

***А. П. КОЖУШКО, М. О. МІТЦЕЛЬ, В. О. КАРПОВ, С. М. КОНОНЕНКО,
С. Є. МАЛИШЕВ***

АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВА РОЗВИТКУ КОНСТРУКЦІЙ ТРАНСМІСІЙНИХ УСТАНОВОК ЛАНЦЮГОВИХ ЗЕМЛЕРИЙНИХ ЗАСОБІВ ІНЖЕНЕРНО- БУДІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

У статті проведено комплексний аналіз конструкцій трансмісійних установок ланцюгових землерийних машин, що застосовуються в будівництві, комунальному господарстві та оборонній сфері. Розглянуто основні тенденції розвитку механічних, гідравлічних та комбінованих трансмісій у контексті підвищення енергоефективності, надійності та керованості техніки. Акцентовано увагу на специфіці дії безперервного робочого процесу ланцюгових органів, що зумовлює особливі вимоги до трансмісійних систем. Наведено результати порівняльного аналізу сучасних технічних рішень, включаючи досвід провідних світових виробників. Окрему увагу приділено перспективам впровадження гідрооб'ємно-механічних передач, електрогідравлічних систем керування та гібридних силових установок. Обґрунтовано напрями подальших досліджень, спрямовані на підвищення ефективності та ресурсу трансмісійних установок ланцюгових землерийних машин.

Ключові слова: землерийні машини, конструкція, гідрооб'ємно-механічна трансмісія, електромеханічна трансмісія, гібридна технологія, експлуатація, аналіз, орні роботи.

A. KOZHUSHKO, M. MITTSEL, V. KARPOV, S. KONONENKO, S. MALYSHEV

ANALYSIS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF TRANSMISSION STRUCTURES FOR CHAIN EARTHMOVING MACHINERY OF ENGINEERING AND CONSTRUCTION EQUIPMENT

The article presents a comprehensive analysis of the current state and development trends of transmission systems used in chain-type trenching machines, which are widely employed in construction, utilities, energy, and defense sectors. The study highlights the operational specifics of continuous-action chain working bodies, which impose unique requirements on transmissions – particularly in terms of traction force stability, smooth operation, energy efficiency, and reliability under challenging working conditions. The advantages and disadvantages of mechanical, hydraulic, and combined transmission systems used in modern machines by leading global manufacturers are assessed. Special attention is given to the prospects of applying hydrostatic-mechanical transmissions (HMTs) and electrohydraulic control systems, which enable flexible speed and load regulation. A promising direction is identified in the implementation of continuously variable transmissions (CVTs) as an effective solution for improving energy performance, reducing dynamic loads, and expanding the range of operating modes. The integration of CVTs with hybrid power units is also considered, opening new opportunities for enhancing adaptability and environmental performance. The article substantiates the need for further research focused on optimizing transmission architectures, increasing the durability of drive components, and developing intelligent control systems for chain working body drives.

Key words: earthmoving machines, design, transmission, hydrovolumetric-mechanical transmission, electromechanical transmission, hybrid technology, operation, analysis, plowing operations.

Вступ.

Основним спонукальним чинником до аналізу та оцінки перспектив розвитку конструкцій землерийних машин є важка ситуація із засобами інженерного захисту інфраструктурних об'єктів, що вимагає нагальної потреби з підвищення техніко-експлуатаційних характеристик спеціалізованої інженерно-будівельної техніки. Вирішення окресленої проблеми зіштовхується з вичерпними можливостями класичних конструкційних і технологічних рішень при побудові трансмісійних установок для інженерно-будівельної техніки. Тому без надання фундаментального теоретичного підґрунтя неможливо досягнути прогресивних ефектів в питанні підвищення техніко-експлуатаційних характеристик засобів інженерно-будівельної техніки.

