

А. А. ХОДИСЬКО

АНАЛІЗ БАЗОВИХ АРХІТЕКТУР ГІБРИДНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК В КОНТЕКСТІ ВИКОРИСТАННЯ В САМОХІДНИХ ПЛАТФОРМАХ НАЗЕМНИХ РОБОТИЗОВАНИХ КОМПЛЕКСІВ

В роботі запропонований аналіз конструктивних особливостей, принципів роботи, переваг та обмежень базових архітектур гібридних силових установок: послідовної, паралельної та комбінованої. Метою даного аналізу є визначення доцільності їх використання в самохідних платформах наземних роботизованих комплексів відповідно до їх призначення. Результати роботи систематизують інженерні компроміси кожної архітектури, створюючи підґрунтя для обґрунтованого вибору типу гібридної силової установки відповідно до цільового призначення платформи.

Ключові слова: гібридна силова установка, енергоефективність, самохідна платформа, наземний роботизований комплекс, послідовна архітектура, паралельна архітектура, комбінована архітектура.

А. KHODYSKO

ANALYSIS OF BASIC HYBRID POWERTRAIN ARCHITECTURES FOR UNMANNED GROUND VEHICLE PLATFORMS

The paper provides an analysis of the characteristics, advantages, and limitations of series, parallel, and series-parallel hybrid powertrain architectures for unmanned ground vehicle platforms. The study assesses their suitability for various operational requirements based on a review of scientific literature. It is shown that the series architecture is optimal for missions requiring low signatures and precise control but suffers from energy conversion losses. The parallel architecture offers higher energy efficiency for steady-speed operations but involves greater mechanical complexity. The series-parallel architecture provides the most versatile solution by integrating the benefits of both systems, yet it is characterized by the highest structural complexity and cost. The results systematize engineering trade-offs, providing a foundation for selecting the appropriate configuration based on the intended operational role of the unmanned ground vehicle.

Keywords: hybrid powertrain, energy efficiency, unmanned ground vehicle, self-propelled platform, series architecture, parallel architecture, series-parallel architecture.

Вступ. Активне розширення сфери застосування наземних роботизованих комплексів (НРК) – від експериментальних прототипів до серійних зразків військових та цивільних наземних роботизованих комплексів – висуває до самохідних платформ НРК нові вимоги до енергоефективності. Підвищення вимог до дальності маршрутів та часу автономної роботи наземних роботизованих комплексів без дозавправлення або підзаряджання, енергозабезпечення корисного навантаження та забезпечення відповідних до цільового призначення НРК тягових характеристик зумовлює підвищений інтерес до самохідних платформ з гібридною силовою установкою (ГСУ), що поєднують переваги електричної тяги з високою питомою енергією традиційного пального. Практичне використання ГСУ в автомобільній галузі демонструє, що ГСУ здатна забезпечити значне збільшення запасу ходу за рахунок збільшення паливної ефективності, зберігаючи при цьому ключові переваги електроприводу: високий коефіцієнт корисної дії (ККД), високий крутний момент з нульової швидкості та можливість рекуперації кінетичної енергії під час гальмування. Звіт MarketsandMarkets прогнозує зростання ринку електрифікації військової техніки, що включає гібридні та електричні платформи, з 3,47 млрд дол. США у 2025 році до 6,82 млрд дол. США до 2030 року [1].

Вибір архітектури ГСУ – є складною інженерною задачею, оскільки кожна з архітектур має унікальний набір переваг та обмежень. Незважаючи на значну кількість досліджень окремих аспектів гібридних приводів, у науковій літературі бракує консолідованого аналізу всіх трьох базових архітектур ГСУ саме в контексті їх використання в самохідних платформах НРК, який би системно пов'язував інженерні компроміси з експлуатаційними вимогами різних

типів місій НРК. Відсутність такого аналізу ускладнює вибір архітектури силової установки при проектуванні та стримує впровадження оптимальних інженерних рішень.

Метою даної статті є проведення аналізу базових архітектур ГСУ для використання в самохідних платформах НРК, з оцінкою доцільності їх використання для різних місій. Для досягнення мети потрібно вирішити наступні завдання:

- принципи функціонування послідовної (ПСГА), паралельної (ПРГА) та комбінованої (КГА) гібридної архітектури;
- навести приклади використання кожної архітектури ГСУ в експериментальних та серійних зразках самохідних платформ НРК;
- систематизувати ключові переваги та обмеження кожної архітектури ГСУ;
- оцінити доцільність використання кожної архітектури для різних місій НРК.

Отримані результати систематизують інженерні компроміси кожної архітектури ГСУ, створюючи науково-технічне підґрунтя, яке дозволяє конструкторам на ранніх етапах розробки обґрунтовано обирати тип ГСУ відповідно до цільового призначення НРК.

