

О. В. Михайліченко<sup>1</sup>  
А. С. Янко<sup>1</sup>  
О. І. Лактіонов<sup>1</sup>

## АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МОБІЛЬНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ І БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У ГІБРИДНИХ МЕРЕЖАХ

<sup>1</sup>Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Виконано порівняльний аналіз енергоефективності, функціональної автономності та стабільності зв'язку мобільних робототехнічних наземних платформ (РНП) у складі гібридних телекомунікаційних систем. Основну увагу приділено вивченню потенціалу РНП як основи для побудови енергооптимізованих та надійних мереж нового покоління, здатних забезпечувати безперервний обмін даними, підтримку систем енергетичного керування та інформаційний моніторинг у складних середовищах як у військовий так і мирний часи. Особливий акцент зроблено на порівнянні енергетичного балансу наземних платформ з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) з метою визначення переваг наземних систем у контексті тривалості автономної роботи, стабільності сигналу та можливості використання потужних антенних модулів. Встановлено, що РНП характеризуються низьким рівнем енергетичних втрат, оскільки не потребують витрат на підтримання висоти чи стабілізацію положення в повітрі. Це дозволяє ефективніше розподіляти енергоресурси між системами руху, зв'язку та обчислювальними блоками. Завдяки стабільній базі та відсутності обмежень за масою, мобільні наземні платформи можуть інтегрувати великі антени, сонячні панелі та елементи енергозбереження, що значно підвищує їхню автономність. Розглянуто застосування інтелектуальних методів адаптивного керування енергоспоживанням, які використовують алгоритми глибокого навчання. Такі методи дозволяють прогнозувати зміни навантаження, регулювати енергорозподіл між модулями та забезпечувати безперервність зв'язку, навіть у разі динамічних змін топології мережі або насколишнього середовища. Показано, що саме наземні робототехнічні системи можуть виконувати роль енергетично стабільної основи гібридної мережевої інфраструктури, доповнюючи повітряні елементи та забезпечуючи їм стійке підключення в складних умовах. Такий підхід сприяє створенню збалансованих систем, у яких ключові функції керування, зв'язку й енергорозподілу реалізуються через автономні наземні модулі, здатні до самоорганізації та колективного прийняття рішень.

**Ключові слова:** мобільні робототехнічні наземні платформи (РНП); безпілотні літальні апарати (БПЛА); гібридні мережі; енергоефективність; глибоке навчання; телекомунікаційні системи.

### Вступ

Сучасні автономні системи зв'язку все частіше поєднують безпілотні літальні апарати (БПЛА) та робототехнічні наземні платформи (РНП), які спільно формують гібридні телекомунікаційні мережі. Такі системи використовуються у військовій, цивільній та рятувальній сферах для розвідки, моніторингу територій, підтримки зв'язку та доставки даних у зонах без розвинутої інфраструктури. Основною проблемою під час експлуатації таких систем є обмежений енергетичний ресурс, який визначає тривалість автономної роботи, дальність дії та стабільність зв'язку.

Проблема енергоефективності є комплексною, оскільки різні типи платформ мають різну природу енергоспоживання. Для БПЛА основна частина енергії витрачається на створення підйомної сили, стабілізацію положення в повітрі та компенсацію впливу вітрових потоків. Для РНП головними втратами є опір коченню, тертя з поверхнею та аеродинамічний опір корпусу. Окрім механічних складових, істотна частка енергетичного балансу належить споживанню засобами зв'язку — передавачами, антенами, модулями обробки сигналів, що забезпечують обмін інформацією між вузлами мережі.

