

## АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ГІБРИДНИХ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

**В.А. Котенко**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: [volodymyr.kotenko@nure.ua](mailto:volodymyr.kotenko@nure.ua)

У статті представлено аналіз сучасних технологій гібридних мобільних роботів – автономних платформ, здатних працювати в різномірних середовищах завдяки комбінуванню двох або більше режимів руху (наприклад, суша-повітря, суша-вода, надводне-підводне). Проаналізовано класифікацію таких систем, їх конструктивні рішення та приводні системи, підходи до навігації й керування, а також питання енергоефективності й експлуатаційної надійності. На підставі порівняльного аналізу виділено перспективні напрями подальших досліджень.

**Ключові слова:** гібридні роботи; мобільна робототехніка; амфібійні системи; автономні платформи; трансформовані механізми; системи керування; енергоефективність; навігація; морфологічна адаптація.

## ANALYSIS OF TECHNOLOGIES AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF HYBRID MOBILE ROBOTS

**V. A. Kotenko**

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky Ave. 14

E-mail: [volodymyr.kotenko@nure.ua](mailto:volodymyr.kotenko@nure.ua)

The article presents an analysis of modern technologies of hybrid mobile robots – autonomous platforms capable of operating in heterogeneous environments through the combination of two or more modes of locomotion (e.g., land-air, land-water, surface-underwater). The classification of such systems, their design solutions and actuation systems, approaches to navigation and control, as well as issues of energy efficiency and operational reliability are analyzed. Based on comparative analysis, promising directions for further research are identified.

**Key words:** hybrid robots; mobile robotics; amphibious systems; autonomous platforms; transformable mechanisms; control systems; energy efficiency; navigation; adaptive morphology.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Сучасний етап розвитку робототехніки характеризується переходом від вузькоспеціалізованих систем до універсальних, адаптивних роботів, здатних ефективно працювати у змінних умовах середовища. Гібридні роботи, що поєднують властивості наземних, повітряних або підводних систем, відкривають нові можливості для автоматизації технологічних процесів, моніторингу довкілля, транспортування та виконання складних технічних завдань. Вони здатні працювати в умовах, де традиційні роботи обмежені через енергоспоживання, тип поверхні чи складність маршруту. Тому дослідження принципів побудови, керування та ефективності гібридних роботів є актуальним завданням, що сприяє розвитку інтелектуальних автоматизованих систем і розширює сферу їх практичного застосування.

**ВСТУП.** Гібридні або мультимодальні роботи (рис. 1) представляють собою важливий напрям сучасної робототехніки, що поєднує здатність пересування у різних середовищах із використанням альтернативних режимів руху та приводів. Завданням таких систем є

забезпечення універсальності, адже вони мають працювати на суші, воді, повітрі або під водою без потреби заміни платформи.

З огляду на зростаючу потребу в автономних роботах для моніторингу довкілля, пошуково-рятувальних операцій, інспекції інфраструктури або транспортних задач, з'являється великий інтерес до трансформованих платформ і комбінованих приводних систем.



Рисунок 1 – Приклад гібридного робота типу «земля-вода» [2]

Систематичний аналіз існуючих розробок дозволяє виділити ключові технологічні тренди, наукові прогалини та технічні обмеження, що стримують широке впровадження гібридних роботів у практику.

**МАТЕРІАЛИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.** Сучасні гібридні платформи можуть класифікуватися за типом середовищ, у яких вони функціонують, та за механізмом переходу між режимами пересування. Наприклад, до категорії аеро-наземних відносяться роботи, що здатні літати та потім пересуватись по поверхні за допомогою коліс, гусениць або ніг. Амфібійні системи забезпечують рух по суші і плавання у воді, при цьому часто використовують гусениці або колісні модулі, які дозволяють роботам долати як тверду поверхню, так і водну гладь. Надводно-підводні чи аеро-підводні апарати переходять між режимами над і під поверхнею води, або змінюють середовище з повітря на воду. Крім цих класичних прикладів, існує ще група морфологічних трансформерів-роботів, які змінюють форму корпусу, опор або приводні органи для оптимізації під різні режими. Кожен із цих класів призначений вирішувати певний спектр завдань: від логістики чи інспекції до підводних досліджень або роботи в екстремальних умовах [1].

Реалізація гібридних роботів вирізняється складністю механічних трансформацій і комбінованих приводів. Здебільшого такі платформи включають або багатопозиційні шарніри, висувні опори та модулі, які змінюють положення відносно основного корпусу, або інтеграцію кількох приводних систем, наприклад, колеса або гусениці для суші плюс гвинти чи ротори для води або повітря. Два головні тренди у проєктах гібридних мобільних роботів – це наявність основного й додаткового режимів пересування або можливість трансформації одного приводу для декількох середовищ. При цьому головним викликом залишається баланс між механічною універсальністю та ефективністю: збільшення механічної складності

призводить до підвищеної маси, зниження енергоефективності і збільшення ризику відмов.