Огляд сучасного стану питання. Сфера застосування сучасних НРК охоплює як цивільні сектори, зокрема високоточне сільське господарство, автоматизовану логістику і промисловий моніторинг, так і спеціалізовані оборонні завдання, включно з розвідкою, інженерними роботами та вогневою підтримкою. Самохідні платформи НРК з виключно електричною тягою, що домінували на ранніх етапах розвитку НРК, все частіше виявляються нездатними задовольнити сучасні операційні вимоги. Фундаментальні обмеження, насамперед низька питома щільність енергії літій-іонних батарей порівняно з рідким паливом, унеможливають забезпечення необхідних запасу ходу, тривалості місій та живлення зростаючої потужності корисного навантаження НРК. Ця проблема загострюється в польових умовах через повну відсутність зарядної інфраструктури. Саме тому ГСУ стали технологічною відповіддю на цей комплекс викликів. Використання ГСУ дозволяє не лише збільшити запас ходу та тривалість місій, але й забезпечити тактичну гнучкість в умовах специфічних вимог різних місій НРК в цивільному та військовому секторах.

Аналіз наукової літератури показує, що, незважаючи на актуальність теми, існуючі дослідження чітко групуються за кількома основними напрямками, жоден з яких не аналізує конструктивні особливості базових архітектур ГСУ з притаманними їм перевагами та обмеженнями в контексті використання в самохідних платформах НРК. Зокрема, велика частина оглядів [2, 3, 4, 5] надає фундаментальний опис трьох базових архітектур, але виключно в контексті цивільних легкових автомобілів. Їхні висновки зосереджені на паливній ефективності в міських циклах і є занадто загальними, щоб бути безпосередньо застосованими до специфіки місій НРК. Інша група досліджень [6, 7] аналізує гібридні приводи в іншому прикладному контексті – для спеціалізованої сільськогосподарської техніки. Хоча ці роботи [6] і пов'язують вибір архітектури з типом навантаження (напр., тягові роботи), ці висновки неможливо прямо екстраполювати на військові місії НРК, які мають кардинально інші вимоги до динаміки, акустичної помітності та живучості. Нарешті, дослідження, що безпосередньо стосуються НРК [8, 9], виявляються надзвичайно вузькоспрямованими. Вони, як правило, або (а) обмежуються аналізом лише однієї архітектури, найчастіше ПСГА у порівнянні з електричною [8], ігноруючи інші архітектури ГСУ; або (б) фокусуються на одній глибокій інженерній проблемі в одній складній архітектурі [9], не розглядаючи інші базові конфігурації.

Таким чином, у науковій літературі бракує аналізу, який би зібрав ці фрагментовані знання, описав та проаналізував всі три базові архітектури (послідовну, паралельну та комбіновану) саме в єдиному контексті специфічних вимог до самохідних платформ НРК для застосування в різних місіях.

Послідовна архітектура гібридної силової установки. ПСГА (рис. 1) характеризується відсутністю прямого механічного зв'язку між двигуном внутрішнього згорання (ДВЗ) і ведучими колесами (рушіями) самохідної платформи, реалізуючи концепцію електричної трансмісії [2]. До складу такої системи входять ДВЗ, що виконує функцію первинного джерела

енергії для генератора, тяговий електродвигун (ТЕД) як єдине джерело крутного моменту, та акумуляторна батарея (АКБ), що слугує буфером енергії. У цій архітектурі механічна енергія ДВЗ перетворюється генератором в електричну, яка спрямовується за двома основними потоками: або безпосередньо на живлення ТЕД, або на заряджання АКБ [3]. АКБ, у свою чергу, накопичує надлишок енергії, акумулює рекуперовану під час гальмування кінетичну енергію та віддає її для живлення корисного навантаження, під час пікових навантажень (прискорення) або для руху в режимі "тихого ходу" [2, 10].

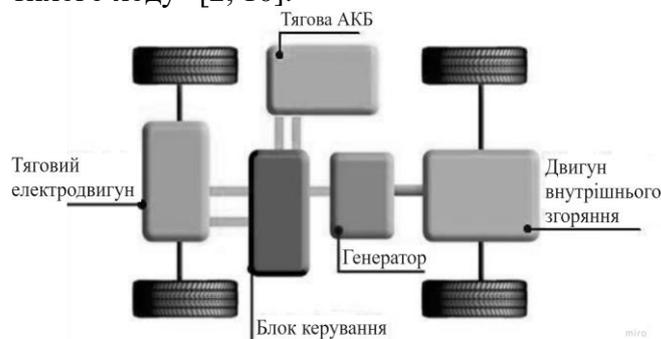


Рис. 1 – Послідовна архітектура гібридної силової установки [4].

Приклади використання ПСГА в самохідних платформах сучасних НРК.

ПСГА сьогодні використовується досить широко у гібридних самохідних платформах НРК, зокрема як у військових, так і у цивільних моделях. У сімействі військових гусеничних платформ Milrem THeMIS (рис. 2) ДВЗ працює виключно для приводу генератора, що забезпечує живлення ТЕД та підзарядку АКБ [11].



Рис. 2 – Військова гусенична платформа Milrem THeMIS 4.5 із бойовим модулем від компанії ST Engineering [11].