Сучасні дослідження в галузі автономних систем управління орієнтовані на комбінацію БПЛА і РНП як компонентів гібридних енергетичних систем. У більшості робіт БПЛА і РНП розглядаються окремо, без порівняння їхніх енергетичних характеристик у єдиному середовищі. Недостатньо досліджено також вплив типу антени та протоколу зв'язку на загальний енергетичний баланс системи. Основною різницею між цими платформами є розподіл енергії і стабільність зв'язку. Як показано в роботі Y. Zeng та ін. [1], енергоефективність БПЛА визначається маршрутом польоту, а головні втрати пов'язані з підтриманням висоти, що обмежує тривалість автономного перебування. Натомість РНП не витрачають енергію на компенсацію підйомної сили та можуть працювати безперервно протягом кількох годин чи днів. В дослідженні Н. Міллера та ін. [2] практичними результатами підтверджено, що енергозалежне планування місій для РНП значно знижує споживання енергії, дозволяючи переключити частину навантаження зв'язку з БПЛА на наземні вузли. Це дає змогу сформувати ієрархічну архітектуру керування, де БПЛА виконують роль мобільних сенсорів, а РНП — опорних комунікаційних ретрансляторів. Огляд Y. Zhang та ін. [3] демонструє, що більшість методів підвищення енергоефективності БПЛА орієнтовані на мережевий рівень, але антенно-фізичні обмеження залишаються суттєвими, що знижує можливість підсилення сигналу. Сучасні інтелектуальні підходи, описані К. Сіранган та ін. [4], показують, що застосування глибокого навчання з підкріпленням (ГНП) дозволяє налагоджувати баланс між якістю зв'язку (QoS) і енергоспоживанням у БПЛА-мережах. М. Мондал та ін. [5] розширюють цей підхід на змішані БПЛА-РНП системи, доводячи, що динамічний розподіл задач між платформами підвищує енергоефективність і тривалість місій без втрати стабільності каналу. Таким чином, підтверджується доцільність використання РНП як енергетично оптимальних вузлів у гібридних мережах як у мирний так і військовий час.

*Метою роботи* є розроблення спрощеної уніфікованої моделі енергетичного балансу, придатної як для БПЛА, так і для РНП, з урахуванням типу руху, особливостей шасі, зовнішніх умов та характеристик засобів зв'язку. Модель має дозволити оцінити тривалість автономної роботи, порівняти енергоефективність різних платформ і визначити оптимальні параметри для побудови гібридних мереж зв'язку нового покоління.

### Результати дослідження

Енергетичний запас визначає тривалість автономної роботи будь-якої мобільної платформи. Його величина залежить від ємності акумулятора, робочої напруги та допустимої глибини розряду. Ці параметри формують кількість електричної енергії, яку система може реально використати під час виконання завдання. Запас енергії визначається виразом

$$Z = C_b \cdot V_n \cdot n_r, \quad (1)$$

де  $C_b$  — ємність батареї;  $V_n$  — номінальна напруга;  $n_r$  — коефіцієнт допустимої глибини розряду (для більшості сучасних літій-іонних елементів становить 0,8...0,9).

Для дослідження вибрано безпілотні літальні апарати DJI Matrice 300 RTK, Parrot Anafi Ai та Skydio 2+, а також наземні робототехнічні платформи Boston Dynamics Spot, Clearpath Jackal і AgileX Scout Mini, оскільки вони належать до найпоширеніших і технічно добре задокументованих зразків у своїх класах. Це дозволяє здійснити коректне порівняння енергетичних характеристик між повітряними та наземними системами, визначимо їх для кожної з платформ за формулою (1). Залежність енергетичного запасу від платформи показана на рис. 1.

З рис. 1 випливає, що БПЛА мають запас енергії 60...550 Вт·год, чого вистачає на 30...50 хв роботи, тоді як РНП із запасом 270...560 Вт·год можуть діяти 5...8 годин. Це зумовлено можливістю використання більших акумуляторів без втрати стійкості. Енергоспоживання платформ незалежно від типу описується спрощеною моделлю потужності руху, що враховує сталу, лінійну та кубічну складові, пов'язані відповідно з підтриманням роботи, тертям і аеродинамічним опором. Загальний вигляд моделі такий:

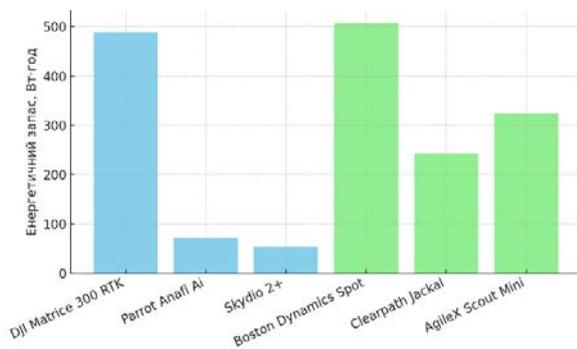


Рис. 1. Залежність енергетичного запасу від платформи

$$P_m(v) = P_s + L_t v + L_r v^3, \quad (2)$$

де  $P_m$  — потужність, необхідна для руху платформи;  $v$  — швидкість руху;  $P_s$  — базове енергоспоживання у стані підтримання стабільного режиму без поступального руху;  $L_t$  — лінійний коефіцієнт, який характеризує втрати на тертя або кочення;  $L_r$  — кубічний коефіцієнт, що враховує аеродинамічний опір.

