

Дмитрій Анатолійович Шокодзько¹, Максим Анатолійович Хоменко²

¹аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: shokodko.dima@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7953-6947>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехнічних та вбудованих систем Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: mr.homax@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-3527>

ВИБІР СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті представлено комплексний підхід до вибору фотоелектричних перетворювачів для автономної сонячної електростанції для забезпечення безперервної зарядки мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел енергії. Проведено детальний аналіз параметрів роботи БПЛА, що включає розрахунок кількості зарядок акумуляторів протягом доби, оцінку загальної енергетичної потреби та оптимізацію конфігурації сонячного масиву з урахуванням місцевих кліматичних особливостей. Зокрема, здійснено порівняльний аналіз ефективності різних типів сонячних панелей (монокристалічних, полікристалічних та тонкоплівкових) та вплив технологічних характеристик акумуляторів (LiFePO₄ проти AGM/GEL) на загальну продуктивність системи. Результати дослідження демонструють, що застосування високоефективних сонячних панелей у поєднанні з оптимальними технологіями зберігання енергії дозволяє значно підвищити автономність та оперативність БПЛА, що має важливе значення як у військових, так і в цивільних операціях. Отримані висновки сприяють подальшому вдосконаленню систем живлення та можуть бути використані для розробки надійних і мобільних енергетичних рішень у різних сферах діяльності.

Ключові слова: БПЛА; сонячні панелі; інсоляція; автономні системи живлення; оптимізація енергетичних параметрів.

Рис.: 6. Табл.: 2. Бібл.: 30.

Актуальність теми дослідження. Зростання попиту на використання мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у військових і цивільних операціях підкреслює необхідність розробки надійних автономних систем живлення. Особливо актуальною є проблема забезпечення безперервної роботи БПЛА в умовах, де традиційні джерела енергії можуть бути недоступні або небезпечні. Використання автономних систем живлення, зокрема сонячних електростанцій, здатних забезпечити бездротову зарядку БПЛА, є перспективним вирішенням цієї проблеми.

У контексті військових операцій, автономні системи живлення можуть забезпечити високу мобільність і тривалість місій, що є критично важливим у ситуаціях, де доступ до традиційних джерел живлення обмежений або неможливий. Крім того, використання бездротових технологій зарядки знижує ризики, пов'язані з необхідністю фізичного контакту із зарядною станцією, що може бути важливим у бойових умовах.

Останні дослідження у сфері автономних систем живлення та бездротових технологій зарядки підтверджують можливість значного підвищення ефективності та автономності мультироторних БПЛА. Проте, інтеграція цих технологій у єдину систему, здатну забезпечити стабільне живлення у складних умовах експлуатації, досі залишається недостатньо вивченою.

Таким чином, дослідження, спрямовані на розробку та оптимізацію автономних систем живлення для мультироторних БПЛА, є актуальними та необхідними. Вони сприятимуть підвищенню ефективності використання БПЛА в різних сферах, включаючи військову, цивільну та гуманітарну діяльність.

Постановка проблеми. Забезпечення безперервного живлення мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є однією з ключових проблем, з якими стикаються користувачі цих систем у військових і цивільних операціях. Традиційні джерела енергії, такі як акумуляторні батареї, мають обмежену ємність, що обмежує тривалість польотів та потребує частого перезаряджання. Це створює необхідність у наявності стаціонарних зарядних станцій, що в умовах бойових дій або на важкодоступних територіях може бути неприйнятним або небезпечним.

Іншою значною проблемою є залежність від погодних умов, яка впливає на ефективність традиційних джерел енергії, таких як сонячні панелі. Хмарність, пил, і інші фактори можуть значно знижувати ефективність сонячних панелей, що ускладнює стабільне забезпечення живленням БПЛА в умовах польових операцій.

Отже, постає проблема розробки та впровадження автономної системи живлення для мультироторних БПЛА, яка б була здатна забезпечити стабільну роботу БПЛА навіть у складних умовах. Це завдання вимагає інтеграції передових технологій у сфері відновлюваних джерел енергії, електроніки та систем управління, а також проведення детальних розрахунків для оптимізації енергетичних параметрів системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні десять років питання енергетичної автономності безпілотних літальних апаратів (БПЛА) розглядалися переважно у двох напрямках: підвищення ефективності джерел живлення (сонячні панелі, паливні елементи, акумуляторні технології) та організація наземної інфраструктури для швидкого або бездротового поповнення заряду. Узагальнений огляд Sornek та ін. [1] показує, що саме ці два вектори охоплюють понад 80 % публікацій останнього десятиріччя.

У роботі Green та ін. наведено найповніші зведені дані щодо зростання ККД фотоелектричних технологій: монокристалічні Si-елементи сьогодні досягають $\approx 26\%$ у лабораторних зразках, тоді як тонкоплівкові CdTe/CIGS $\approx 22\%$ за меншої питомої маси [2]. Bett і Dimroth показали, що III–V-комполімерні елементи (GaAs, GaInP/GaAs) ефективно працюють за підвищених температур і під концентрованою інсоляцією, що особливо цікаво для мобільних сонячних масивів БПЛА-портів, але їхня вартість залишається найвищою [3]. Окремий клас робіт стосується перовскітних елементів: Castro-Hermosa продемонстрував друк гнучких модулів на паперових основах з ефективністю понад 17 %, однак деградаційні процеси скорочують їх ресурс до 1–2 років [4].

Пошуки альтернативних або комбінованих джерел живлення тривають. Shuhayeu та ін. довели, що гібрид «Li-ion + PEM fuel cell» збільшує запас енергії середньої платформи майже у 2,5 рази без критичного приросту маси [5]. Щодо накопичувачів енергії, Cao та ін. показали ресурсність LiFePO₄-батареї > 2000 циклів із ККД > 95 % [6], а Huang та ін. розробили швидкі стратегії заряджання, які не погіршують деградацію комірок [7]. Для стаціонарних рішень досі застосовуються AGM/GEL-акумулятори, але їх сумарний ККД (70–85 %) збільшує габарити фотоелектричного масиву [8].

