMS) used in commercial multicopters are limited to basic protection functions and do not provide accurate residual capacity estimation, remaining flight time prediction, or battery degradation tracking. A separate category includes UAVs operating without built-in BMS, which is typical for FPV drones and tactical unmanned systems where weight minimization and prevention of sudden power cutoff are critical factors. Therefore, the development of an effective power supply parameter monitoring system is a relevant scientific and technical task.*

*Existing monitoring solutions are typically limited to measuring the total battery current and voltage, without providing per-channel analysis of individual motor power circuits. This approach does not allow early detection of anomalies in individual drive systems, load imbalance between motors, or degradation of specific power circuit components. The problem is particularly acute for UAVs operating under extreme conditions: low or high ambient temperatures, significant load fluctuations, and batteries with varying degrees of wear.*

*The research objective is to develop and substantiate the hardware architecture of a power circuit parameter monitoring system for a multicopter drone that provides current and voltage measurement in individual motor channels with integration into the existing control system based on the NVIDIA Jetson Nano single-board computer and the Pixhawk 6C flight controller. Achieving this objective will enable early detection of anomalies in individual power circuits, improve flight safety, and extend battery service life through informed energy management.*

*A modular monitoring system architecture consisting of two main subsystems has been proposed: a power circuit parameter measurement subsystem and a data acquisition and processing subsystem. ACS758 Hall effect current sensors have been selected for motor current measurement, providing galvanic isolation, no power losses in the power circuit, and a measurement range of up to 50 A. For precision voltage measurement, INA226 integrated circuits with 16-bit ADC resolution and  $\pm 0.1\%$  accuracy have been chosen, supporting up to 16 devices on a single I2C bus. An I2C bus organization scheme with unique addressing of five devices (four INA226 modules and an ADS1115 ADC) has been developed, enabling per-channel monitoring of four motor power circuits. Integration with the Pixhawk 6C flight controller is provided via the MAVLink protocol through a USB-UART interface with an HW-597 logic level converter. A comparative analysis of the selected components against alternative solutions has been performed, and system limitations including I2C bus constraints, measurement channel errors, electromagnetic interference effects, and scalability considerations have been discussed.*

*The developed hardware architecture represents a novel approach to per-channel power monitoring in multicopter UAVs, addressing the gap between basic BMS functionality and the requirements of advanced diagnostics. The proposed system provides current and voltage measurement in each motor channel, enabling determination of instantaneous power consumption and load balance monitoring between motors. Unlike typical solutions limited to total battery current measurement, per-channel monitoring creates prerequisites for early detection of anomalies in individual drone components. The practical significance lies in the ability to detect motor or ESC degradation at an early stage, prevent in-flight failures, and optimize battery usage patterns — directly fulfilling the stated research objective of improving flight safety and extending battery life. Future research directions include the development of algorithmic support for estimating state of charge (SoC) and state of health (SoH) of the battery based on per-channel monitoring data, as well as experimental studies of the proposed system accuracy and reliability under real flight conditions.*

**Keywords:** *unmanned aerial vehicle; power supply system; parameter monitoring; sensor.*

**Fig.:** 3. **References:** 22.