Для безпілотних літальних апаратів базова потужність відповідає енергії, необхідній для підтримання підйомної сили. Лінійна складова для дронів майже незначна, оскільки кочення відсутнє, а кубічна складова описує додаткові втрати під час горизонтального польоту або під час руху проти вітру. Для наземних платформ, основна частина втрат припадає на лінійний доданок, який об'єднує опір коченню, тертя поверхні та ухил.

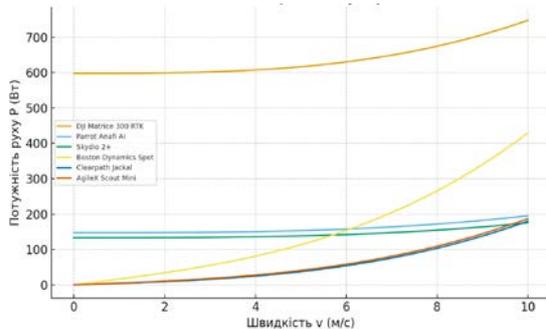


Рис. 2. Залежність швидкості від потужності платформи

З рис. 2 випливає, що безпілотні літальні апарати мають високу базову потужність 130...600 Вт для підтримання підйомної сили, тоді як наземні платформи споживають лише 10...40 Вт залежно від типу шасі. Колісні системи демонструють лінійну залежність втрат від швидкості, а гусеничні — у 2—3 рази більші витрати через підвищений опір коченню, але кращу прохідність. Основні енергетичні втрати дронів припадають на стабілізацію в повітрі, тоді як наземні платформи залишаються значно економнішими, що підтверджує доцільність використання гібридної схеми — БПЛА для сенсорних задач і РНП як енергоопорних вузлів.

Під час місії частина енергії витрачається на передавання даних (відео, телеметрія, карти). Зручно оцінювати енергію на передавання заданого обсягу та середню потужність зв'язку. Енерговитрати на зв'язок

$$P_z = (P_r + P_x) \frac{8B}{V \cdot T_m}, \quad (3)$$

де  $P_r + P_x$  — миттєва потужність радіотракту;  $V$  — ефективна швидкість каналу;  $B$  — обсяг даних;  $\frac{8B}{V}$  — час передавання. Результати розрахунків за формулою (3) відносно LoRa (SF7/125 кГц), Wi-Fi (802.11n, еф.) та LTE uplink, показують, що для великих обсягів даних (відео, карти) вигідні короткі високошвидкісні сесії (Wi-Fi/LTE): енергія на 1 МіБ менша на 3—4 порядки ніж у вузько-смужових рішень типу LoRa, яка доцільна тільки для мікропакетів телеметрії на великі відстані.

Для визначення виливу антен, баланс зв'язку визначається виразом

$$N_l = N_c + U_c + U_r - I_p, \quad (4)$$

де  $N_l$ ,  $N_c$  — рівні сигналу;  $U_c$ ,  $U_r$  — підсилення антен,  $I_p$  — втрати шляху.

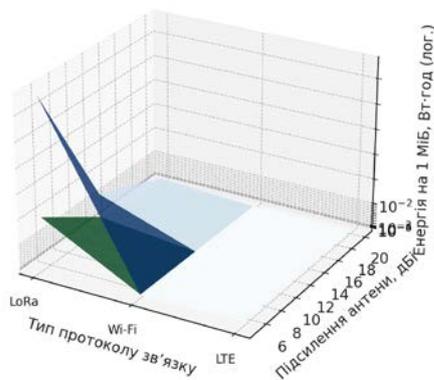


Рис. 3. Діаграма залежності антен

Визначено, що РНП можуть нести секторні/панельні (8...12 дБі) або параболічні (15...25 дБі) антени та працювати за меншої потужності тоді як РНП через масу та орієнтацію в польоті частіше використовують легкі омніантени (2...5 дБі). Це означає, що гібридний сценарій «БПЛА → РНП (спрямована антена) → магістраль» мінімізує  $E_c$ : дрон швидко «скидає» багато даних на найближчий РНП по Wi-Fi, а далі наземний вузол передає у мережу завдяки підсиленню антени.