Щодо інфраструктури заряджання, найпоширенішим залишається дротове живлення (наприклад, штатний 100-Вт блок DJI Mavic 3 Pro [9; 10]). Водночас інтенсивно розробляються безконтактні методи: Ağcal і Doğan створили складану індуктивну станцію з ККД $\approx 97,7\%$ при 100 Вт та толерантністю до 10 см зміщення приймача [11]; у фінансованому DARPA проєкті Mahbub досліджуються фазовані антенні ґратки для далекого power-beaming [12]. Концепцію безперервної місії продемонструвала система AutoCharge: десятигодинний експериментальний цикл «політ - самодокучання - заряджання - зліт» підтвердив життєздатність рішення [13].

Енергетичний баланс наземних сонячних постів суттєво залежить від регіональної інсоляції; згідно з даними Global Solar Atlas для Чернігівщини середньорічне значення становить 3.61–3.88 кВт·год/м² [14]. Це диктує необхідність оптимізації площі фотомасиву та вибору акумуляторів з урахуванням циклічних навантажень.

Підсумовуючи, сучасні дослідження окреслили ефективні фотоелектричні, паливно-елементні та акумуляторні рішення, а також продемонстрували прототипи індуктивних і радіочастотних систем підзарядки. Водночас інтегровані методики, що одночасно оптимізують конфігурацію джерел, графік польотів і деградацію накопичувачів енергії в реальних польових умовах, залишаються недостатньо розробленими.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри суттєвий прогрес у підвищенні ефективності окремих компонентів системи живлення, комплексне завдання забезпечення безперервної роботи рою БПЛА зі змінним профілем навантаження має низку нерозв'язаних аспектів:

- **Сумісна оптимізація** конфігурації сонячного масиву, вибору типу акумуляторів та графіка польотів / заряджання трьох і більше БПЛА у реальному часі. Наявні моделі зазвичай розглядають або енергобаланс одного БПЛА [5], або лише статичний підбір площі фотополу без урахування динаміки місії [15].

- **Адаптивні MPPT алгоритми** для швидко змінних умов (часткове затінення мобільних панелей, пил, роса). Фізичні прототипи, що враховують такі фактори, у відкритій літературі практично відсутні.

- **Високочастотна бездротова передача енергії (WPT)** у польових умовах, зокрема оцінка ККД та електромагнітної сумісності при живленні кількох БПЛА одночасно. Існуючі демонстрації індуктивних або радіочастотних систем виконані здебільшого в лабораторних умовах і не враховують втрати на рельєф місцевості та потребу в швидкому наведенні [11; 12].

- **Моделювання деградації LiFePO₄ батарей** під дією високих пікових струмів швидкого заряджання («100 Вт за ≤ 1 год») та температурних коливань ($-20...+40$ °C) у польових умовах – опубліковані роботи аналізують переважно кімнатні або лабораторні температури [7].

- **Економічна й логістична складова:** відсутні системні порівняння повної вартості володіння (ТСО) польових сонячних зарядних постів із дизель-генераторними чи гібридними схемами, особливо в контексті військових або рятувальних операцій.

Зазначені прогалини зумовлюють потребу у створенні **інтегрованої методики**, що одночасно охоплює технічні, енергетичні та експлуатаційні показники системи, а також у розробці експериментального прототипу для валідації розрахункових моделей у наближених до реальних умовах.

Мета роботи. Метою цієї статті є розробка та обґрунтування автономної системи живлення для мультироторних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), яка забезпечує зарядку в умовах, де традиційні джерела енергії можуть бути недоступні або небезпечні. Зокрема, у роботі поставлено завдання розрахунку параметрів автономної сонячної електростанції, здатної забезпечити стабільне живлення БПЛА протягом тривалих місій, враховуючи змінні погодні умови та особливості експлуатації в польових умовах.

Основними задачами, що вирішуються у статті є:

- Визначення оптимальної кількості зарядок акумуляторів БПЛА, необхідних для забезпечення безперервної роботи протягом доби.

- Розрахунок загальної енергії, необхідної для зарядки акумуляторів у польових умовах.

- Вибір та обґрунтування параметрів сонячних панелей, що забезпечують максимальну ефективність у різних кліматичних умовах.

Досягнення поставленої мети дозволить розробити ефективну та надійну систему живлення для мультироторних БПЛА, що сприятиме підвищенню їхньої автономності та ефективності у військових і цивільних операціях.

Виклад основного матеріалу. Типова структурна схема сонячної автономної системи живлення показана на рис. 1. Вона складається з масиву сонячних панелей, які збирають сонячну енергію та підключені до контролера, що, у свою чергу, відстежує точку максимальної потужності (MPPT) і регулює струм і напругу для максимізації вихідної потужності. Акумулятори накопичують надлишкову енергію. Змінний струм забезпечується шляхом перетворення постійного струму інвертором. DC-навантаження може бути підключене безпосередньо до акумуляторів, а AC-навантаження — до виходу інвертора.

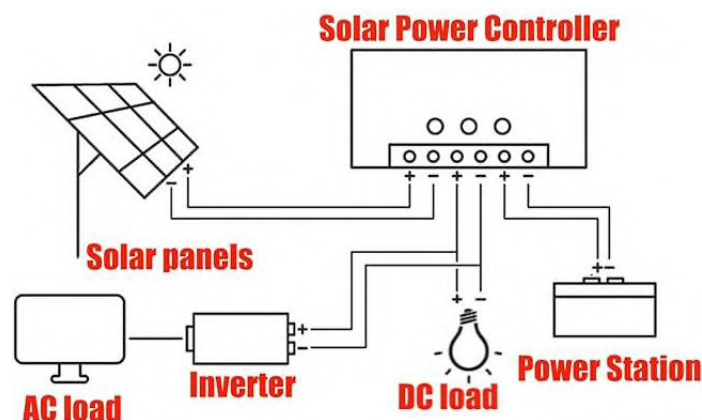


Рис. 1. Типова структурна схема сонячної автономної системи живлення
Джерело: складено авторами.

Ефективність сонячної панелі кількісно визначає її здатність перетворювати сонячне світло в електроенергію. На рис. 2 перераховані різні матеріали сонячних панелей [2]. Монокристалічні (Mono-Si) та полікристалічні (Poly-Si) сонячні панелі широко застосовуються та мають високу ефективність перетворення. Саме вони є найбільш доступними на ринку.