У цивільному секторі прикладом використання ПСГА в НРК є автономна платформа Prospr від новозеландської компанії Robotics Plus (рис. 3), призначена для сільського господарства. Вона оснащена повністю електричним приводом з бортовим дизель-генератором [12].



Рис. 3 – Автономна платформа Prospr від новозеландської компанії Robotics Plus [12].

Перелічені платформи перебувають у серійному виробництві і демонструють зрілість технології ПСГА у реальних умовах експлуатації.

Преваги та обмеження використання ПСГА в самохідних платформах НРК.

Оскільки ДВЗ та ведучі колеса (рушії) в самохідних платформах НРК із використанням ПСГА не з'єднані механічно, оберти ДВЗ можливо утримувати у вузькому діапазоні, що відповідає зоні його максимального ККД [2]. Це дозволяє не тільки підвищити паливну ефективність та збільшити запас ходу НРК, але й використовувати менш потужний та більш компактний ДВЗ, розрахований на середнє, а не на пікове навантаження [2]. Відсутність прямого механічного зв'язку також надає значну гнучкість у компонованні силової установки самохідної платформи, що спрощує інтеграцію агрегатів [2]. Менша конструктивна складність самохідних платформ з використанням ПСГА у порівнянні з ПРГА та КГА зменшує вартість експлуатації, вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу та умов обслуговування, що є значною перевагою для військових сфер застосування.

Оскільки єдиним джерелом крутного моменту ПСГА є ТЕД, це спрощує керування крутним моментом [2], що надає можливості для більш точного позиціонування НРК для місій розвідки, вогневої підтримки, розмінування, або агротехнічних операцій з низьким тяговим навантаженням [6]. Крім того, електричний привід забезпечує максимальну тягу з нульової швидкості, покращуючи можливості прохідності на складній місцевості, та усуває необхідність у складній багатоступеневій трансмісії, дозволяючи обійтися простим одношвидкісним редуктором [2]. Важливою експлуатаційною перевагою самохідних платформ НРК з використанням ПСГА є можливість поповнення заряду АКБ від ДВЗ-генератора безпосередньо в польових умовах, що зменшує залежність від стаціонарної зарядної інфраструктури [6].

Критичною перевагою самохідних платформ з використанням ПСГА для військових НРК є можливість прихованого пересування на електричній тязі в зонах малопомітності та можливість малопомітного чергування з тривалим живленням корисного навантаження, забезпечуючи мінімізацію багатоспектральних сигнатур та ускладнюючи виявлення НРК противником [8].

Основним недоліком використання ПСГА в самохідних платформах НРК у порівнянні з ПРГА та КГА є низька енергоефективність [2], зумовлена втратами подвійного перетворення енергії: механічна енергія ДВЗ спочатку трансформується генератором в електричну, а потім ТЕД знову у механічну. Цей недолік значно обмежує ефективність застосування самохідних платформ НРК з використанням ПСГА для виконання місій з підвищеними вимогами до паливної ефективності під час тривалих маршових переходів та високим тяговим навантаженням (логістична підтримка, евакуація, агротехнічні операції з високим тяговим навантаженням тощо). Крім того, ТЕД має бути розрахований на повне забезпечення руху самохідної платформи як єдине джерело крутного моменту, що зумовлює його більшу номінальну потужність [2] та відповідно вартість та масогабаритні показники.

Паралельна архітектура гібридної силової установки.

ПРГА (рис. 4) передбачає механічне підключення як ДВЗ, так і ТЕД до спільного механічного приводу ведучих коліс (рушіїв) самохідної платформи, що передає крутний момент на ведучі колеса (рушії) самохідної платформи НРК [2]. Для керування потоками потужності та перемикання між режимами роботи використовуються муфти (зчеплення) [3, 4]. У такій архітектурі крутний момент може надходити від одного з джерел або від обох одночасно, забезпечуючи сумарну потужність, що перевищує потужність ДВЗ або ТЕД [2]. Як правило, самохідні платформи з ПРГА оснащуються реверсивною електричною машиною, яка виконує функції ТЕД та генератора під час гальмування, повертаючи кінетичну енергію в АКБ [2]. ПРГА дозволяє реалізувати низку сценаріїв передавання крутного моменту, зокрема: рух лише від ДВЗ, рух лише від ТЕД, режим сумарної потужності (ДВЗ та ТЕД передають крутний момент одночасно), режим рекуперації кінетичної енергії під час гальмування та режим, коли

ДВЗ одночасно забезпечує рух самохідної платформи та приводить генератор, заряджаючи АКБ [3].

Залежно від конструкції та ступеня інтеграції компонентів, ПРГА класифікують за кількома ознаками. За рівнем гібридизації розрізняють мікро- (Micro-HEV), м'які (Mild HEV) та повні гібриди (Full HEV) [2]. За конструктивною ознакою виділяють класичну паралельну архітектуру, де швидкість обертання ДВЗ залежить від швидкості руху платформи; архітектуру "Through-The-Road" (TTR), в якій ДВЗ і ТЕД не мають спільного механічного тракту, а приводять у рух різні осі [2].