Вибір приводного рішення, зазвичай, залежить від таких факторів, як маса платформи, ефективність приводу у різних середовищах, складність системи герметизації (за наявності водного середовища), та простота керування приводами [1].

Навігація гібридних роботів є одним із найскладніших аспектів їхньої розробки. У режимі суші системи керування переважно спираються на GPS-одометрію, IMU та компаси, на твердій поверхні на колісні/гусеничні сенсори; у водному середовищі застосовують ультразвукові, сонарні або оптичні датчики. Перехід між режимами створює потребу в «гладкому» переключенні між контролерами або режимами планування траєкторій (mode switching, hybrid control). Комбінований підхід до навігації дозволяє досягати високої точності у несприятливих середовищах завдяки використанню різних сенсорів і фільтрації сигналу (Kalman-фільтри, Bezier-криві для трасування). У гібридних роботах додатково потрібно враховувати моменти переходу: наприклад, коли робот з води виходить на сушу або навпаки, система має швидко адаптуватися до зміни умов (підтримка тяги, стабілізація, зміна режиму приводу). У майбутньому високий потенціал мають алгоритми машинного навчання, які прогнозують стан робота і оптимізують поведінку під час зміни середовища [3-4].

Енергетична ефективність є одним із найважливіших аспектів для гібридних роботів, оскільки поєднання кількох типів приводів, трансформаційних механізмів і систем керування майже завжди призводить до значного збільшення споживання енергії. Згідно з дослідженням [5], рухова система може споживати понад 50 % усієї енергії мобільного робота, причому такі фактори, як розташування центру мас, тип приводу, а також алгоритм керування рухом мають критичний вплив на загальні енергетичні втрати. У випадку гібридних платформ це питання стає ще складнішим, адже для забезпечення роботи в кількох середовищах часто використовують додаткові модулі, наприклад, водяні гвинти, ротори або механізми трансформації шасі, що суттєво підвищують навантаження на джерело живлення.

Тому вже на етапі проектування важливо враховувати не лише енергоємність окремих компонентів, а й загальний баланс маси, розподіл енергії між системами, а також ефективність приводу у кожному режимі. Перспективним підходом є використання гібридних енергосистем, які комбінують традиційні акумуляторні батареї з відновлюваними джерелами енергії – сонячними панелями, паливними елементами або мікротурбінами. Такі рішення дозволяють збільшити автономність, особливо під час тривалих місій у віддалених або енергетично обмежених умовах.

Додатково, сучасні тенденції зосереджуються на застосуванні інтелектуальних систем енергоменеджменту, що використовують алгоритми машинного навчання для прогнозування споживання енергії й адаптації режимів роботи в реальному часі. Наприклад, робот може змінювати швидкість руху, деактивувати непотрібні сенсори або переходити в енергозберігаючий режим при очікуванні. Це не лише знижує втрати енергії, але й подовжує ресурс акумуляторів і підвищує загальну надійність системи. У перспективі поєднання енергоефективних приводів, легких конструкцій і розумного керування енергоспоживанням стане одним із ключових напрямів розвитку гібридних роботів нового покоління [5].

Гібридні мобільні роботи мають суттєві переваги – передусім універсальність і здатність виконувати широкий спектр завдань, недоступних для звичайних спеціалізованих платформ. Поєднання декількох способів пересування дає можливість одній системі ефективно працювати в різних середовищах – на суші, у воді чи навіть у повітрі. Це значно розширює сферу їх застосування: від екологічного моніторингу важкодоступних територій, інспекції підводних або берегових об'єктів, до виконання рятувальних чи пошукових місій, де потрібна оперативна зміна середовища роботи. Такий підхід дозволяє оптимізувати логістику та зменшити кількість спеціалізованих роботів, необхідних для комплексних операцій.

Разом з тим, подібна універсальність супроводжується низкою суттєвих технічних викликів. Поєднання різних типів приводів і механічних систем збільшує конструктивну складність, що ускладнює виробництво, обслуговування та ремонт. Герметизація корпусу, захист від корозії, забезпечення стійкості при переході між середовищами – усе це створює додаткові інженерні вимоги. Крім того, збільшення кількості механізмів призводить до росту маси й габаритів, що, у свою чергу, знижує енергоефективність та автономність роботи.