Упродовж останнього десятиліття у світі великого розповсюдження набула тенденція впровадження альтернативних механічним трансмісійних установок, які виконанні з використанням гідрооб'ємного та/або електричного приводу у складі спеціалізованої техніки, що базується на шасі автомобіля, сільськогосподарського трактора або самохідного шасі. Це, передусім, покликано вирішити проблеми погіршення навколишнього середовища забруднюючими викидами та зменшенням запасів викопного палива. Гібридизація досягла високої позначки в автомобільній промисловості, що стало поштовхом для поширення її і на інші суміжні галузі. Виробники обладнання по всьому світу експериментують із різноманітними технологіями гідравлічного та електричного приводу для вдосконалення їх у сучасній техніці. Тому врахування цих трендів потребує розвитку теоретичних засад.

Аналіз ланцюгових землерийних машин.

Землерийні засоби інженерно-будівельної техніки є спеціалізованими інженерними транспортними засобами, які використовуються в цивільному та військовому секторах для виконання широкого спектра задач: інженерна розвідка, підготовка позицій, риття траншей, розчищення завалів, встановлення перепон, будівництво оборонних споруд, тощо. Вони повинні забезпечувати поєднання високої прохідності, автономності, захисту та здатності працювати в екстремальних умовах (бойові дії, мінні поля, складний рельєф). За типом робочого органу землерийні машини класифікуються наступним чином: ковшові (копання котлованів, навантажувальні роботи); ланцюгові (риття траншей, встановлення перепон); роторні (високопродуктивне розроблення, переміщення або навантаження великих обсягів ґрунтів та порід); фрезерні (зрізання, розпушування, подрібнення та обробіток ґрунтів і твердих поверхонь); грейферні (копання, піднімання та переміщення сипких, пластичних або водонасичених ґрунтів і навантаження і розвантаження матеріалів).

Створення нових або модернізації старих землерийних машин здійснюється за рахунок впровадження вже апробованих технічних рішень, які аналізуються на предмет поліпшення експлуатаційних та технологічних показників машини. Так, в роботі [3] вказується, що тільки розуміння фізичних основ та закономірностей технологічних процесів дозволить модернізувати та створювати нові ефективні конструкційні рішення. Такий стан речей дозволить забезпечити науково-обґрунтований вибір в ході модернізації машин типу та параметрів робочих органів, їх приводів, трансмісій приводів та силових установок машин [3]. Так, в роботі [4] стверджується про доцільність модернізації землерийної машини, яка ґрунтується на переобладнанні приводу з механічного на об'ємний гідравлічний (ОГП). Проте обґрунтування впровадження того чи іншого технічного рішення не може виключно базуватись на підвищенні показника енергоємності виконаної технологічної роботи. Тому доцільно проаналізувати загальні експлуатаційні показники роботи такого засобу з врахуванням показників роботи силової установки (двигуна внутрішнього згоряння та трансмісії).

В [5] виконано дослідження з використання багатоцільової оптимізації при проектуванні підводної ланцюгової траншейної машини при впровадженні генетичного алгоритму в аналітичну модель. Задача оптимізації визначалась як мінімізація добутку потужності та ваги ланцюга з урахуванням одновісної міцності на стиск, коефіцієнта зчеплення, довжини прутка, радіуса ланцюга та співвідношення глибини сколювання до відстані, діапазони яких визначаються на основі специфікацій комерційних траншеєкопачів, що задовольняють встановлені вимоги до продуктивності та попередніх параметричних досліджень авторів.

В [6] виконано вибір параметрів ланцюгового навантажувача для продуктивності землерийної машини, що підкріплюється результатами експериментальних розрахунків. Результати експерименту та числовий аналіз визначили, що оптимальним набором параметрів була відстань між 2 ріжучими кромками на ланцюгу, активна швидкість обертання зірочки для найвищої продуктивності. Порівняно з результатами теорії з використанням проектування, відхилення оптимальних параметрів становить менше 5%.

В [7] розроблено ланцюговий пристрій для копання та засипання траншей із зустрічним обертанням для зменшення високого опору обробітку ґрунту в садах. 3D-математичну модель копального відвалу було створено за допомогою декартового перетворення координат.