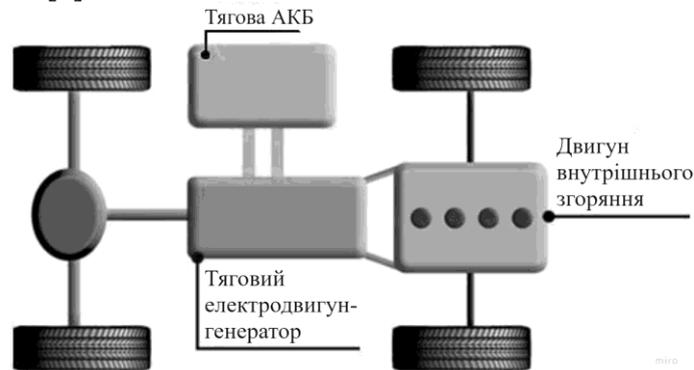


Рис. 4 – Паралельна архітектура гібридної силової установки [4].

Приклади використання ПРГА в самохідних платформах сучасних НРК.

ПРГА значно рідше застосовується в самохідних платформах сучасних НРК у порівнянні з ПСГА. Прикладом військової платформи з використанням ПРГА є IDV "Viking" 6×6 (рис. 5), спільна розробка Horiba-MIRA та Iveco (Велика Британія).



Рис. 5 – Військова колісна платформа IDV Robotics Viking 6×6 для виконання завдань ISTAR, евакуації поранених, логістичного забезпечення та розвідки CBRNE [13].

Платформа IDV "Viking" 6×6 оснащена дизель-електричною силовою установкою паралельної архітектури (рис. 6): дизель Kohler у поєднанні з ТЕД YASA забезпечують сумарну потужність ≈ 140 кВт, що дозволяє 2-тонній машині розвивати швидкість до 45 км/год і долати підйоми до 60 % [13]. Запас ходу становить близько 250 км у змішаному режимі, з можливістю руху до 20 км виключно на електричній тязі [13].



Рис. 6 – Паралельна гібридна силова установка на базі дизеля Kohler та мотор-генератора YASA, з'єднані із роздавальною коробкою НРК з колісною формулою 6×6 виробництва Compact Orbital Gears [13].

У цивільному секторі, зокрема у сегменті спеціалізованих агротехнічних НРК, релевантним прикладом використання ПРГА є роботизована платформа на базі шасі Carraro Ibrido P2 (рис. 7). Ця платформа розроблена для роботи в умовах обмеженого простору, таких як сади та виноградники, і демонструє адаптацію класичної паралельної архітектури до вимог автономних систем. Конструктивно силова установка даної платформи базується на 3-циліндровому дизельному двигуні Carraro 3E22 робочим об'ємом 2,2 л та потужністю 55 кВт, а також інтегрованому між ДВЗ і трансмісією електродвигуні з аксіальним магнітним потоком. Особливістю реалізації є використання безпечної низьковольтної архітектури (48 В), де компактний електромотор забезпечує пікову потужність 20 кВт та додатковий крутний момент 53 Нм [14].

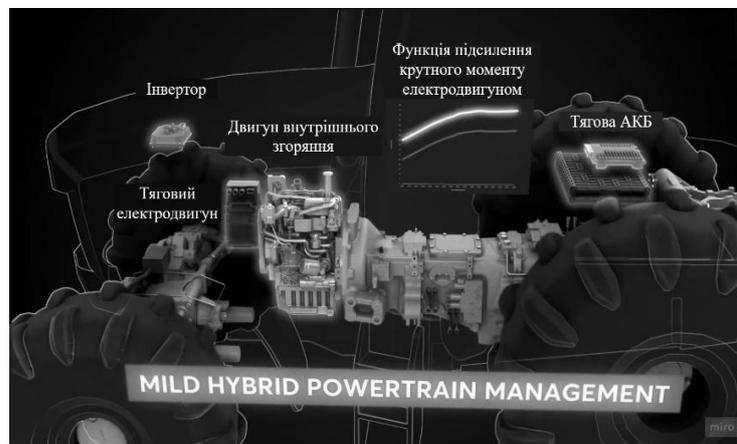


Рис. 7 – Компонувальна схема паралельної гібридної силової установки аграрної платформи Carraro Ibrido P2 [14].

Така архітектура дозволяє застосувати технічне рішення зі зменшення робочого об'єму двигуна, забезпечуючи сумарну потужність установки на рівні 75 кВт, що відповідає характеристикам машин вищого тягового класу при суттєвому зменшенні маси ДВЗ. Функціональні особливості ПРГА у даному зразку дозволяють вирішити специфічні для аграрних НРК завдання, зокрема забезпечення можливості руху на електричній тязі в беземісійному режимі для роботи в закритих приміщеннях, а також реалізацію функції адаптивного підсилення крутного моменту. Використання додаткового моменту ТЕД для компенсації перевантажень ДВЗ під час транспортних робіт або активної фази обробки ґрунту дозволяє згладжувати пікові навантаження, запобігаючи падінню обертів двигуна та підвищуючи загальну паливну ефективність системи [14].

Переваги та обмеження використання ПРГА в самохідних платформах сучасних НРК.