З рис. 3 видно, що енергоспоживання зв'язку визначається типом антени та протоколу. БПЛА витрачають більше енергії через менше підсилення антен, тоді як РНП з потужними антенами споживають у 2—3 рази менше. Зі зростанням підсилення від 5 до 20 дБі енергоспоживання різко зменшується, особливо для LoRa, тоді як Wi-Fi та LTE

забезпечують мінімальні втрати. Це підтверджує ефективність використання РНП як основних енергоопорних вузлів у гібридних мережах БПЛА–РНП.

Запропоновано метод визначення тривалості місії окремої платформи у межах безперервного сеансу зв'язку, що визначається співвідношенням між корисним енергетичним запасом і сумарною середньою потужністю споживання. У зручній для інженерного застосування формі це показано як поєднання формул (1)–(4)

$$T = \frac{Z}{P_m(v) + P_d + P_z}, \quad (5)$$

де  $Z$  — запас енергії акумулятора;  $P_d$  — середня потужність сенсорів і бортового комп'ютера,  $P_z$  — середня потужність радіотракту під час сеансу;  $P_m(v)$  — узагальнена модель потужності руху.

Для практичного порівняння задано однакові місійні умови: БПЛА рухається зі швидкістю 10 м/с, РНП — 2 м/с; зв'язок організовано по Wi-Fi 20 Мбіт/с як безперервний сеанс БПЛА→РНП; середня потужність радіомодуля в БПЛА становить 1.5 Вт, у РНП — 1,0 Вт з огляду на спрямовану антену; постійні навантаження бортового обладнання становлять 8 Вт для БПЛА та 12 Вт для РНП. Запас енергії і коефіцієнти моделі для шести апаратів взяті з технічних специфікацій. Результати отримані з моделювання за допомогою мови програмування Python та модуля matplotlib за формулою (4).

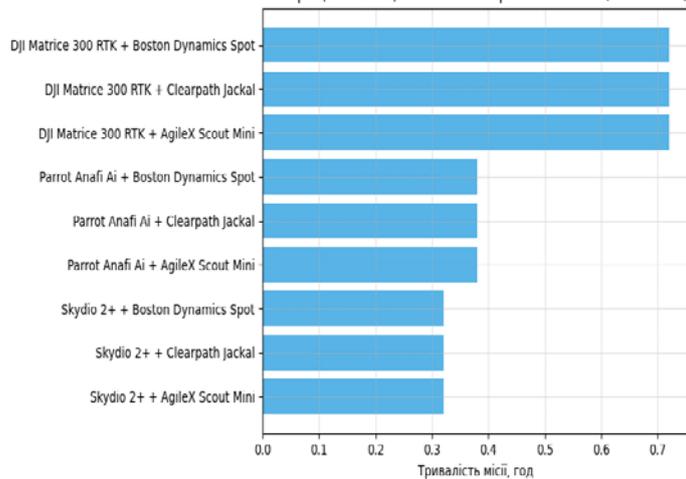


Рис. 4. Порівняння тривалості місії

З рис. 4 випливає, що всі пари БПЛА–РНП демонструють подібну тривалість місії, оскільки обмежувальним фактором є запас енергії дрона. У всіх комбінаціях саме БПЛА визначає час автономної роботи, тоді як наземні платформи зберігають значний енергетичний резерв. Різниця між колісними та гусеничними РНП у межах однієї пари не впливає на загальний результат, адже їхні втрати на кочення суттєво менші порівняно з базовою потужністю висіння дронів. Таким чином, тривалість спільної місії визначається переважно енергетичними характеристиками БПЛА, тоді як тип шасі наземної платформи впливає лише на ефективність використання її резерву під час тривалих операцій і тому знадобиться динамічна заміна БПЛА для підтримки постійного виконання поставленої задачі.