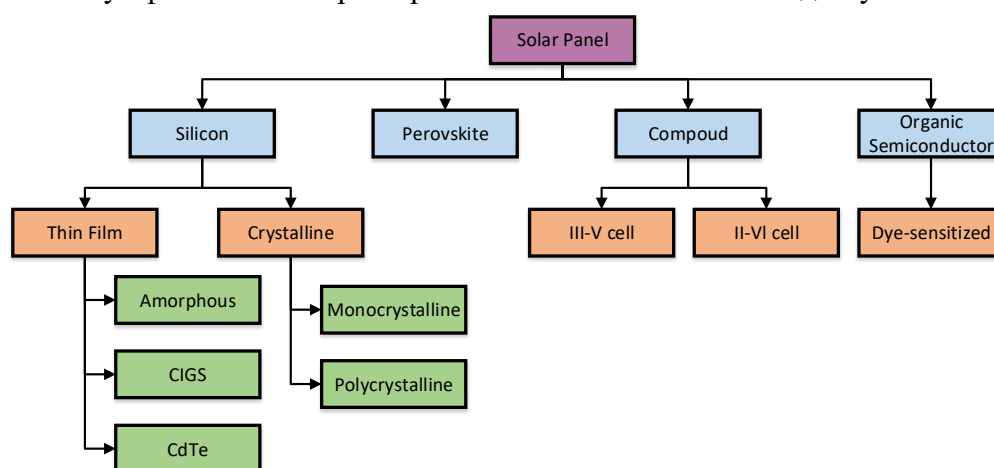


Рис. 2. Типи сонячних панелей

Джерело: [2].

Тонкоплівковий сонячний елемент — це сонячна батарея другого покоління, яка виготовляється шляхом нанесення одного або кількох тонких шарів (тонкої плівки, TF) фотоелектричного матеріалу на підкладку, таку як скло, пластик або метал. Аморфний кремій є некристалічною, алотропною формою кремнію і найбільш розвиненою тонкоплівковою технологією сьогодні. Він має нижчу ефективність перетворення в порівнянні з кристалічними сонячними панелями. Однак його можна виготовляти в різних розмірах і формах, і він використовується в різних сферах застосування.

Тонкоплівкові елементи на основі телуриду кадмію (CdTe) та міді-індію-галію-диселеніду (CIGS) були розроблені в лабораторіях і досягли значного успіху. Деякі зразки CIGS демонструють ККД до 23 % [2]. Однак тонкоплівкові елементи на основі кремнію мають менше проблем, ніж їх аналоги CdTe і CIGS, оскільки останні мають токсичні компоненти (CdTe) або складний у виробництві матеріал (CIGS).

З комбінованих сонячних елементів, які можуть досягти найвищої ефективності, GaAs забезпечує ККД близько 25,1 %. Цей тип сонячних елементів має унікальні особливості, такі як висока радіаційна стійкість і стабільна робота при високих температурах. Через нечутливість до підвищеної температури концентратори часто використовуються

для підвищення ефективності сонячного елемента, змушуючи сонячну батарею працювати при вищій напрузі і більшій щільності струму. Такий підхід виглядає перспективним, але потребує значних витрат на монтаж [3].

Перспективним напрямом розвитку є перовскітні сонячні елементи, які за останні роки набули значної популярності завдяки низькій вартості та високій ефективності перетворення. Очікується, що вони стануть високоефективною та недорогою альтернативою, оскільки можуть виготовлятися простими й швидкими методами, такими як друк [4]. Однак головною проблемою перовскітних елементів є їхня стабільність і довговічність. Матеріал з часом деградує, що призводить до зниження загальної ефективності [16].

На сучасному ринку сонячних панелей найбільш поширеними є Mono-Si, Poly-Si та аморфні панелі завдяки їхній високій стабільності, ефективності перетворення та широкій застосовності [15]. Отже, саме ці три типи панелей і будуть основними об'єктами дослідження.

Для розрахунку параметрів сонячної автономної електростанції, яка забезпечуватиме заряджання акумуляторів типу LiPo4S для БПЛА MAVIC V3 [9], будемо дотримуватися такого плану:

1. Розрахунок кількості необхідних зарядок акумуляторів протягом доби.
2. Розрахунок енергії, необхідної для зарядки акумуляторів протягом доби.
3. Розрахунок кількості сонячних панелей.

1. Розрахунок кількості необхідних зарядок акумуляторів протягом доби:

З документації на БПЛА MAVIC V3 [10] ми маємо такі параметри:

- Ємність акумулятора : 5000 мА·год;
- Стандартна напруга: 15.4 В;
- Енергія: 77 Вт·год;
- Температура заряджання: від 5° до 40° С (від 41° до 104° F);
- Вихідна потужність: 100 Вт;
- Час польоту 46 хвилин;
- Час повного заряду 1 година 20 хвилин.

Кількість зарядок акумуляторів на добу визначається за формулою:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{T_{\text{доб}}}{t_{\text{політ}} + t_{\text{заряд}}} \cdot N_{\text{БПЛА}}; \quad (1)$$

де $T_{\text{доб}}$ — тривалість доби (1440 хвилин), $t_{\text{політ}}$ — час розряду акумулятора під час польоту (хв), $t_{\text{заряд}}$ — час повного заряду акумулятора (хв), $N_{\text{БПЛА}}$ — кількість БПЛА (шт.).

Розглянемо декілька можливих сценаріїв використання з залученням різної кількості БПЛА.

БПЛА може мати два стани: 0 - зарядка (80 хв), 1 – політ(46 хв).

Поведінка одного БПЛА представлено на рис. 3.

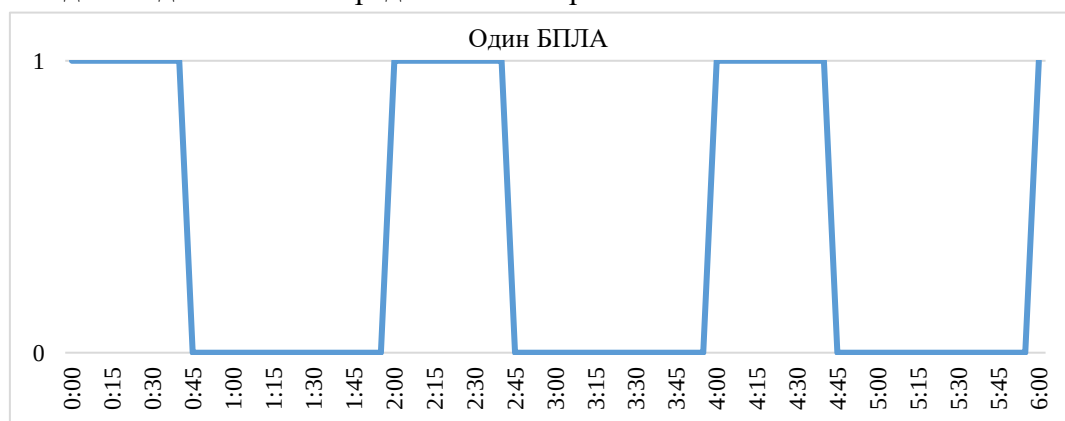


Рис. 3. Часова діаграма роботи одного БПЛА

На основі діаграми роботи одного БПЛА розрахуємо кількість зарядок:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{1440 \text{ хв}}{46 \text{ хв} + 80 \text{ хв}} \cdot 1 \approx 11,43;$$

Це означає, що один БПЛА потребує приблизно 11,43 зарядки на добу.