Окремим викликом є забезпечення стабільної поведінки під час переходу між режимами руху. Наприклад, момент виходу з води на сушу або навпаки супроводжується різкою зміною фізичних умов – опору середовища, ваги, моментів інерції. Для таких процесів потрібні адаптивні або гібридні алгоритми керування, які можуть оперативнo перемикатися між різними моделями динаміки. Це вимагає використання високоточних сенсорів, сонарів, камер, компасів) і складних систем злиття даних для побудови надійної моделі середовища [6-10].

Подальший розвиток гібридних роботів має здійснюватись через кілька ключових напрямів. Один із них – це створення морфологічно адаптивних платформ, здатних змінювати геометрію корпусу, привідні органи або опорні конструкції під режим руху. Інший важливий напрям – енергоефективність: оптимізація приводу, трансформацій, і інтеграція гібридних джерел живлення. Крім того, застосування інтелектуальних систем керування, які здатні прогнозувати зміну середовища, адаптувати поведінку робота і забезпечувати автоматичні переходи між режимами, має значний потенціал. Не менш важливим є розвиток мульти-агентних систем, коли декілька гібридних роботів координують свої дії в різних середовищах у межах однієї місії [10-18].

**ВИСНОВКИ.** Гібридні роботи є перспективним класом автономних систем, що поєднують переваги різних середовищ пересування і відкривають нові можливості для мобільної робототехніки. Ефективність таких систем залежить від збалансованого поєднання конструктивних, енергетичних та алгоритмічних рішень. Подальші дослідження мають бути спрямовані на удосконалення морфологічних трансформацій, створення енергоефективних приводних систем і підвищення надійності керування у перехідних режимах. Розвиток гібридної робототехніки сприятиме появі нових поколінь розумних мобільних систем, здатних діяти в найскладніших умовах природного середовища.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Russo, M., & Ceccarelli, M. (2020). A Survey on Mechanical Solutions for Hybrid Mobile Robots. *Robotics*, 9(2), 32. <https://doi.org/10.3390/robotics9020032>.
2. Amphibious Crawling Robots for Defense and Commercial Applications [Electronic resource] // *Unmanned Systems Technology. – Mode of access: https://www.unmannedsystemstechnology.com/2022/06/new-developer-of-amphibious-crawling-robots/*.
3. «Hybrid Navigation System Based Autonomous Positioning and Path Planning for Mobile Robots». (2022). *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35, Article 109. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00775-4>.
4. Review of hybrid aquatic-aerial vehicle (HAAV): Classifications, current status, applications, challenges and technology perspectives / Guocai Yao [et al.] // *Progress in Aerospace Sciences. – 2023. – Vol. 139. – P. 100902. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2023.100902*.
5. Wu, M., Yeong, C. F., Su, E. L. M., Holderbaum, W., & Yang, C. (2023). A review on energy efficiency in autonomous mobile robots. *Robotic Intelligence and Automation*, 43(6), 648-668. <https://doi.org/10.1108/RIA-05-2023-0060>.
6. Advantages and Disadvantages of Hybrid Drones | Acecore Technologies [Electronic resource].

resource]// Acecore Technologies. – Mode of access: <https://acecoretechnologies.com/hybrid-drones-advantages-and-disadvantages/>.

7. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.

8. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In 2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) (pp. 61-64). IEEE.

9. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.

10. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. *International Journal of Crowd Science*, 9(1), 29-43.

11. Yevsieiev, V., & Starodubcev, N. (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. *Scientific Collection «InterConf»*, (140), 648-651.

12. Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2024). Effect of Frame Processing Frequency on Object Identification Using MobileNetV2 Neural Network for a Mobile Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 36-44.

13. Yevsieiev V. Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / V. Yevsieiev, N. Starodubcev // Science in Environment of Rapid Changes : proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, Belgium, February 6-8, 2023. - Brussels : De Boeck, 2023. - Scientific Collection «InterConf» . - № 141. - P. 331-334.

14. Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). MobileNetv2 Neural Network Model for Human Recognition and Identification in the Working Area of a Collaborative Robot. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(8), 5-12.

15. Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). Using Convolutional Neural Networks to Analyze and Detect Key Points of Objects in Image. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 4(9), 5-15.

16. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2023, September). Mobile Robot Navigation System Based on Ultrasonic Sensors. In 2023 IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED) (Vol. 1, pp. 247-251). IEEE.

17. Yevsieiev V. Object Recognition and Tracking Method in the Mobile Robot's Workspace in Real Time / V. Yevsieiev, Amer Abu-Jassar, S. Maksymova // Technical science research in Uzbekistan. – 2024. – Vol. 2(2). – P. 115-124

18. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2022). A robotic prosthetic a control system and a structural diagram development. *Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ»*, (August 12, 2022; Zurich, Switzerland), 113-114.

*Науковий керівник: Бронніков Артем Ігорович, к.т.н., доц., доцент кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки*