

Є. С. ПЕЛИПЕНКО, Р. В. ЧЕРЕВАТЕНКО

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ АВТОНОМНИХ САМОХІДНИХ ПЛАТФОРМ З ГІБРИДНОЮ ТРАНСМІСІЄЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Сучасне сільське господарство зазнає суттєвих трансформацій під впливом глобальних економічних, екологічних та соціальних чинників. Однією з ключових проблем галузі є дефіцит кваліфікованої робочої сили, зростання витрат на традиційні енергетичні ресурси, а також необхідність підвищення продуктивності аграрного виробництва при одночасному зменшенні негативного впливу на довкілля. У зв'язку з цим все більшої уваги набуває розробка і впровадження автономних самохідних платформ сільськогосподарського призначення. **Метою даної роботи** є представлення існуючих автономних роботизованих самохідних платформ, які призначені до виконання різноманітних сільськогосподарських робіт. Для **вирішення окресленої мети** проаналізовані конструктивні особливості автономних платформ, які виконують легкі (обприскування, посів, міжрядна обробка, моніторинг стану посівів, тощо) та важкі (оранка, культивування) тягові операції. Також виокремлено фактори, що впливають на гібридизацію аграрних самохідних платформ, які виконують важкі тягові операції. Результатом дослідження є науково-обґрунтоване підґрунтя для подальших конструкторських та наукових робіт при створенні аграрних автономних роботизованих самохідних платформ з гібридною силовою установкою для виконання важких тягових операцій.

Ключові слова: самохідна платформа, шасі, конструкція, гібридна технологія, експлуатація, аналіз, орні роботи.

Y. PELYPENKO, R. CHEREVATENKO

ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF AUTONOMOUS SELF-PROPELLED PLATFORMS WITH HYBRID TRANSMISSION FOR AGRICULTURAL PURPOSES

Under the influence of global economic, environmental and social factors, modern agriculture is undergoing significant changes. One of the key issues facing the industry is the shortage of skilled labor, the rising cost of traditional energy resources and the need to increase the productivity of agricultural production while reducing the negative impact on the environment. In this context, the development and implementation of autonomous, self-propelled platforms for agricultural purposes is gaining increasing attention. The use of autonomous mobile equipment allows the implementation of comprehensive automation of technological processes in crop production, in particular, sowing, application of pesticides, inter-row cultivation, monitoring of crop condition, etc. High navigational accuracy, the ability to work in low visibility conditions and minimized operator involvement ensure reduced production costs, increased resource efficiency and improved quality of agro-technical operations. The objective of this work is to present existing autonomous robotic self-propelled platforms designed to perform various agricultural operations. In order to achieve this objective, the design characteristics of autonomous platforms performing light (spraying, sowing, inter-row cultivation, monitoring crop condition, etc.) and heavy (ploughing, cultivation) traction operations were analyzed. Factors influencing the hybridization of self-propelled agricultural heavy-duty platforms were also identified. The result of the study will be a scientifically sound basis for further design and scientific work on the development of autonomous agricultural robotic self-propelled platforms with a hybrid power plant for heavy-duty traction.

Key words: self-propelled platform, chassis, design, hybrid technology, operation, analysis, plowing operations.

Вступ. Сьогоднішні тенденції розвитку аграрного сектору свідчать про велику потребу використання ефективних технічних засобів сільськогосподарського призначення. Такий стан обумовлено перш за все вимогами до агроекологічної безпеки та економічної доцільності виробництва аграрної продукції. По-друге, виникає необхідність забезпечення сталих режимів експлуатації технічних засобів в умовах обмеженої витрати енергетичних ресурсів. З огляду на це, одним з перспективних напрямів інноваційного розвитку сільського господарства є впровадження автономних самохідних (роботизованих) платформ, які здатні виконувати широкий спектр технологічних (польових) операцій в автономному режимі – від обробітку ґрунту до збирання врожаю.

Незважаючи на значний технологічний розвиток у сфері аграрної роботизованих засобів, дослідження енергоефективності таких засобів залишається недостатньо проаналізованою,

адже цей показник суттєвим чином впливає на автономність, мобільність, продуктивність автономних самохідних платформ. За останнє десятиліття відбулось значне розширення переліку автономних самохідних платформ: автономні трактори сільськогосподарського призначення, автономні шасі (сівалки, обприскувачі, тощо), роботизовано дрони для моніторингу аграрної продукції. Також інтенсивно розвиваються системи точного землеробства [1, 2]: навігація, машинне навчання для розпізнавання об'єктів і прийняття рішень. Вдосконалюються також енергетичні силові установки таких платформ, а саме впроваджуються електричні та гібридні приводи, які покликані забезпечити вищу адаптацію до змінних тягових навантажень і дотримання агроекологічних вимог.

Проте, також слід зауважити, що такий розвиток зумовлює необхідність системного підходу до підвищення енергоефективності автономних самохідних платформ з урахуванням специфіки аграрних технологій та умов експлуатації.

Огляд сучасного стану питання. Аграрний сектор відіграє важливу роль в існуванні людства, адже його основою є задоволення постійно зростаючих потреб в продуктах харчування [3]. Класична робота в сільському господарстві характеризується сильною залежністю від традиційних джерел енергії техніки та людського фактору [4]. Зважаючи на зростання населення, погіршення кліматичних умов та прагнення до енергоефективності стає актуальним застосування аграрних самохідних платформ, що забезпечить автоматизацію сільськогосподарських технологій.

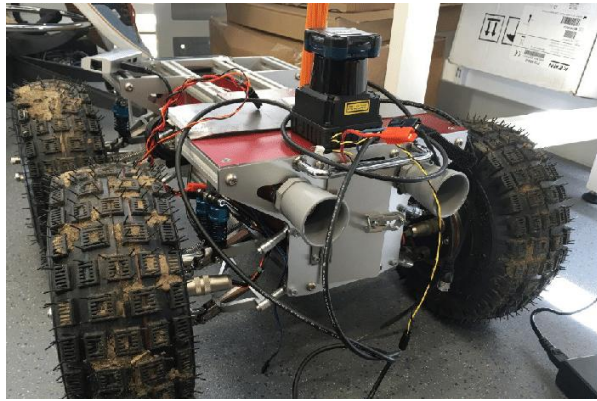
Протягом останніх років в сільському господарстві з'являється багато моделей автономних самохідних платформ створених науковцями та комерційними підприємствами [5]. Дані роботизовані платформи мають широкий спектр моделей і в більшості випадках вважаються легкими машинами (до 1 т). Такі наземні роботизовані платформи вважаються найперспективнішим рішенням для виконання сільськогосподарських робіт [6, 7]. Так, в роботі [8] встановлено, що використання одного традиційного важкого колісного трактора можна замінити декількома автономними легкими платформами, що матиме кращу економічну вигоду та підвищить агроекологічність шляхом зменшення ущільнення ґрунту, що, у свою чергу, пов'язане з ефективним використанням енергії та врожайністю. Проектування та адаптація автономних самохідних платформ в сільському господарстві ґрунтується на загальному підході (тобто на здатності забезпечувати достатню рухливість і ідентифікації об'єкта) та спеціалізованих аспектах, що пов'язані з особливостями конкретних сільськогосподарських операціях. Автори роботи [6] оприлюднили, що найбільш дослідженими є автоматизованими платформами є засоби для збирання та моніторингу врожаю, а найменш – засоби для посіву та обробки ґрунту. За даними з роботи [9] з'ясовано, що більше 50% сільськогосподарських автоматизованих платформ є колісними, що обумовлено більшою продуктивністю та автономністю в порівнянні з платформами на гусеничному ході. Однак, переваги платформ на гусеничному ході краще себе зарекомендували при роботі на схилах, адже в такому випадку забезпечується висока мобільність [10].

Автоматизовані самохідні платформи в цілому класифікуються за наступними особливостями:

- типом приводу (електричні, гібридні, дизельні);
- способом пересування (колісні, гусеничні, крокуючі);
- рівнем автономності (дистанційне керування, автономна навігація, повна автоматизація);
- функціональним призначенням (обприскування, посів, міжрядна обробка, моніторинг стану посівів, тощо).

В більшості випадках джерелом живлення сільськогосподарських автоматизованих платформ є електричний мотор, що перш за все обумовлено рядом переваг: масово-габаритні параметри, гнучкість керування, автоматизація, тощо [11]. Але з урахуванням таких переваг використання суто електричних джерел живлення обмежує енергетичні параметри та погіршує автономність платформи [12].

Технічні особливості сільськогосподарських платформ. Оскільки даний напрям дослідження доволі швидко розвивається, що зумовлює до створення великої кількості автоматизованих платформ для різних сільськогосподарських задач, дослідимо різні підходи до створення таких засобів. В роботі [5] наведено розробки сільськогосподарських автоматизованих платформ науково-дослідними центрами, а саме наступні моделі (рис. 1): Strathclyde, Husky, LadyBird, Robotanist.



а



б



в



г

Рис. 1 – Розробки сільськогосподарських автоматизованих платформ науково-дослідними центрами:

а – Strathclyde [13]; б – Husky [14]; в – LadyBird [15]; г – Robotanist [16]

Окрім розробок науково-дослідних центрів, також загально набули розробки комерційних підприємств [5], які пропонують наступні моделі (рис. 2): Myce-Agriculture, Ara, Ibex2, Thorvald, Vitirover, HV-100, VineScout, FieldFlux, платформи корпорації Naïo technology.

Аналізуючи технічні особливості автоматизованих платформ представлених на рис. 1, 2 відмітимо, що в переважній більшості їх застосовність ґрунтується на просапних, моніторингових та збиральних операціях в сільськогосподарських угіддях, а саме обприскування гербіцидами, косіння газонів, фенотипування рослин, розвідка стиглості винного винограду та обрізка, механічна прополка та зміна розташування горщиків для рослин. Єдиний чинник, який їх об'єднує це здатність працювати виключно на електричному приводі. Систематизуючи їх технічні характеристики звернемо увагу на те, що середня технологічна швидкість складає 0,67 м/с (~2,4 км/год) і мають енергетичну автономію в середньому 27 годин.

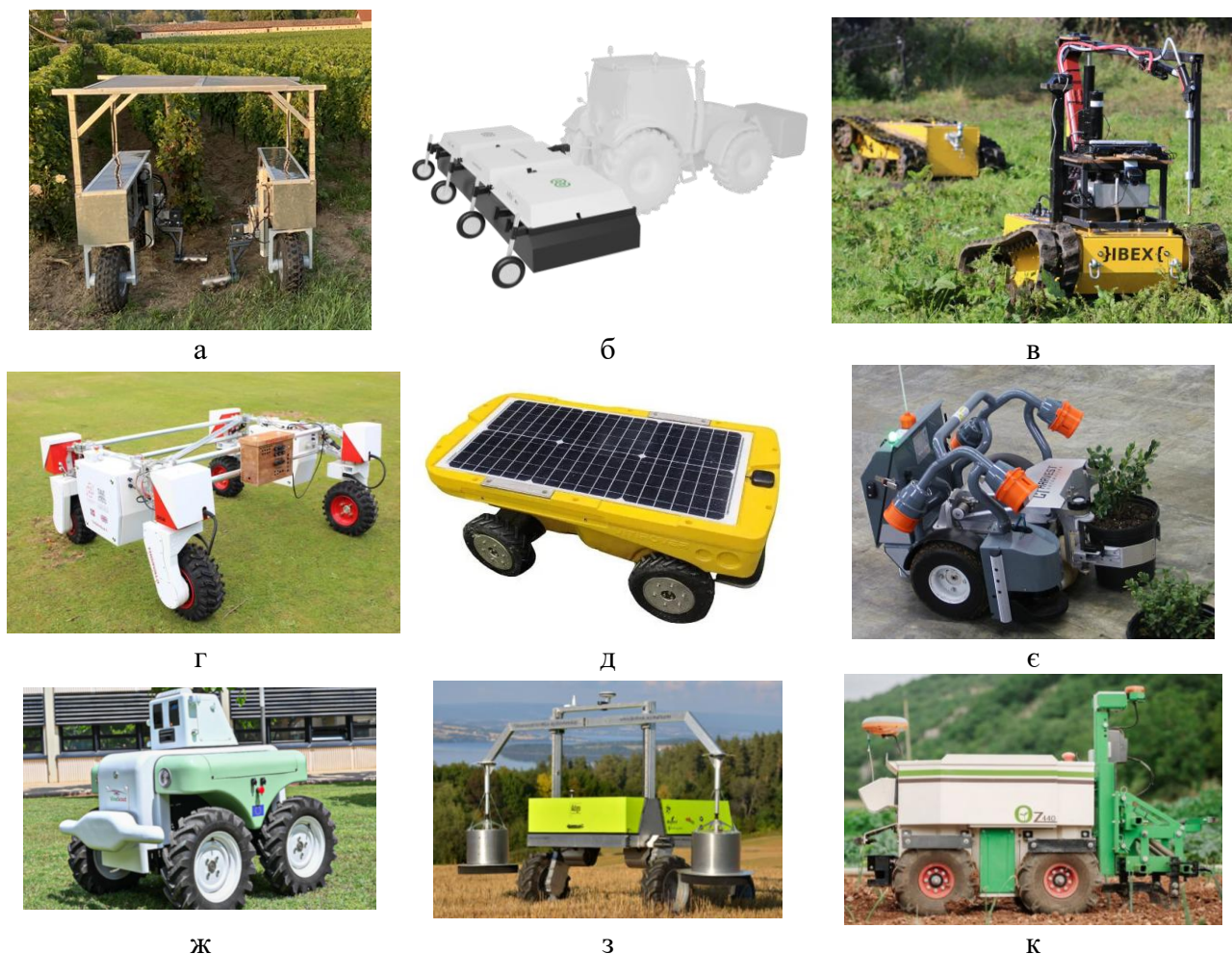


Рис. 2 – Розробки сільськогосподарських платформ комерційними підприємствами: а – Myce-Agriculture [17]; б – Ara [18]; в – Ibex2 [19]; г – Thorvald [20]; д – Vitirover [21]; е – HV-100 [22]; ж – VineScout [23]; з – FieldFlux [24]; к – платформи Naïo technology [25]

Зважаючи на вище наведене виконаємо аналіз існуючих автоматизованих платформ, які здатні виконувати важкі тягові роботи. Так, на рис. 3 наведено нідерландські платформи AgXeed [26], які пропонують платформи, що працюють автономно до 23 годин.



Рис. 3 – Автоматизовані платформи AgXeed:
а – AgBot 5.115T2; б – AgBot 2.055 W4; в – AgBot 2.055 W3

AgBot оснащений чотирициліндровим дизельним двигуном внутрішнього згоряння Deutz потужністю 156 к.с., який приводить в дію електричний генератор. Цей генератор забезпечує живлення усіх приводів платформи: трансмісійні вузли, вал відбору потужності, вентилятори охолодження та інші системи. Такий дизель-електричний привід дозволяє оптимізувати енергоспоживання та забезпечити стабільну роботу в різних умовах. Гусенична платформа

AgBot 5.115T2 має змогу реалізувати тягове навантаження до 8т. Окрім виконання широкого спектру польових робіт з високою точністю та енергоефективністю дана платформа здатна транспортувати двовісний причеп.

Наступним розглянемо Raven OMNiPOWER (раніше відома як DOT Power Platform) – це автономна аграрна самохідна платформа, яка призначена для виконання широкого спектру сільськогосподарських завдань без участі оператора. Її конструкція передбачає можливість швидкої заміни навісного обладнання, що забезпечує доволі високу адаптацію до виконання різноманітних сільськогосподарських робіт.



Рис. 4 – Raven OMNiPOWER [27]

Швидка заміна робочих модулів забезпечується унікальною U-подібною формою платформи, яка дозволяє виконувати аграрні роботи з різноманітним навісним обладнанням (сівалки, обприскувачі, розкидачі добрив, тощо). Платформа оснащена дизельним двигуном внутрішнього згоряння Cummins QSB4.5 Stage 5 Final потужністю 200 к.с. Виробник [27] заявляє, що дана платформа оснащується гідрооб'ємною передачею, забезпечуючи тим самим плавний рух та точне управління швидкістю.

Також за концепцією будови, а саме за змінною модульною U-подібною формою платформи створено австралійською компанією SwarmFarm Robotics (рис. 5), яка призначена для виконання наступних операцій: культивування, сівба, міжрядна обробка (внесення органічних добрив).



Рис. 5 – SwarmBot [28]

Силова установка забезпечує рух платформи завдяки дизельним двигунам потужністю від 75 – 150 к.с. Так само, як й Raven OMNiPOWER оснащується гідрооб'ємною передачею. Вага платформи може варіюватися від 0,9 до 2 т залежно від оснастки технологічним обладнанням. Максимальна швидкість до 20 км/год, а також здатність автономно працювати до 24 годин.

Повністю електричним є шведська автономна платформа Drever 120 (рис. 6), яка призначена для виконання важких тягових сільськогосподарських робіт (культивация, боронування, тощо).



Рис. 6 – Автономна платформа Drever 120 [29]

Енергосистема Drever 120 оснащена модульною системою заміни акумуляторних батарей (дві акумуляторні батареї по 250 кВт·год), розробленою у співпраці з Micropower Group, що дозволяє швидко замінювати батареї, забезпечуючи безперервну роботу в полі від 4 до 12 годин залежно від тягової операції. Платформа Drever 120 оснащується електричними мотор-колесами, які в еквіваленті мають потужність 150 к.с. Це дозволяє коректно контролювати зміну сили тяги та швидкісних показників руху, що сприяє підвищенню маневреності та ефективності роботи платформи.

Окремо слід виділити, розробленого ще у 2016 році компанією Case IH концептуальний автономний трактор Case IH Autonomous Concept Vehicle (рис. 7), який базується на серійній моделі Case IH Magnum і призначений для виконання різноманітних сільськогосподарських завдань без присутності оператора в кабіні.



Рис. 7 – Автономний трактор Case IH Autonomous Concept Vehicle [30]

Силовий агрегат автономного трактору використовує стандартний двигун від Case IH Magnum (185 – 380 к.с.), що забезпечує високу потужність та надійність. Трактор обладнаний безступінчастою трансмісією CVX, яка забезпечує плавну зміну швидкості та оптимальну передачу потужності на колеса. За такою ж концепцією, як й Автономний трактор Case IH Autonomous Concept Vehicle, створено електричний автономний трактор Monarch (рис. 8а) та John Deere Autonomous 8R Tractor (рис. 8б).



а



б

Рис. 8 – Автономні трактори:
а – Monarch (США) [31]; б – John Deere Autonomous 8R [32]

Порівнюючи технічні характеристики автономних тракторів та роботизованих платформ, необхідно зважати на те, що в них є як спільні риси (автономність і системи управління та навігації), так і від'ємні (конструкція, універсальність, реалізація тягових зусиль, адаптованість до всіх сільськогосподарських робіт, вартість). Зважаючи на це, сформуємо табл. 1 з характеристиками автономних роботизованих платформ та автономних тракторів.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика автономних платформ та автономних тракторів

Критерій	Автономні платформи	Автономні трактори
Призначення	Спеціалізовані операції (обприскування, моніторинг, догляд за рослинами)	Універсальні сільськогосподарські операції (оранка, посів, культивация)
Конструкція	Компактна, легка, часто електрична або гібридна (послідовної структури)	Класична тракторна архітектура з ДВЗ та механічною трансмісією або ГОМТ

закінчення таблиці 1

Критерій	Автономні платформи	Автономні трактори
Потужність і вантажопідйомність	Обмежена	Висока, придатна до важких польових (тягових) робіт
Тип трансмісії	Електрична або гібридна	Механічна, гід्रोоб'ємно-механічна, варіаторна
Гнучкість застосування	Висока в дрібносекторних або точкових технологіях	Краще підходять для великих площ та інтенсивного використання
Масштабованість	Можливість одночасної роботи кількох платформ (рої)	Зазвичай одиничне застосування
Навігаційні системи	GPS, LiDAR, комп'ютерний зір, сенсори	
Ціна придбання та обслуговування	Низька вартість, доступне технічне обслуговування	Висока початкова вартість і складне обслуговування
Енергоефективність	Висока — оптимальні режими роботи, зниження втрат, менша маса	Середня — залежить від трансмісії, завантаження, досвіду експлуатації
Економічна доцільність	Висока у малих і середніх господарствах, для спеціалізованих робіт	Висока у великих агропідприємствах з великими обсягами роботи
Сфера застосування	Овочівництво, ягідництво, теплиці, виноградники	Зернові культури, технічні культури, загальні польові роботи

З урахуванням трендів автоматизації, діджиталізації та переходу до точного землеробства, створення гібридних автоматизованих платформ набуває актуального значення для підвищення продуктивності праці, зменшення собівартості аграрної продукції та збереження природних ресурсів. Таким чином, дослідження та розробка гібридних автономних мобільних платформ (засобів) є доцільним напрямом, що відповідає викликам сучасного сільського господарства та сталого розвитку.

Фактори, що впливають на гібридизацію аграрних самохідних платформ. Застосування гібридних систем дозволяє об'єднати переваги двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) і електричних приводів, зменшуючи вплив їхніх окремих недоліків. На вибір гібридної архітектури впливають такі ключові фактори:

– *Рівень енергоспоживання при виконанні тягових робіт.* Тягові робочі цикли, пов'язані з реалізацією великого крюкового навантаження (оранка, культивация), що потребує сталої роботи силових агрегатів. У таких випадках застосування ДВЗ, як генератора електричної енергії в гібридних схемах трансмісії (послідовний або паралельний гібрид) дає змогу забезпечити безперервну роботу при зниженому споживанні пального, особливо в порівнянні з традиційним використанням дизельного ДВЗ.

– *Прагнення до зменшення експлуатаційних витрат.* Електричні приводи мають вищу енергоефективність та потребують меншого технічного обслуговування порівняно з гідравлічними та механічними приводами [33]. Гібридизація дозволяє використовувати електропривід для допоміжних систем (керування, навігація, привід навісного обладнання для внесення добрив та сівалок), знижуючи загальні витрати на технічне обслуговування.

– *Адаптація до сільськогосподарських робіт.* У польових умовах забезпечення підзарядки повністю електричних платформ доволі складне завданням. Гібридні рішення з ДВЗ-генератором дозволяють заряджати акумуляторні батареї безпосередньо у польових умовах, що зменшує залежність від зарядної інфраструктури.

– *Універсальність та модульність компоновки.* Гібридні силові установки дають змогу розділити силову установку на модулі (ДВЗ — генератор — акумулятор — тягові електродвигуни), що дозволяє адаптувати платформу під різні задачі [34]. Це підвищує універсальність і дає змогу легше інтегрувати нові компоненти (наприклад, воднево-електричні системи в майбутньому).

– *Екологічність технології.* Посилення екологічних стандартів (European Green Deal, Stage V, CAP Reform, тощо) стимулює виробників аграрної техніки до зменшення викидів ДВЗ.

Гібридизація дозволяє працювати ДВЗ в оптимальному режимі з мінімальним навантаженням, знижуючи викиди та шум.

Зважаючи на такі фактори, безперечно актуальність впровадження в аграрні автономні самохідні платформи гібридних технологій є перспективним. Зауважимо, що впровадження гібридних трансмісій послідовної структури доречно використовувати на сільськогосподарських операціях, які не вимагають великих енергозатрат на реалізацію тягових зусиль. Гібридні технології паралельної структури доцільно використовувати для платформ, що виконуватимуть спеціалізовані тягові роботи (оранка, культивация, тощо [35, 36]).

Використання паралельних гібридних трансмісій в аграрних автономних платформах потребує наукового вирішення в питаннях: узгодження силових потоків, що циркулюють в трансмісії; чутливість роботи ДВЗ при змінному чи непередбачуваному навантаженні [37]; складність забезпечення високої керованості та маневреності платформи. Також при розробці автономних платформ, що виконуватимуть спеціалізовані тягові роботи, необхідно враховувати: взаємодію рушіїв з ґрунтом, адже високий опір коченню призводить до збільшення енергетичних витрат, так само як й надмірне буксування рушіїв, що потребує коректного визначення розподілу ваги на рушії.

Висновки.

Виконано аналіз сучасних автоматизованих самохідних платформ сільськогосподарського призначення. Висвітлено здобутки закордонних наукових центрів та комерційних підприємств при проектуванні аграрних роботизованих платформ. Наведено автоматизовані платформи, що здатні виконувати важкі тягові операції (оранка, культивация). Виконано порівняльний аналіз характеристик автономних платформ та автономних тракторів, який показав, що розробка та дослідження автономних платформ є більш перспективним. Сформовано фактори, що впливають на гібридизацію аграрних самохідних платформ. Наведено наукове підґрунтя для розробки аграрної самохідної платформи з гібридною трансмісією.

Список літератури:

1. Rehman A., Alamoudi Y., Khalid H., Morchid A., Mueen S., Abdelaziz A. Smart agriculture technology: An integrated framework of renewable energy resources, IoT-based energy management, and precision robotics, *Cleaner Energy Systems*. Vol. 9. 2024. 100132. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100132>.
2. Вплив використання безпілотних літальних апаратів на підвищення ефективності технологічного процесу в рослинництві / М. Л. Шуляк, М. О. Мікуліна, Я. В. Мудрий, В. О. Пирогов // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Сер. : Автомобіле- та тракторобудування : зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ", 2023. № 1. С. 111-116. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.1.13>.
3. Jararweh Y., Fatima S., Jarrah M., AlZu'bi S. Smart and sustainable agriculture: fundamentals, enabling technologies, and future directions. *Comput. Electr. Eng.* 110. 2023. 108799. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108799>.
4. Wakweya R.B. Challenges and prospects of adopting climate-smart agricultural practices and technologies: implications for food security. *J. Agric. Food Res.* 14. 2023. 100698. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100698>.
5. Gil G., Casagrande D.E., Cort'es L.P., Verschae R. Why the low adoption of robotics in the farms? Challenges for the establishment of commercial agricultural robots, *Smart Agr. Technol.* 3. 2023. 100069. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100069>.
6. Fountas S., Mylonas N., Malounas I., Rodias E., Hellmann Santos C., Pekkeriet E. Agricultural robotics for field operations, *Sensors*. 20 (9). 2020. 2672. <https://doi.org/10.3390/s20092672>.
7. Y'opez-Ponce D.F., Salcedo J.V., Rosero-Montalvo P.D., Sanchis J. Mobile robotics in smart farming: current trends and applications, *Front. Artif. Intell.* 6. 2023. 1213330. <https://doi.org/10.3389/frai.2023.1213330>.
8. Lagnel'ov O., Larsson G., Larssolle A., Hansson P.A. Impact of lowered vehicle weight of electric autonomous tractors in a systems perspective, *Smart Agr. Technol.* 4. 2023. 100156. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100156>.
9. Oliveira L.F., Moreira A.P., Silva M.F. Advances in agriculture robotics: a state-of-the-art review and challenges ahead, *Robotics*. 10 (2). 2021. 52. <https://doi.org/10.3390/robotics10020052>.
10. Vidoni R., Gallo R., Ristorto G., Carabin G., Mazzetto F., Scalera L., Gasparetto A. ByeLab: an agricultural mobile robot prototype for proximal sensing and precision farming, in: *ASME international mechanical engineering congress and exposition 58370*. American Society of Mechanical Engineers. 2017. p. V04AT05A057.

11. Ghobadpour A., Boulon L., Mousazadeh H., Malvajerdi A.S., Rafiee S. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems, *Energy Procedia*. 162. 2019. P. 4 – 13, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.002>.
12. Sara G., Todde G., Pinna D., Caria M. Evaluating an autonomous electric robot for real farming applications. *Smart Agricultural Technology*. Vol. 9. 2024. 100595. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100595>.
13. Niu C., Yan X. Energy optimization path planning for battery-powered agricultural rover. *MATEC Web of Conferences*, 173. 2018. Article 02001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817302001>.
14. HUSKY A300. Unmanned ground vehicle [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://clearpathrobotics.com/husky-a300-unmanned-ground-vehicle-robot/>.
15. Underwood J., Wendel A., Schofield B., McMurray L., Kimber R. Efficient in-field plant phenomics for row-crops with an autonomous ground vehicle: UNDERWOOD et al, *J. Field Robot.* 34 (6). 2017. P. 1061 – 1083. <https://doi.org/10.1002/rob.21728>.
16. Mueller-Sim T., Jenkins M., Abel J., Kantor G. The Robotanist: a ground-based agricultural robot for high-throughput crop phenotyping, in: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore, Singapore. 2017. P. 3634 – 3639. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989418>.
17. Leobotics. Wall-Ye Myce Agricultural Robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.leobotics.com/comparateur-robot/robot-agricole-wall-ye-myce_vigne-desherbage-epamprage-tonte-binage-autonome?category%3Drobot-animal
18. GOFAR. ecoRobotix представляє ARA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agricultural-robotics.com/news/ecorobotix-introduces-ara>
19. Ibex2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ibexautomation.co.uk/>
20. Coxworth B. Agricultural robot could be outstanding in its field [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newatlas.com/thorvald-agricultural-robot/46039/>
21. Agtecher: The Agri Tech Place. Vitirover: Solar-Powered Vineyard Mower [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agtecher.com/product/vitirover/>
22. Guarco A. Prototyping harvest automation's HV-100 robot for agricultural spacing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.prototypingengineer.com/prototyping-harvest-automations-hv-100-robot-agricultural-spacing/>
23. SYMINGTON. VineScout Vineyard Monitoring Robot: Year 2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.symington.com/post/vinescout-vineyard-monitoring-robot-year-2>
24. NMBU Field Flux Robot2012: Precision farming. Automatic N2O measurement in the field [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.adigomechatronics.com/projects/field-flux-robot>
25. GOFAR. Naïo Technologies Goes Global [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agricultural-robotics.com/news/naio-technologies-goes-global>
26. AgXeed. AgBot autonomous field robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agxeed.com/>
27. RAVEN. Raven Provides OMNiPOWER™ Platform For World's First OMNi Farm Enterprise [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ravenind.com/resources/news/raven-provides-omnipower-platform-for-worlds-first-omni-farm-enterprise>
28. Swarm farm. Robotic agriculture [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.swarmfarm.com/>
29. RI.SE: Autonomous tractor with battery replacement robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ri.se/en/autonomous-tractor-with-battery-replacement-robot>
30. CNH: Case IH Autonomous Concept Tractor Receives GOOD DESIGN Award [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://media.cnh.com/north-america/case-ih/case-ih-autonomous-concept-tractor-receives-good-design-award/s/ae36687b-45b6-44b7-a504-3cd75b174993>
31. Monarch. Driving Farm Profitability and Planet Sustainability [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.monarchtractor.com/>
32. John Deere. Why Do I Need Autonomy? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.deere.com/en/autonomous/>
33. Vacca A. Energy Efficiency and Controllability of Fluid Power Systems. *Energies*. 2018. 11. 1169. <https://doi.org/10.3390/en11051169>.
34. Технологічні процеси сервісу транспортних засобів з електричним та гібридним приводом : конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Вячеслав Шавкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 123 с.
35. Kozhushko A., Tkachov V., Mittsel M., Sokolik S. Stanciu D. Optimization of traction properties the electric tractor based on the simulation DLG-Powermix test cycles. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 15. 2024. P. 70–78. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue14.5>.
36. Rebrov O., Kozhushko A., Kalchenko B., Mamontov A., Zakovorotniy A., Kalinin E., Holovina E. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2020. 4. P. 90 – 100. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001352>.
37. Jaksic N. Hybrid Electric Vehicle Technology. Boca Raton, FL: CRC Press. 2020. ISBN: 9780367332050.

References (transliterated):

1. Rehman A., Alamoudi Y., Khalid H., Morchid A., Muyeen S., Abdelaziz A. Smart agriculture technology: An integrated framework of renewable energy resources, IoT-based energy management, and precision robotics, *Cleaner Energy Systems*. Vol. 9. 2024. 100132. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100132>.
2. Shuliak M. L., Mikulina M. O., Mudryi Ya. V., Pyrohiv V. O. Vplyv vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ na pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohichnoho protsesu v roslynnytstvi [The effect of the use of unmanned aerial vehicles on increasing the efficiency of the technological process in plant farming]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser.: Avtomobile- ta traktorobuduvannia* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automobile and tractor building]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2023. № 1. pp. 111-116. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.1.13>.
3. Jararweh Y., Fatima S., Jarrah M., AlZu'bi S. Smart and sustainable agriculture: fundamentals, enabling technologies, and future directions. *Comput. Electr. Eng.* 110. 2023. 108799. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108799>.
4. Wakweya R.B. Challenges and prospects of adopting climate-smart agricultural practices and technologies: implications for food security. *J. Agric. Food Res.* 14. 2023. 100698. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100698>.
5. Gil G., Casagrande D.E., Cort'es L.P., Verschae R. Why the low adoption of robotics in the farms? Challenges for the establishment of commercial agricultural robots, *Smart Agr. Technol.* 3. 2023. 100069. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100069>.
6. Fountas S., Mylonas N., Malounas I., Rodias E., Hellmann Santos C., Pekkeriet E. Agricultural robotics for field operations, *Sensors*. 20 (9). 2020. 2672. <https://doi.org/10.3390/s20092672>.
7. Y'opez-Ponce D.F., Salcedo J.V., Rosero-Montalvo P.D., Sanchis J. Mobile robotics in smart farming: current trends and applications, *Front. Artif. Intell.* 6. 2023. 1213330. <https://doi.org/10.3389/frai.2023.1213330>.
8. Lagnel'ov O., Larsson G., Larsolle A., Hansson P.A. Impact of lowered vehicle weight of electric autonomous tractors in a systems perspective, *Smart Agr. Technol.* 4. 2023. 100156. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100156>.
9. Oliveira L.F., Moreira A.P., Silva M.F. Advances in agriculture robotics: a state-of-the-art review and challenges ahead, *Robotics*. 10 (2). 2021. 52. <https://doi.org/10.3390/robotics10020052>.
10. Vidoni R., Gallo R., Ristorto G., Carabin G., Mazzetto F., Scalera L., Gasparetto A. ByeLab: an agricultural mobile robot prototype for proximal sensing and precision farming, in: *ASME international mechanical engineering congress and exposition 58370*. American Society of Mechanical Engineers. 2017. pp. V04AT05A057.
11. Ghobadpour A., Boulon L., Mousazadeh H., Malvajerdi A.S., Rafiee S. State of the art of autonomous agricultural off-road vehicles driven by renewable energy systems, *Energy Procedia*. 162. 2019. pp. 4 – 13, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.002>.
12. Sara G., Todde G., Pinna D., Caria M. Evaluating an autonomous electric robot for real farming applications. *Smart Agricultural Technology*. Vol. 9. 2024. 100595. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100595>.
13. Niu C., Yan X. Energy optimization path planning for battery-powered agricultural rover. *MATEC Web of Conferences*, 173. 2018. Article 02001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817302001>.
14. HUSKY A300. Unmanned ground vehicle [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://clearpathrobotics.com/husky-a300-unmanned-ground-vehicle-robot/>.
15. Underwood J., Wendel A., Schofield B., McMurray L., Kimber R. Efficient in-field plant phenomics for row-crops with an autonomous ground vehicle: UNDERWOOD et al, *J. Field Robot.* 34 (6). 2017. pp. 1061 – 1083. <https://doi.org/10.1002/rob.21728>.
16. Mueller-Sim T., Jenkins M., Abel J., Kantor G. The Robotanist: a ground-based agricultural robot for high-throughput crop phenotyping, in: *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Singapore, Singapore. 2017. P. 3634 – 3639. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989418>.
17. Leobotics. Wall-Ye Myce Agricultural Robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.leobotics.com/comparateur-robot/robot-agricole-wall-ye-myce_vigne-desherbage-epamprage-tonte-binage-autonome?category%3Drobot-animal
18. GOFAR. ecoRobotix представляє ARA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agricultural-robotics.com/news/ecorobotix-introduces-ara>
19. Ibex2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ibexautomation.co.uk/>
20. Coxworth B. Agricultural robot could be outstanding in its field [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newatlas.com/thorvald-agricultural-robot/46039/>
21. Agtecher: The Agri Tech Place. Vitirover: Solar-Powered Vineyard Mower [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agtecher.com/product/vitirover/>
22. Guarco A. Prototyping harvest automation's HV-100 robot for agricultural spacing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.prototypingengineer.com/prototyping-harvest-automations-hv-100-robot-agricultural-spacing/>
23. SYMINGTON. VineScout Vineyard Monitoring Robot: Year 2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.symington.com/post/vinescout-vineyard-monitoring-robot-year-2>
24. NMBU Field Flux Robot2012: Precision farming. Automatic N2O measurement in the field [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.adigomechatronics.com/projects/field-flux-robot>