До основних переваг використання ПРГА в самохідних платформах НРК у порівнянні з ПСГА належить вища енергоефективність в ustalених режимах руху [2]. Оскільки ДВЗ має прямий механічний зв'язок з ведучими колесами (рушіями), ПРГА уникає втрат на подвійне перетворення енергії, характерних для ПСГА, що забезпечує вищий загальний ККД системи, особливо під час тривалих маршових переходів [2]. Реверсивна електрична машина дозволяє ефективно повертати кінетичну енергію під час гальмування, заряджаючи АКБ, і таким чином забезпечувати електроживлення корисного навантаження самохідної платформи НРК [2]. Можливість поєднання потужності ДВЗ та ТЕД через спільний механічний тракт передавання крутного моменту на ведучі колеса (рушії) підвищує тягові характеристики та покращує розгінну динаміку [3]. Для місій НРК, де критичними є високі тягові характеристики, та паливна ефективність на марші (операції логістичної підтримки, евакуація, агротехнічні операції з високим тяговим навантаженням), самохідні платформи НРК з використанням ПРГА демонструють відчутні переваги порівняно з ПСГА [2].

Оскільки ТЕД в ПРГА використовується для підтримки ДВЗ під час старту, прискорень та подолання складних ділянок рельєфу [3], він може мати меншу номінальну потужність, що знижує вимоги до ваги та вартості одного з найдорожчих компонентів силової установки [2]. Розподіл навантаження між ДВЗ та ТЕД зменшує пікові струми АКБ та теплове навантаження на ДВЗ, що позитивно впливає на довговічність та збільшує міжремонтні інтервали обох агрегатів. Самохідні платформи НРК з використанням Full NEV ПРГА допускають короткочасний рух на електричній тязі з мінімізацією багатоспектральних сигнатур для забезпечення малопомітності, однак значно поступаються за тривалістю та потужністю такого режиму самохідним платформам НРК із використанням ПСГА [2, 8].

До ключових недоліків ПРГА відносять неможливість постійно утримувати ДВЗ в зоні максимального ККД, оскільки його оберти прив'язані до швидкості руху самохідної платформи НРК. Це знижує паливну ефективність у змінних режимах руху [2, 4]. Крім того, ПРГА має більшу механічну складність трансмісії та значно складніші алгоритми керування потоками енергії (EMS) у порівнянні з ПСГА [2]. Головним викликом для EMS ПРГА є забезпечення плавного змішування крутних моментів від ДВЗ та ТЕД, особливо під час перемикання режимів, щоб уникнути ривків та вібрацій [9]. Як наслідок, це висуває жорсткіші вимоги до систем діагностики та кваліфікації обслуговуючого персоналу, збільшуючи вартість експлуатації.

Комбінована (послідовно-паралельна) архітектура гібридної силової установки.

КГА, також відома як послідовно-паралельна архітектура (рис. 8) або Power-Split, базується на використанні планетарного редуктора (Planetary Gear Set, PGS) для гнучкого розподілу потужності і поєднання переваг ПСГА та ПРГА [2, 5]. У типовій конфігурації КГА ДВЗ, генератор (MG1) та ТЕД (MG2) підключаються до різних елементів PGS (наприклад, до водила, сонячної та коронної шестерень відповідно), що дозволяє гнучко розподіляти потужність. Така конфігурація реалізує функцію e-CVT, яка забезпечує керування обертами ДВЗ незалежно від швидкості руху платформи для утримання його в зоні максимального ККД [7]. PGS розподіляє потужність ДВЗ на два потоки: механічний, що передається безпосередньо на ведучі колеса (рушії), та електричний, що проходить через генератор та ТЕД, реалізуючи таким чином одночасно паралельний та послідовний режими роботи [3]. Залежно від конструктивних особливостей розподілу потужності, КГА класифікують на кілька підтипів, зокрема архітектуру з розподілом потужності на вході (Input-Split), архітектуру з підсумовуванням потужності на виході (Output-Split) та комбіновану архітектуру з розподілом потужності (Compound-Split) [5]. Загалом, КГА вважається найскладнішою з усіх гібридних архітектур як з точки зору конструкції, так і алгоритмів керування потоками енергії [2].

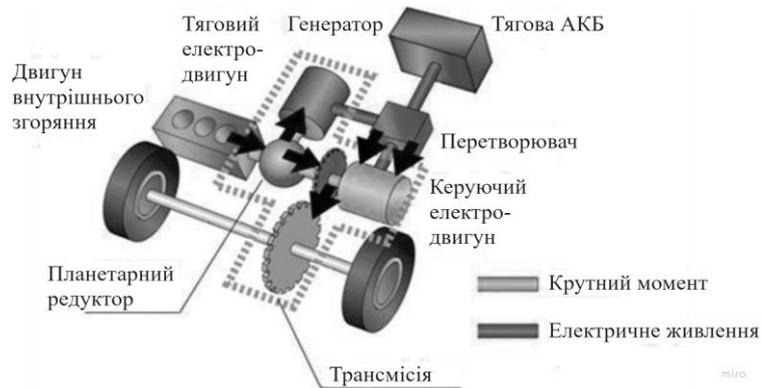


Рис. 8 – Комбінована (послідовно-паралельна) гібридної силової установки [4].