Поведінка двох БПЛА представлено на рис. 4.

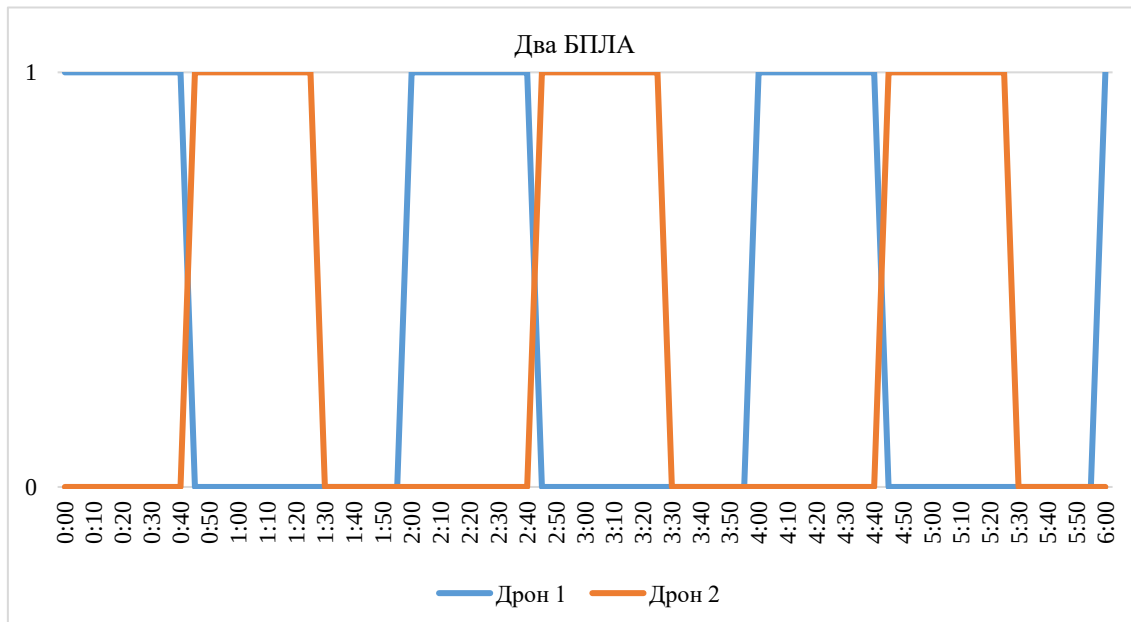


Рис. 4. Часова діаграма роботи двох БПЛА

На основі діаграми роботи двох БПЛА розрахуємо кількість зарядок:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{1440 \text{ хв}}{46 \text{ хв} + 80 \text{ хв}} \cdot 2 \approx 22,86;$$

Це означає, що два БПЛА потребує приблизно 22,86 зарядки на добу.

Поведінка трьох БПЛА представлено на рис. 5.

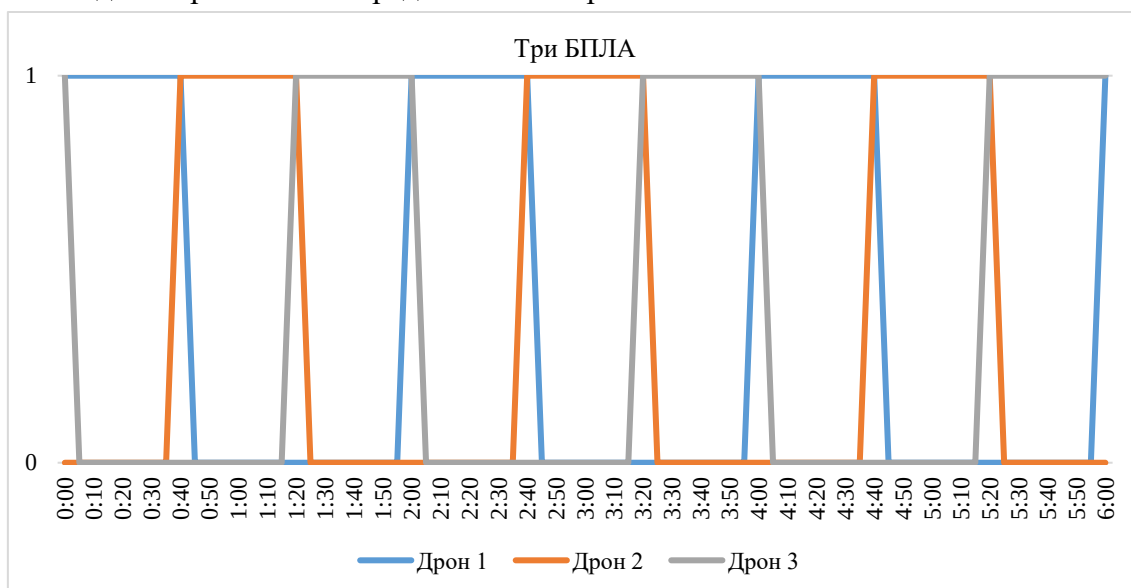


Рис. 5. Часова діаграма роботи трьох БПЛА

На основі діаграми роботи трьох БПЛА розрахуємо кількість зарядок:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{1440 \text{ хв}}{46 \text{ хв} + 80 \text{ хв}} \cdot 3 \approx 34,29;$$

Це означає, що три БПЛА потребує приблизно 34,29 зарядки на добу.
Поведінка чотирьох БПЛА представлено на рис. 6.