25. GOFAR. Naïo Technologies Goes Global [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agricultural-robotics.com/news/naio-technologies-goes-global>
26. AgXeed. AgBot autonomous field robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.agxeed.com/>
27. RAVEN. Raven Provides OMNiPOWER™ Platform For World's First OMNi Farm Enterprise [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ravenind.com/resources/news/raven-provides-omnipower-platform-for-worlds-first-omni-farm-enterprise>
28. Swarm farm. Robotic agriculture [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.swarmfarm.com/>
29. RI.SE: Autonomous tractor with battery replacement robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ri.se/en/autonomous-tractor-with-battery-replacement-robot>
30. CNH: Case IH Autonomous Concept Tractor Receives GOOD DESIGN Award [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://media.cnh.com/north-america/case-ih/case-ih-autonomous-concept-tractor-receives-good-design-award/s/ae36687b-45b6-44b7-a504-3cd75b174993>
31. Monarch. Driving Farm Profitability and Planet Sustainability [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.monarchtractor.com/>
32. John Deere. Why Do I Need Autonomy? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.deere.com/en/autonomous/>
33. Vacca A. Energy Efficiency and Controllability of Fluid Power Systems. *Energies*. 2018. 11. 1169. <https://doi.org/10.3390/en11051169>.
34. Tekhnologichni protsesy servisu transportnykh zasobiv z elektrychnym ta hibridnym pryvodom : konspekt lektsii dlia zdobuvachiv druho (mahistersko) rivnia vyshchoi osvity vsikh form navchannia zi spetsialnosti 141 Elektroenergetyka, elektrotehnika ta elektromechanika [Technological processes of servicing vehicles with electric and hybrid drives: a lecture outline for students of the second (master's) level of higher education of all forms of study in specialty 141 Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics]. Viacheslav Shavkun ; Kharkiv. Nats. un-t misk. hosp-va im. O.M. Beketova. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 2022. – 123 p.
35. Kozhushko A., Tkachov V., Mittsel M., Sokolik S. Stanciu D. Optimization of traction properties the electric tractor based on the simulation DLG-Powermix test cycles. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 15. 2024. pp. 70–78. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue14.5>.
36. Rebrov O., Kozhushko A., Kalchenko B., Mamontov A., Zakovorotnyy A., Kalinin E., Holovina E. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2020. 4. pp. 90 – 100. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001352>.
37. Jaksic N. Hybrid Electric Vehicle Technology. Boca Raton, FL: CRC Press. 2020. ISBN: 9780367332050.

Надійшла (received): 24.04.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Пелипенко Євген Сергійович (Yevhen Pelypenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8988-791X>; e-mail: pelipenkoeugene@gmail.com

Череватенко Роман Валерійович (Roman Cherevatenko) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2912-6558>; e-mail: r.cherevatenko1@gmail.com