Робота [8] представляє результати комплексних теоретичних та експериментальних досліджень щодо створення універсальної землерийної техніки безперервної дії, що працює в нестандартних умовах навантаження, а саме циклічного бічного навантаження на виконавчий механізм під час копання. Розроблено та запропоновано для практичного використання залежності для визначення зовнішніх сил, що діють на виконавчий механізм під час копання ґрунту, та визначення курсової стійкості техніки, враховуючи їх просторову природу.

Великої актуальності та доцільності зараз набувають ланцюгові землерийні машини (або траншейні екскаватори), основним призначенням яких є виконання вузьких і глибоких траншей з високою точністю, особливо в обмежених (складних) умовах або при прокладанні довгих лінійних комунікацій. Виконання різнопланових робіт ланцюгових землерийних машин призвели до створення значної кількості таких моделей.

Виконаємо аналіз існуючих ланцюгових землерийних машин (рис. 1):

- Ditch Witch HT275 (США) [9, 10]. Це найпотужніша траншейна машина компанії Charles Machine Works, що розроблена для виконання важких земляних робіт у сфері прокладання інженерних комунікацій. Вона поєднує високу продуктивність, гнучкість у використанні та зручність обслуговування, що робить її ефективним інструментом для підрядників, які працюють у складних умовах. HT275 має міцну конструкцію рами з високою жорсткістю, що дозволяє витримувати значні навантаження під час копання у важких ґрунтах. Машина обладнана гідрооб'ємною трансмісією (ГОТ), яка забезпечує плавну зміну швидкості та адаптацію до типу ґрунту без перемикання передач. Підвіска з незалежним ходом гусениць, що дозволяє кожній гусениці рухатись незалежно від іншої, що покращує стабільність і прохідність на нерівному рельєфі. Система швидкої заміни навісного обладнання, яка базується на чотирьох гідравлічних швидкокороз'ємних з'єднаннях, яка дозволяє змінювати навісне обладнання без крана чи домкрата, що суттєво скорочує час переналаштування.

- Trencor T16 (США) [11]. Це потужна гусенична траншейна машина, призначена для важких земляних робіт, зокрема прокладання трубопроводів у складних ґрунтових умовах. Завдяки високій потужності та надійності, вона ефективно працює на об'єктах з твердими породами та змінними кліматичними умовами. Trencor T16 оснащена механічним приводом копального ланцюга, який забезпечує значно менший знос зубців порівняно з гідравлічними системами, що підвищує надійність та знижує експлуатаційні витрати. Машина обладнана дизельним двигуном CAT C27 ACERT потужністю 950 к.с. (708 кВт) при 2100 об/хв, що забезпечує високий крутний момент 4341 Н·м при 1400 об/хв. Гусеничне шасі має незалежне електрогідравлічне керування, що забезпечує маневреність та стабільність машини на різних типах ґрунтів. Ширина гусениць становить 914 мм, що сприяє рівномірному розподілу ваги та зменшенню тиску на ґрунт.

- Tesmec TRS-1075 (Італія) [12]. Це високопродуктивна гусенична траншейна машина, що виробляється компанією Tesmec S.p.A., яка базується в Італії, та призначена для прокладання трубопроводів та комунікацій у складних ґрунтових умовах, включаючи скельні породи. Модель оснащена сучасними системами управління та моніторингу, що забезпечують ефективну та безпечну роботу. Має двигун CAT C9.3B ACERT Tier 4/Stage V UE потужністю 375 к.с. (280 кВт). Машина оснащена потужним механічним приводом, що передає крутний момент безпосередньо на копальний ланцюг (ланцюгову пилу). Це забезпечує високу надійність, тривалий ресурс зубців та зменшення втрат енергії в порівнянні з гідравлічним приводом. Копальний ланцюг та напрямний кожух мають модульну структуру, що дозволяє легко змінювати глибину та ширину траншеї шляхом заміни окремих секцій. Дві незалежні бортові гідрооб'ємні передачі забезпечують високу маневреність, навіть на нерівній або м'якій місцевості. Система дозволяє здійснювати повороти на місці. Завдяки використанню широких

гусениць машина чинить відносно низький тиск на поверхню ($0,69 - 0,81 \text{ кг/см}^2$), що важливо при роботі на нестійких ґрунтах.

- Vermeer T1255III (США) [13, 14]. Це потужна траншейна машина, призначена для важких робіт, таких як прокладання трубопроводів, поверхнєве видобування корисних копалин та підготовка будівельних майданчиків. Вона доступна у двох основних конфігураціях: з прямим (direct drive) та ланцюговим (chain drive) приводом. Машина оснащена дизельним двигуном CAT C18 ACERT потужністю до 600 к.с. (447 кВт), що забезпечує високу тягу та здатність працювати в надзвичайно важких умовах — від кам'янистого ґрунту до кар'єрів із щільною породою. Дві конфігурації приводу робочого органу: Direct Drive (прямий привід забезпечує максимальну ефективність і пряме передавання крутного моменту на фрезу або копальний барабан) та Chain Drive (ланцюговий привід дозволяє досягати вертикальних стінок копання (до 90°), що корисно у вузьких або глибоких траншеях). Машина має гідравлічні контури для приводу навісного обладнання, транспортерів та керування функціями шасі. Це дозволяє ефективно передавати енергію навіть у складних режимах роботи.

- Astec RT1160 (США) [15, 16]. Траншейна машина Astec RT1160 — є однією з найбільших і найпотужніших моделей лінійки RT компанії Astec Underground. Це високопродуктивна колісна траншейна машина важкого класу, призначена для виконання складних інженерних робіт, зокрема копання траншей великої глибини та ширини в щільних і кам'янистих ґрунтах. Машина підходить для будівництва комунікаційних мереж, водопроводів, магістральних кабельних ліній та інших інфраструктурних об'єктів. Astec RT1160 має колісну базу великої вантажності та шарнірно-зчленовану раму, що забезпечує хорошу маневреність навіть для машини великого розміру. Повний привід та великі колеса з глибоким протектором дають змогу працювати в складних умовах бездоріжжя або на вологих ґрунтах. Машина обладнана потужним дизельним двигуном Cummins потужністю близько 250 к.с. Машина може оснащуватись: ланцюговою траншейною установкою для м'яких і середньої твердості ґрунтів; дисковим ротором для скельних порід. Максимальна глибина копання складає до 2,6 м, ширина — до 40–50 см.

- ПЗМ-2 (Україна) [17, 18]. Це спеціалізована військова ланцюгова траншейна машина, призначена для копання окопів і траншей у польових умовах, а також для виконання інженерно-будівельних завдань у зоні бойових дій. Основне призначення — забезпечення швидкої інженерної підготовки місцевості для оборонних і тактичних завдань. Ланцюгова траншейна установка складається з ковшів, які рухаються по контуру копального механізму. Вона забезпечує копання траншей глибиною до 1,2 м і шириною до 0,6 – 0,9 м. Глибина регулюється механічно або гідравлічно залежно від типу ґрунту. Машина обладнана дизельним двигуном потужністю 240 к.с., який забезпечує пересування й роботу копального агрегату. Привод робочого органу — гідравлічний, що дозволяє змінювати швидкість риття та напрямок обертання. У більшості конфігурацій ґрунт відкидається по обидва боки траншеї, що дозволяє швидко формувати бруствер.

Розвиток і велика необхідність (за рахунок високої мобільності) у ланцюгових землерийних машинах типу ПЗМ-2 стала наступна модернізація ПЗМ-3-01 на базі автомобіля КрАЗ-5233НЕ. Так в [3] наведено принципову структурну схему землерийної машини ПЗМ-3-01, що оснащена механічним приводом робочого устаткування. Але, як показали дослідження [4, 19] використання механічних приводів ланцюга і металельника є недоцільним. Більш прогресивним є модернізація, що пов'язана з переходом на ОГП. Саме такий підхід забезпечить високий рівень захисту від перевантажень, безступінчасте регулювання швидкості робочого органу і автоматизацію технологічного процесу при копанні.