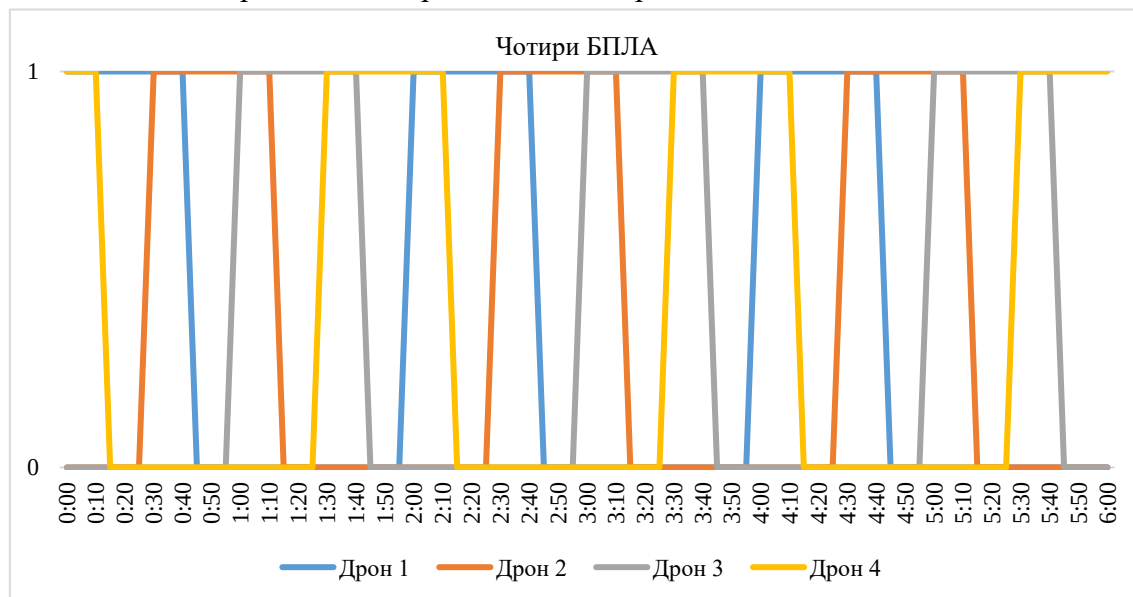


Рис. 6. Часова діаграма роботи чотирьох БПЛА

На основі діаграми роботи чотирьох БПЛА розрахуємо кількість зарядок:

$$N_{\text{зарядок}} = \frac{1440 \text{ хв}}{46 \text{ хв} + 80 \text{ хв}} \cdot 4 \approx 45,71;$$

Це означає, що чотири БПЛА потребує приблизно 45,71 зарядки на добу.

Як можна побачити, то використання лише одного чи двох БПЛА не достатньо для того щоб постійно в небі перебував хоч один, задовільним варіантом є використання від трьох БПЛА, за такої умови можна забезпечити постійну повітряну розвідку.

2. Розрахунок енергії, необхідної для зарядки акумуляторів протягом доби:

Виконаємо розрахунки при використанні трьох БПЛА.

Загальна енергія для зарядки акумуляторів протягом доби розраховується за формулою:

$$E_{\text{заг}} = N_{\text{зарядок}} \cdot E_{\text{зарядки}}; \quad (2)$$

де $E_{\text{заг}}$ – загальна енергія (Вт·год), $N_{\text{зарядок}} = 35$ – кількість зарядок на добу для трьох БПЛА, $E_{\text{зарядки}} = 100$ Вт·год – енергія зарядки.

$$E_{\text{заг}} = 35 \cdot 100 = 3500 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

Це підтверджує необхідність генерації 3 кВт·год енергії для кількох БПЛА.

Джерело: Інструкція до БПЛА Mavic 3 Pro [10].

3. Розрахунок енергії, необхідної для зарядки акумуляторів протягом доби:

Розрахуємо кількість сонячних панелей в залежності від їх типу. Будемо розглядати три типи панелей: Аморфні (тонкопівкові), Mono-Si (монокристалічні) та Poly-Si (полікристалічні).

Виходячи з даних про інсоляцію, розрахуємо необхідну потужність для кожного місяця. З джерела [14] були взяті наступні дані для Чернігівської області:

Для того щоб отримувати 3.5 кВт (3500 Вт) енергії протягом дня в Чернігівській області, нам потрібно врахувати середню інсоляцію для цієї місцевості.

Згідно з даними, середнє значення глобальної інсоляції на нахиленій площині (GTI) для Чернігова становить **3,61 – 3,88 кВт·год/м²** на день.

Кількість сонячних панелей обчислюється за формулою:

$$N_{\text{панелей}} = \frac{E_{\text{заг}}}{\eta_{\text{панелі}} \cdot \eta_{\text{інвертора}} \cdot \eta_{\text{контролера}} \cdot \eta_{\text{акумулятора}} \cdot A \cdot I}; \quad (3)$$

де $E_{\text{заг}} = 3500 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ – необхідна добова енергія, $I = 3,61 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ – середня інсоляція на нахилений площині, A – площа однієї панелі, $\eta_{\text{панелі}}$ – ККД панелі, $\eta_{\text{інвертора}}$ – ККД інвертора (зазвичай 90-95 %), $\eta_{\text{контролера}}$ – ККД контролера заряду (зазвичай 95-98%), $\eta_{\text{акумулятора}}$ – ККД акумулятора (залежить від типу: LiFePO_4 [7] $\approx$ 95-98 %, свинцево-кислотні (AGM/GEL) [8] $\approx$ 70-85 %).

$\eta_{\text{панелі}}$ розраховується за формулою:

$$\eta_{\text{панелі}} = \frac{P}{A \cdot E}; \quad (4)$$

де P – номінальна потужність панелі (Вт), A – площа однієї панелі (м^2), E – стандартна сонячна інтенсивність ($1000 \text{ Вт}/\text{м}^2$).

У таблиці 1 наведені параметри для різних панелей.