Приклади використання КГА в самохідних платформах сучасних НРК. На відміну від ПСГА, яка домінує в сегменті самохідних платформ НРК, КГА на сьогодні знайшла найширше застосування в автомобільній галузі. Завдяки високій паливній ефективності у змішаних режимах руху, вона стала фактичним стандартом для багатьох повногібридних легкових автомобілів, найвідомішим прикладом чого є силова установка Toyota Hybrid System (THS). У сегменті самохідних платформ НРК, через високу конструктивну складність та вартість, КГА зустрічається переважно на рівні експериментальних прототипів.

У роботі Zhang та ін. [9] представлено експериментальний прототип важкого військового безпілотного наземного комплексу EMT-UGV (Electro-Mechanical Transmission UGV), розроблений у Пекінському технологічному інституті. Його силова установка, побудована за комбінованою архітектурою, включає дизельний двигун потужністю 20 кВт, дві електричні машини (120 кВт та 55 кВт), а також складну електромеханічну трансмісію з трьома планетарними передачами, двома муфтами та гальмівним механізмом. Така конфігурація дозволяє реалізувати чотири основні режими роботи: два режими електронної безступінчастої трансмісії, режим руху на електричній тязі та режим прямого механічного приводу. Як зазначають автори, головною метою такої архітектури є забезпечення безперервного та плавного передавання крутного моменту під час перемикання між різними режимами руху, що є критичним для динаміки важких НРК під час виконання тактичних завдань, зокрема евакуації поранених або транспортування чутливого обладнання. Цей підхід дозволяє гнучко адаптувати роботу силової установки до різних умов експлуатації, підвищуючи паливну ефективність та забезпечуючи необхідні тягові характеристики для виконання широкого кола місій [9].



Рис. 9 – Прототип трактора Steyr Hybrid Drivetrain Konzept із силовою установкою послідовно-паралельної архітектури на базі e-CVT [15].

У роботі Rossi та ін. [7] представлено розробку та моделювання гібридної силової установки для аграрного трактора, реалізовану в прототипі Steyr Konzept (рис. 9). Метою проєкту було продемонструвати технічну можливість інтеграції КГА у компактні

спеціалізовані платформи. В основі системи лежить КГА з розподілом потужності на вході (Input-Split) з e-CVT. Конфігурація включає дизельний двигун, під'єднаний до водила планетарного редуктора, та дві електричні машини: генератор, з'єднаний із сонячною шестернею, і ТЕД, з'єднаний із коронною шестернею, яка передає крутний момент на ведучі колеса.

Така архітектура дозволяє реалізувати чотири основні режими роботи: повністю електричний, гібридний (послідовний та паралельний), режим роботи лише від ДВЗ та рекуперативний. Автори дослідження шляхом моделювання доводять, що запропонована система керування енергією (EMS) дозволяє оптимізувати роботу ДВЗ, утримуючи його в зоні максимального ККД. Моделювання демонструє потенціал зниження витрати пального до 40 % у специфічних циклах [7], тоді як виробник заявляє про досягнення середньої економії на рівні 8 % у реальних умовах експлуатації [15]. Виробник, компанія Steyr Traktoren, підтверджує впровадження цієї концепції, наголошуючи на її перевагах у гнучкості застосування та зменшенні шкідливих викидів [15]. Компонівку ГСУ прототипа Steyr Hybrid Drivetrain Konzept подано на рис. 10.



Рис. 10 – Компонівка силової установки прототипа Steyr Hybrid Drivetrain Konzept із послідовно-паралельною архітектурою e-CVT [15].

Переваги та обмеження КГА в самохідних платформах сучасних НРК.

Ключовою перевагою КГА є досягнення високої паливної ефективності в широкому діапазоні режимів руху. Це стає можливим завдяки використанню PGS, що реалізує функцію e-CVT, яка дозволяє одночасно утримувати ДВЗ в зоні його максимального ККД незалежно від швидкості руху, як у ПСГА, та використовувати прямий механічний зв'язок ДВЗ з ведучими колесами (рушіями) для передачі потужності як у ПРГА [5, 7]. Саме ця універсальність дозволяє розглядати КГА як перспективну основу для розробки багатоцільових самохідних платформ НРК. Такий підхід вирішує проблему вузької спеціалізації сучасних самохідних платформ, які, використовуючи ПСГА або ПРГА, зазвичай є оптимізованими для певних класів місій НРК (наприклад, розвідка для НРК із самохідними платформами з використанням ПСГА, або логістичні операції для НРК із самохідними платформами з використанням ПРГА) і стають компромісним рішенням при виконанні інших завдань.