## Висновки

Розроблено спрощену уніфіковану модель енергоспоживання для БПЛА та РНП, що враховує енергію руху, обладнання та зв'язку саме для моделювання гібридних мереж. Результати показали, що БПЛА споживають у 3–5 разів більше енергії через потребу створення підйомної сили, тоді як РНП мають нижчі втрати на кочення та можуть працювати значно довше за тією ж ємністю акумулятора. Підвищення підсилення антени з 5 до 20 дБі знижує енергетичні витрати зв'язку у десятки разів, що підтверджує ефективність використання РНП як енергоопорних вузлів у гібридних мережах. Подальші дослідження плануються спрямувати на верифікацію моделі у середовищі NS-3 та моделювання енергоспоживання маршрутів з використанням нейромереж.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Energy-Efficient UAV Communication With Trajectory Optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 3747-3760, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328>.
- [2] N. Miller, N. Goulet, and B. Ayalew, "Energy-Aware Mission Planning for Unmanned Ground Vehicle Fleets," in *Proceedings of the 2024 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*, 2024. [Electronic resource]. Available: <https://ndia-mich.org>. Accessed: 12.09.2025.
- [3] Y. Zhang, R. Zhao, D. Mishra, and D. W. K. Ng, "A Comprehensive Review of Energy-Efficient Techniques for UAV-Assisted Industrial Wireless Networks," *Energies*, vol. 17, no. 18, p. 4737, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17184737>.
- [4] K. Seerangan, D. Raja, M. A. Hussain, and A. Amudha, "A Novel Energy-Efficiency Framework for UAV-Assisted

Networks using Adaptive Deep Reinforcement Learning,” *Scientific Reports*, vol. 14, Article pp. 22188, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71621-x>.

[5] M. Mondal, S. Ramasamy, and P. Bhounsule, “Deep Reinforcement Learning Enabled Persistent Surveillance with Energy-Aware UAV-UGV Systems for Disaster Management Applications,” *arXiv preprint*, 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.02666>.

Рекомендована оргкомітетом міжнародної науково-технічної конференції  
«Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025)»

Стаття надійшла до редакції 8.12.2025

**Михайліченко Олексій Валерійович** — аспірант кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій, e-mail: aleksejmikhajlichenko@gmail.com ;

**Янко Аліна Сергіївна** — канд. техн. наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри комп’ютерних та інформаційних технологій і систем, e-mail: al9\_yanko@ukr.net ;

**Лактіонов Олександр Ігорович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматичної електроніки та телекомунікацій, e-mail: laktionov.alexander@ukr.net .

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава

**O. V. Mykhailichenko<sup>1</sup>**  
**A. S. Yanko<sup>1</sup>**  
**O. I. Laktionov<sup>1</sup>**

## **Analysis of Energy Efficiency of Mobile Robotic Platforms and Unmanned Aerial Vehicles in Hybrid Networks**

<sup>1</sup>National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

*The paper provides a comparative analysis of the energy efficiency, functional autonomy and communication stability of mobile robotic ground platforms (UGVs) as part of hybrid telecommunications systems. The main focus is on studying the potential of UGVs as a basis for building energy-optimised and reliable next-generation networks capable of providing continuous data exchange, energy management system support and information monitoring in complex environments in both military and peacetime. Particular emphasis is placed on comparing the energy balance of ground platforms with unmanned aerial vehicles (UAVs) in order to determine the advantages of ground systems in terms of autonomous operation duration, signal stability and the possibility of using powerful antenna modules. It has been established that UGVs are characterised by low energy losses, as they do not require expenditure on maintaining altitude or stabilising their position in the air. This allows for more efficient distribution of energy resources between the motion, communication and computing systems. Due to their stable base and lack of weight restrictions, mobile ground platforms can integrate large antennas, solar panels, and energy-saving elements, this significantly increases their autonomy. The application of intelligent methods of adaptive energy consumption control using deep learning algorithms is considered. Such methods allow predicting load changes, regulating energy distribution between modules and ensuring continuity of communication even in the event of dynamic changes in network topology or the environment. It is shown that it is ground-based robotic systems that can serve as an energy-stable foundation for hybrid network infrastructure, complementing aerial elements and providing them with a stable connection in challenging conditions. This approach contributes to the creation of balanced systems in which key control, communication, and power distribution functions are implemented through autonomous ground modules capable of self-organisation and collective decision-making.*

**Keywords:** mobile ground robotic platforms (UGV); unmanned aerial vehicles (UAV); hybrid networks; energy efficiency; deep learning; telecommunications systems.

**Mykhailichenko Oleksii V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Automation, Electronics and Telecommunications, e-mail: aleksejmikhajlichenko@gmail.com ;

**Yanko Alina S.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Chair of Computer and Information Technologies and Systems, e-mail: al9\_yanko@ukr.net ;

**Laktionov Aleksandr I.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Automation, Electronics and Telecommunications, e-mail: laktionov.alexander@ukr.net