Примітки:

- Т – Тонкоплівна панель
- П – Полікристалічна панель
- М – Монокристалічна панель

Таблиця 1. – Параметри різних панелей

Назва панелі	Тип	Площа (м^2)	Вага (кг)	Потужність, (Вт)	Потужність, ($\text{Вт}/\text{м}^2$)	Ефективність, η , (%)	Ціна, (\$)
EcoFlow 100W Flexible Solar Panel [17]	Т	0,64566	2,3	100	155	15,48	145
Altek ALF-120W [18]	Т	0,7571	2	120	158,5	15,84	100
NEO Tools 200W [19]	Т	1,12535	4,2	200	177	17,77	370
Axioma Energy AX-100P [20]	П	0,64655	6,5	100	155	15,46	75
Volt Polska 5PVPOL180 [21]	П	0,9916	9,8	180	181,5	18,15	100
Altek ALM-285M-120 [22]	П	1,65168	18,8	285	172,5	17,25	140
Jinko Solar JKM325PP-72 [23]	П	1,94035	22,5	325	167,5	16,74	125
ZMS331 [24]	М	0,57428	6,2	100	175	17,41	88
Axioma Energy AX-200M [25]	М	1,092	12,8	200	183	18,31	130
JA Solar JAM6 [26]	М	1,6335	18,7	300	183,5	18,36	130
Risen RSM40-8-400M [27]	М	1,92238	21	400	208	20,8	90
JA Solar JAM66S30 [28]	М	2,3746	26,3	500	210,5	21,05	74
Longi Solar LR5-72HTH-585M [29]	М	2,58325	27,5	585	226,5	22,64	120
LogicPower LP Half-Cell 700W [30]	М	3,10635	-	700	225	22,53	150

Слід вибирати все обладнання високої ефективності. Для контролерів та інверторів коефіцієнт має бути 95 % і більше. У разі коли ККД для інверторів становить менше ніж 85 %, 15-20 % від загальної потужності масиву, панелі працюватимуть тільки на інвертор. Якщо електроенергія генерується високотехнологічними дорогими панелями, такі втрати неприпустимі.

У табл. 2 представлено результати розрахунків кількості сонячних панелей, їхні сумарні площі, ваги та вартості для двох варіантів акумуляторів:

- LiFePO_4 (ККД $\approx$ 95 %);
- AGM/GEL (ККД $\approx$ 85 %).

Таблиця 2 – Результати розрахунків кількості сонячних панелей, їх сумарної площі, ваги та вартості для двох варіантів акумуляторів

Назва панелі	Тип	Кількість при LiFePO ₄ (шт.)	Кількість при AGM/GEL (шт.)	Площа при LiFePO ₄ (м ²)	Площа при AGM/GEL (м ²)	Вага при LiFePO ₄ (кг)	Вага при AGM/GEL (кг)	Вартість при LiFePO ₄ (\$)	Вартість при AGM/GEL (\$)
EcoFlow 100W Flexible Solar Panel [17]	Т	12	13	7,5	8,4	27,6	29,9	1740	1885
Altek ALF-120W [18]	Т	10	11	7,6	8,3	20	22	1000	1100
NEO Tools 200W [19]	Т	6	7	6,8	7,9	25,2	29,4	2220	2590
Axioma Energy AX-100P [20]	П	12	13	7,8	8,4	78	84,5	900	975
Volt Polska 5PVPOLI180 [21]	П	7	8	6,9	7,9	68,6	78,4	700	800
Altek ALM-285M-120 [22]	П	4	5	6,6	8,3	75,2	94	560	700
Jinko Solar JKM325PP-72 [23]	П	4	4	7,8	7,8	90	90	500	500
ZMS331 [24]	М	12	13	6,9	7,5	74,4	80,6	1056	1144
Axioma Energy AX-200M [25]	М	6	7	6,5	7,6	76,8	89,6	780	910
JA Solar JAM6 [26]	М	4	5	6,5	8,2	74,8	93,5	520	650
Risen RSM40-8-400M [27]	М	3	4	5,8	7,7	63	84	270	360
JA Solar JAM66S30 [28]	М	3	3	7,2	7,2	78,9	78,9	222	222
Longi Solar LR5-72HTH-585M [29]	М	2	3	5,2	7,7	55	82,5	360	360
LogicPower LP Half-Cell 700W [30]	М	2	2	6,3	6,3	-	-	300	300

Порівняння за типом акумуляторів

Використання акумуляторів LiFePO₄ дозволяє зменшити необхідну кількість сонячних панелей на **5–15 %** порівняно з AGM/GEL. Це проявляється у зниженні:

- **Кількості панелей:** Наприклад, для EcoFlow 100W Flexible Solar Panel необхідно 12 шт. при використанні LiFePO₄ порівняно з 13 шт. при AGM/GEL.
- **Площі масиву:** Зменшення кількості панелей автоматично знижує сумарну площу, що полегшує монтаж і зменшує просторові вимоги.
- **Ваги та вартості:** Менша кількість панелей призводить до зниження загальної ваги конструкції та економії коштів, що особливо важливо для мобільних або тимчасових установок.

Таким чином, вищий ККД акумуляторів LiFePO₄ сприяє ефективнішому використанню генерованої енергії та оптимізації розмірів і витрат системи.

Порівняння за типами сонячних панелей

Аналізуючи результати для різних типів сонячних панелей, можна виділити наступні тенденції:

- **Тонкоплівкові панелі (Т):**

Для таких панелей, як EcoFlow 100W, Altek ALF-120W та NEO Tools 200W, використання LiFePO₄ дає змогу зменшити кількість одиниць (на 1 шт. менше), що еквівалентно зниженню вимог приблизно на 8–10 %.

- **Полікристалічні панелі (П):**

Для даної групи спостерігається більш виражена різниця. Наприклад, для панелей Volt Polska 5PVPOLI180 та Altek ALM-285M-120 кількість необхідних одиниць з LiFePO₄ акумуляторами знижується на 1 шт. або більше (іноді до 25 % від вихідної кількості при AGM/GEL).

Це говорить про більшу чутливість розрахунків до ефективності акумуляторної системи у випадку полікристалічних панелей.

- **Монокристалічні панелі (М):**

Деякі з монокристалічних моделей (JA Solar JAM66S30 та LP Half-Cell 700W) демонструють однакові параметри незалежно від типу акумуляторів. Це зумовлено високим ККД монокристалічних панелей, які здатні забезпечити необхідну потужність навіть при дещо нижчій ефективності акумуляторної системи.

Проте з більшістю панелей (ZMS331, Axioma Energy AX-200M, JA Solar JAM6, Risen RSM40-8-400M та Longi Solar LR5-72HTH-585M) лишається тенденція де використання LiFePO_4 дає змогу зменшити кількість одиниць (на 1 шт. менше).