Водночас, КГА має і суттєві недоліки, що обмежують її використання в самохідних платформах НРК. Вона є найскладнішою з усіх гібридних архітектур як з точки зору конструкції (використання двох електричних машин та планетарних передач), так і алгоритмів керування, що підтверджується найвищим рівнем складності (3 з 3) порівняно з ПСГА та ПРГА [2]. Система керування енергією вимагає найвищого рівня математичної та обчислювальної складності, оскільки для досягнення максимальної ефективності необхідно одночасно оптимізувати швидкість і крутний момент ДВЗ та обох електричних машин. Більше того, повний потенціал КГА реалізується лише за умови ретельної оптимізації конструктивних параметрів, таких як передавальні числа планетарних редукторів, що вимагає застосування

складних алгоритмів моделювання ще на етапі проєктування [5]. Сукупність цих факторів – висока конструктивна та обчислювальна складність – збільшує масу та вартість силової установки, ускладнює технічне обслуговування та потенційно знижує надійність. Це може стати критичним обмеженням для військових НРК, де пріоритетом залишаються простота, надійність та ремонтпридатність у польових умовах.

Висновки. Виконано аналіз конструктивних особливостей, переваг та обмежень трьох базових архітектур гібридних силових установок в контексті їх використання в самохідних платформах НРК. Встановлено, що послідовна архітектура ГСУ, яка на сьогодні домінує в самохідних платформах сучасних НРК, є оптимальною для місій, в яких ключовими системними вимогами є малопомітне пересування, висока прохідність та точне керування тягою у змінних режимах руху, але має суттєві втрати на подвійне перетворення енергії. Показано, що паралельна архітектура ГСУ демонструє переваги у місіях, що вимагають високої енергоефективності під час тривалого руху на усталених швидкостях (маршах) та підвищених тягових характеристиках завдяки підсумовуванню потужності ДВЗ та ТЕД, проте характеризується значною механічною складністю. Визначено, що комбінована архітектура ГСУ є найбільш універсальною, поєднуючи переваги обох систем, але водночас є найскладнішою конструктивно, алгоритмічно та найдорожчою. Систематизовано інженерні компроміси, що доводить залежність вибору архітектури ГСУ від системних вимог до місій НРК. Створено науково-технічне підґрунтя, яке дозволяє конструкторам на ранніх етапах розробки обґрунтовано обирати тип ГСУ відповідно до цільового призначення НРК.

Список літератури:

1. Military Vehicle Electrification Market by Platform (Combat Vehicles, Support Vehicles, Unmanned Armored Vehicles), System, Technology (Hybrid, Fully Electric), Mode of operation, Voltage Type and Region – Global Forecast to 2030. MarketsandMarkets, 2024. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/military-vehicle-electrification-market-55451533.html> (дата звернення: 22.12.2025).
2. Singh K. V., Bansal H. O., Singh D. A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components. *Journal of Modern Transportation*. 2019. Vol. 27, No. 2. P. 77–107. <https://doi.org/10.1007/s40534-019-0184-3>.
3. Parczewski K., Wnęk H. Analysis of Energy Flow in Hybrid and Electric-Drive Vehicles. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 8. Art. 1915. <https://doi.org/10.3390/en17081915>.
4. Kuzhelnyi Ya., Venzheha V., Pasov H., Klymenko V. Analysis of structures and application of different types of engines in cars. *Automobile Transport*. 2023. No. 52. P. 85–97. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.52.0.10>.
5. Dagci O. H., Peng H., Grizzle J. W. Hybrid Electric Powertrain Design Methodology With Planetary Gear Sets for Performance and Fuel Economy. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 9585–9602. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2796939>.
6. Пелипенко Є. С., Череватенко Р. В. Аналіз конструктивних особливостей автономних самохідних платформ з гібридною трансмісією сільськогосподарського призначення. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Автомобіле- та тракторобудування. 2025. № 1. С. 139–148. doi: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2025.1.16>.
7. Rossi C., Pontara D., Falcomer C., Bertoldi M., Mandrioli R. A Hybrid-Electric Driveline for Agricultural Tractors Based on an e-CVT Power-Split Transmission. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 21. Art. 6912. <https://doi.org/10.3390/en14216912>.
8. Polak F. Energy balance comparison of small unmanned vehicle equipped with electric and hybrid propulsion system. *Combustion Engines*. 2020. Vol. 182, No. 3. P. 23–27. <https://doi.org/10.19206/CE-2020-304>.
9. Zhang W., Liu H., Zhang X. [et al.] Torque ripple compensation control for hybrid UGVs in mode transition based on current harmonic control of a PMSM. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2021. Vol. 235, No. 4. P. 920–932. <https://doi.org/10.1177/0954407020978320>.
10. Urooj A., Nasir A. Review of Hybrid Energy Storage Systems for Hybrid Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal*. 2024. Vol. 15, No. 8. Art. 342. <https://doi.org/10.3390/wevj15080342>.
11. THeMIS UGV: Technical Specifications. Milrem Robotics. 2024. URL: <https://milremrobotics.com/themis-family/> (дата звернення: 22.12.2025).
12. Robotics Plus launches Prosp: multi-use autonomous vehicle for sustainable orchard and vineyard production. Robotics Plus. 2023. URL: <https://www.roboticsplus.co.nz/news/robotics-plus-launches-prospr-multi-use-autonomous-vehicle-for-sustainable-orchard-and-vineyard-production/> (дата звернення: 22.12.2025).
13. IDV Robotics Viking UGV. Uncrewed Systems Technology. 2024. URL: <https://www.uncrewed-systems.com/idv-robotics-viking-ugv/> (дата звернення: 22.12.2025).