Висновки. Проведені розрахунки та аналіз параметрів системи дають змогу зробити такі висновки:

- **Оптимізація системи:** Використання високоефективних сонячних панелей (монокристалічних, полікристалічних та тонкоплівкових) у поєднанні з акумуляторами LiFePO_4 дозволяє зменшити необхідну кількість панелей, що позитивно впливає на загальну площу, вагу та вартість системи. Це є важливим фактором для мобільних та автономних установок.

- **Економічна ефективність:** Зменшення кількості панелей за рахунок використання акумуляторів з вищим ККД дозволяє оптимізувати витрати на обладнання та монтаж, що сприяє впровадженню таких систем у широкомасштабні проекти.

- **Подальший розвиток:** Отримані результати відкривають можливості для подальшої оптимізації параметрів автономних систем живлення та їх інтеграції у різні сфери застосування, що може суттєво покращити ефективність використання БПЛА як у військових, так і в цивільних операціях.

Таким чином, інтеграція високоефективних сонячних панелей з оптимальними акумуляторними технологіями є перспективним підходом для забезпечення автономного живлення БПЛА. Результати дослідження свідчать про практичну доцільність використання LiFePO_4 акумуляторів для зменшення розмірів і вартості системи, що в свою чергу сприяє підвищенню мобільності та оперативності БПЛА в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел енергії.

Список використаних джерел

1. Sornek, K., Augustyn-Nadzieja, J., Rosikoń, I. et al. (2025). Status and development prospects of solar-powered unmanned aerial vehicles – A literature review. *Energies*, 18(8), 1924. [10.3390/en18081924](https://doi.org/10.3390/en18081924).
2. Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575.
3. Bett, F. Dimroth, Stollwerck, G., & Sulima, O. (1999). Iii-v compounds for solar cell applications. *Applied Physics A*, 69(2), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s003390050983>.
4. Castro-Hermosa, S., Dagar, J., Marsella, A., & Brown, T. M. (2017). Perovskite solar cells on paper and the role of substrates and electrodes on performance. *IEEE Electron Device Letters*, 38(9), 1278–1281.
5. Shuhayeu P., Martsinchyk A., Martsinchyk K., & Milewski, J. (2024). Investigating PEM fuel cells as an alternative power source for electric UAVs: Modeling, optimization, and performance analysis. *Energies*, 17(17), 4427. doi: 10.3390/en17174427.
6. Cao, Z., Gao, W., Fu, Y. et al. (2024). Second-life assessment of commercial LiFePO_4 batteries retired from EVs. *Batteries*, 10(9), 306. doi: 10.3390/batteries10090306.
7. Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575.
8. Butler, P. C., Crow, J. T., & Taylor, P. A. (1997). Battery evaluation methods and results for stationary applications. *Telecommunications Energy Conference, INTELEC 97. 19th International, IEEE* (pp. 311–318).

9. Mavic 3 Pro. <https://www.dji.com/global/mavic-3-pro>.
10. Mavic 3 Pro User Manual v1.0 2023.04. https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Pro/DJI_Mavic_3_Pro_User_Manual-EN.pdf.
11. Ağçal, A., & Doğan, T. H. (2024). A novel folding wireless charging station design for drones. *Drones*, 8(7), 289. doi: 10.3390/drones8070289.
12. Mahbub, I. (2024). DARPA project on phased-array power-beaming for UAVs. *DARPA Grant News*. <https://www.darpa.mil>.
13. Saviolo, A., Mao, J. B., Roshan T. M. B., et al. (2023). AutoCharge: Autonomous charging for perpetual quadrotor missions. *arXiv preprint*, arXiv:2306.05111. doi: 10.48550/arXiv.2306.05111.
14. Global Solar Atlas. https://globalsolaratlas.info/map?c=49.70672,30.552979,7&r=UKR:UKR.2_1.
15. Simon Philipps, F. I., & Warmuth, W. (2019). *Photovoltaics report*.
16. Sharma, S., Kumar Jain, K., & Sharma, A. (2015). Solar cells: In research and applications a review. *Materials Sciences and Applications*, 06, 1145–1155.
17. Сонячна панель ZMS330 100W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ecoflow-100w-flexible-solar-panel/?tab=about.
18. Сонячна панель ALF-120W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/altek-alf-120w-gnuchka/?tab=about.
19. Сонячна панель NEO Tools 200W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/neo-tools-200w-90-144.
20. Сонячна панель Axioma Energy AX-100P. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/axioma-energy-ax-100p.
21. Сонячна панель Volt Polska POLI 180W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/volt-polska-5pvpoli180/?tab=about.
22. Сонячна панель Altek ALM-285M-120. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/altek-alm120-6-285/?tab=about.
23. Сонячна панель Jinko Solar JKM325PP-72. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/jinko-solar-jkm325pp-72/?tab=about.
24. Сонячна панель ZMS331. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ecoflow-2100w-rigid-solar-panel-efsolar2100w/?tab=about.
25. Сонячна панель Axioma Energy AX-200M. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/axioma-energy-ax-200m.
26. Сонячна панель JA Solar JAM6. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ja-solar-jam6l-60300pr/?tab=about.
27. Сонячна панель Risen RSM40-8-400M. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/risen-rsm40-8-400m.
28. Сонячна панель JA Solar JAM66S30. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/ja-solar-jam66s30-500mr/?tab=about.
29. Сонячна панель Longi Solar LR5-72HTH-585M. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/longi-solar-lr5-72hth-585m.
30. Сонячна панель LogicPower LP Half-Cell 700W. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostancii/logicpower-half-cell-700w-35-profl-topcon-n-lp30101/?tab=about.

References

1. Sornek, K., Augustyn-Nadzieja, J., Rosikoń, I. et al. (2025). Status and development prospects of solar-powered unmanned aerial vehicles – A literature review. *Energies*, 18(8), 1924. doi: 10.3390/en18081924.
2. Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575.
3. Bett, F. Dimroth, Stollwerck, G., & Sulima, O. (1999). Iii-v compounds for solar cell applications. *Applied Physics A*, 69(2), 119–129. <https://doi.org/10.1007/s003390050983>.
4. Castro-Hermosa, S., Dagar, J., Marsella, A., & Brown, T. M. (2017). Perovskite solar cells on paper and the role of substrates and electrodes on performance. *IEEE Electron Device Letters*, 38(9), 1278–1281.

5. Shuhayeu P., Martsinchyk A., Martsinchyk K., & Milewski, J. (2024). Investigating PEM fuel cells as an alternative power source for electric UAVs: Modeling, optimization, and performance analysis. *Energies*, 17(17), 4427. doi: 10.3390/en17174427.
6. Cao, Z., Gao, W., Fu, Y. et al. (2024). Second-life assessment of commercial LiFePO₄ batteries retired from EVs. *Batteries*, 10(9), 306. doi: 10.3390/batteries10090306.
7. Green, M. A., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., & Ho-Baillie, A. W. (2019). Solar cell efficiency tables (version 54). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 27(7), 565–575.
8. Butler, P. C., Crow, J. T., & Taylor, P. A. (1997). Battery evaluation methods and results for stationary applications. *Telecommunications Energy Conference, INTELEC 97. 19th International, IEEE* (pp. 311–318).
9. Mavic 3 Pro. <https://www.dji.com/global/mavic-3-pro>.
10. Mavic 3 Pro User Manual v1.0 2023.04. https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Pro/DJI_Mavic_3_Pro_User_Manual-EN.pdf.
11. Ağçal, A., & Doğan, T. H. (2024). A novel folding wireless charging station design for drones. *Drones*, 8(7), 289. doi: 10.3390/drones8070289.
12. Mahbub, I. (2024). DARPA project on phased-array power-beaming for UAVs. *DARPA Grant News*. <https://www.darpa.mil>.
13. Saviolo, A., Mao, J. B., Roshan T. M. B., et al. (2023). AutoCharge: Autonomous charging for perpetual quadrotor missions. *arXiv preprint*, arXiv:2306.05111. doi: 10.48550/arXiv.2306.05111.
14. Global Solar Atlas. https://globalsolaratlas.info/map?c=49.70672,30.552979,7&r=UKR:UKR.2_1.
15. Simon Philipps, F. I., & Warmuth, W. (2019). *Photovoltaics report*.
16. Sharma, S., Kumar Jain, K., & Sharma, A. (2015). Solar cells: In research and applications a review. *Materials Sciences and Applications*, 06, 1145–1155.
17. EcoFlow. (n.d.). ZMS330 100 W Flexible Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/ecoflow-100w-flexible-solar-panel/?tab=about.
18. Altek. (n.d.). ALF-120 W Flexible Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/altek-alf-120w-gnuchka/?tab=about.
19. Neo Tools. (n.d.). 200 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/neo-tools-200w-90-144.
20. Axioma Energy. (n.d.). AX-100P 100 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/axioma-energy-ax-100p.
21. Volt Polska. (n.d.). POLI 180 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/volt-polska-5pvpoli180/?tab=about.
22. Altek. (n.d.). ALM-285M-120 285 W Solar Panel [Product page]. from https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/altek-alm120-6-285/?tab=about.
23. Jinko Solar. (n.d.). JKM325PP-72 325 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/jinko-solar-jkm325pp-72/?tab=about.
24. EcoFlow. (n.d.). ZMS331 210 W Rigid Solar Panel [Product page]. Retrieved May 25, 2025, from https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/ecoflow-2100w-rigid-solar-panel-efsolar2100w/?tab=about.
25. Axioma Energy. (n.d.). AX-200M 200 W Solar Panel [Product page]. from https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/axioma-energy-ax-200m.
26. JA Solar. (n.d.). JAM6L-60 300 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/ja-solar-jam6l-60300pr/?tab=about.
27. Risen Energy. (n.d.). RSM40-8-400M 400 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/risen-rsm40-8-400m.
28. JA Solar. (n.d.). JAM66S30 500 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/ja-solar-jam66s30-500mr/?tab=about.
29. Longi Solar. (n.d.). LR5-72HTH-585M 585 W Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/longi-solar-lr5-72hth-585m.
30. LogicPower. (n.d.). LP Half-Cell 700 W TOPCon Solar Panel [Product page]. https://hotline.ua/ua/dacha_sad-solnechnye-paneli-batareipoint-elektrostantsii/logicpower-half-cell-700w-35-profl-topcon-n-lp30101/?tab=about.

Отримано 29.04.2025

Dmytrii Shokodko¹, Maksym Khomenko²

¹Phd Student of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: shokodko.dima@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0009-0004-7953-6947>

²Associate Professor of Radiotechnic and Embedded Systems Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: mr.homax@stu.cn.ua. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-9084-3527>

**SELECTION OF SOLAR PANELS FOR AUTONOMOUS POWER SYSTEMS
OF UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Growing military and civilian reliance on multirotor unmanned aerial vehicles (UAVs) accentuates the need for resilient, field-deployable power supplies capable of continuous operation whenever conventional grids are inaccessible or hazardous. The paper addresses this challenge by proposing the comprehensive methodology for choosing photovoltaic (PV) converters and complementary storage technologies that can sustain round-the-clock wireless charging of UAV batteries under Northern-Ukrainian insolation conditions. The problem is formulated as joint optimisation of the daily number of battery charging cycles, overall-energy demand and PV-array configuration while accounting for climatic variability and flight-mission logistics.

The research objective is to substantiate the autonomous solar power plant sized to support three DJI Mavic 3 class UAVs performing uninterrupted aerial reconnaissance. Methods include energy-balance modelling, scenario scheduling of flight/charge cycles, comparative efficiency analysis of mono-, poly- and thin-film PV modules, and evaluation of two battery chemistries—LiFePO₄ and AGM/GEL—using manufacturer data and recent literature.

The key results show that, for Chernihiv's mean global tilted irradiation of 3.61 kWh m⁻² day⁻¹, a 3.5 kWh daily yield suffices to cover 35 full 100 W charges. LiFePO₄ storage (round-trip $\eta \approx 95\%$) cuts required array area by 5–15 % versus AGM/GEL ($\eta \approx 85\%$), enabling a lighter, cheaper and more mobile installation. Among thirteen commercially available panels analysed, high-efficiency monocrystalline modules ($\eta > 20\%$) teamed with LiFePO₄ batteries minimise total mass (≈ 55 kg) and capital cost (< 400 USD) while meeting mission autonomy. The proposed selection algorithm may be adapted to other regions and fleet sizes, and the findings facilitate rapid deployment of reliable solar-powered UAV charging outposts for defence, rescue and environmental monitoring tasks.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); solar panels; insolation; autonomous power systems; energy-parameter optimisation.

Fig.: 6. Table: 2. References.: 30.