14. Mild Hybrid Powertrain. Carraro. 2020. URL: <https://www.carraro.com/en/solutions-and-services/e-carraro/carraro-electrified-vision> (дата звернення: 22.12.2025).
15. Hybrid Drivetrain Konzept. Steyr Traktoren. 2021. URL: <https://www.steyr-traktoren.com/en/agriculture/our-innovations/hybrid-drivetrain-konzept> (дата звернення: 22.12.2025).

References (transliterated):

1. Military Vehicle Electrification Market by Platform (Combat Vehicles, Support Vehicles, Unmanned Armored Vehicles), System, Technology (Hybrid, Fully Electric), Mode of operation, Voltage Type and Region – Global Forecast to 2030. MarketsandMarkets, 2024. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/military-vehicle-electrification-market-55451533.html> (accessed: 22.12.2025).
2. Singh K. V., Bansal H. O., Singh D. A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components. Journal of Modern Transportation. 2019. Vol. 27, No. 2. P. 77–107. doi: <https://doi.org/10.1007/s40534-019-0184-3>.
3. Parczewski K., Wnęk H. Analysis of Energy Flow in Hybrid and Electric-Drive Vehicles. Energies. 2024. Vol. 17, No. 8. Art. 1915. doi: <https://doi.org/10.3390/en17081915>.
4. Kuzhelnyi Ya., Venzheha V., Pasov H., Klymenko V. Analysis of structures and application of different types of engines in cars. Automobile Transport. 2023. No. 52. P. 85–97. doi: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2023.52.0.10>.
5. Dagci O. H., Peng H., Grizzle J. W. Hybrid Electric Powertrain Design Methodology With Planetary Gear Sets for Performance and Fuel Economy. IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 9585–9602. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2796939>.
6. Pelypenko Ye. S., Cherevatenko R. V. Analiz konstruktyvnykh osoblyvostei avtonomnykh samokhidnykh platform z hibrydnoiu transmissiieiu silskohospodarskoho pryznachennia [Analysis of design features of autonomous self-propelled platforms with hybrid transmission for agricultural purposes]. Visnyk NTU "KhPI". Serii: Avtomobileta traktorobuduvannia [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Construction]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2025, No. 1 P. 139–148. doi: <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2025.1.16>.
7. Rossi C., Pontara D., Falcomer C., Bertoldi M., Mandrioli R. A Hybrid-Electric Driveline for Agricultural Tractors Based on an e-CVT Power-Split Transmission. Energies. 2021. Vol. 14, No. 21. Art. 6912. doi: <https://doi.org/10.3390/en14216912>.
8. Polak F. Energy balance comparison of small unmanned vehicle equipped with electric and hybrid propulsion system. Combustion Engines. 2020. Vol. 182, No. 3. P. 23–27. doi: <https://doi.org/10.19206/CE-2020-304>.
9. Zhang W., Liu H., Zhang X. [et al.] Torque ripple compensation control for hybrid UGVs in mode transition based on current harmonic control of a PMSM. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2021. Vol. 235, No. 4. P. 920–932. doi: <https://doi.org/10.1177/0954407020978320>.
10. Urooj A., Nasir A. Review of Hybrid Energy Storage Systems for Hybrid Electric Vehicles. World Electric Vehicle Journal. 2024. Vol. 15, No. 8. Art. 342. doi: <https://doi.org/10.3390/wevj15080342>.
11. THEMIS UGV: Technical Specifications. Milrem Robotics. 2024. URL: <https://milremrobotics.com/themis-family/> (accessed: 22.12.2025).
12. Robotics Plus launches ProSpr: multi-use autonomous vehicle for sustainable orchard and vineyard production. Robotics Plus. 2023. URL: <https://www.roboticsplus.co.nz/news/robotics-plus-launches-prospr-multi-use-autonomous-vehicle-for-sustainable-orchard-and-vineyard-production/> (accessed: 22.12.2025).
13. IDV Robotics Viking UGV. Uncrewed Systems Technology. 2024. URL: <https://www.uncrewed-systems.com/idv-robotics-viking-ugv/> (accessed: 22.12.2025).
14. Mild Hybrid Powertrain. Carraro. 2020. URL: <https://www.carraro.com/en/solutions-and-services/e-carraro/carraro-electrified-vision> (accessed: 22.12.2025).
15. Hybrid Drivetrain Konzept. Steyr Traktoren. 2021. URL: <https://www.steyr-traktoren.com/en/agriculture/our-innovations/hybrid-drivetrain-konzept> (accessed: 22.12.2025).

Надійшла (received) 20.11.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Ходисько Антон Андрійович (Khodysko Anton) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2311-8945>; e-mail: a.khodysko@outlook.com.