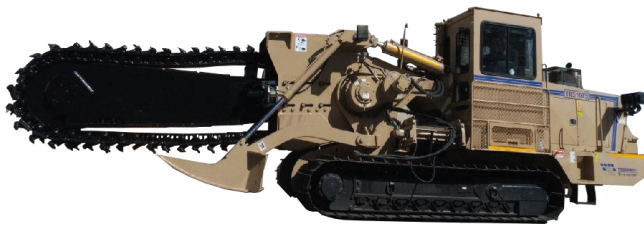
В табл. 1 представимо основні технічні характеристики ланцюгових землерийних машин. Як видно з аналізу, практично всі види ланцюгових землерийних машин мають безступінчасту трансмісію. Тому в подальшому необхідно окреслити перспективність цього напрямку.



а



б



в



г



д



є

Рис. 1 – Ланцюгові землерийні машини:

а – HT275; б – Trenchor T16; в – Tesmec TRS-1075; г – Vermeer T1255III; д – RT1160; є – ПЗМ-2

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики ланцюгових землерийних машин

Машина	Двигун	Тип трансмісії	Тип приводу ланцюга	Шасі	Глибина копання, м	Ширина траншеї, см
HT275	Cummins (275 к.с.)	ГОТ	ОГП	гусеничний	до 3	до 66
Trenchor T16	CAT C27 ACERT (950 к.с.)	Автоматична, гідротрансформатор	механічний	гусеничний	до 7	до 120
Tesmec TRS-1075	CAT C9.3B (375 к.с.)	ГОТ	механічний	гусеничний	до 3	до 91
Vermeer T1255III	CAT C18 ACERT (600 к.с.)	ГОМТ [14]	ОГП	гусеничний	до 6	до 91
Astec RT1160	Cummins 250 кВт	ГОМТ	механічний	колісний	до 2,6	до 60
ПЗМ-2	двигун до 240 к.с.	Механічна	ОГП	колісний	до 1,2	до 90

Перспектива впровадження гідрооб'ємно-механічних трансмісій. Впровадження гідрооб'ємно-механічної трансмісії (ГОМТ) у конструкцію землерийної траншейної машини має велику актуальність щодо підвищення енергоефективності, керованості та надійності приводу у складних експлуатаційних умовах [20]. Цей тип трансмісії поєднує в собі переваги

гідравлічного регулювання та механічної ефективності, що особливо важливо для техніки, яка працює з перемінними навантаженнями та потребує точного контролю над швидкістю та зусиллям [21]. Технічні переваги ГОМТ для траншейної машини полягають у можливості безступінчастого регулювання швидкості, автоматичного узгодження потужності між двигуном і навантаженням, а також реалізації функцій реверсу та блокування без застосування складних механічних систем. Це дозволяє адаптувати роботу машини до різних типів ґрунтів, щільності та наявності перешкод, знижуючи ймовірність перевантажень та збоїв [22]. Експлуатаційні переваги включають зниження витрат пального за рахунок оптимізації роботи двигуна, зменшення зносу елементів трансмісії завдяки меншій кількості тертьових з'єднань, а також можливість реалізації автоматизованого або дистанційного керування. ГОМТ також сприяє зменшенню габаритів трансмісійної частини машини, що дозволяє більш гнучко компонувати вузли у вузьких корпусах траншейних машин. Функціональні особливості ОГП роблять його доцільним для реалізації як приводу ходової частини, так і приводу робочих органів – особливо в умовах, коли важливо забезпечити незалежне регулювання режимів роботи різальних барабанів, ланцюгів або гвинтових органів.

Доцільність впровадження ГОМТ на землерийну машину підкріплюється роботою [23], в якій проведено дослідження навантажувальних характеристик землерийних машин типу ПЗМ-2(3) та оцінка можливості заміни на ОГП обертання ланцюгового робочого органу та роторного металника відсипаного ґрунту з підбором гідромоторів та насосів. Встановлено, що для об'ємного ОГП ланцюгового робочого органу землерийної траншейної машини можуть бути застосовані високомоментні радіально-поршневі гідромотори з робочим об'ємом $1800\div 2500$ см³ або аксіально-поршневі гідромотори з планетарними редукторами, для роторного металника героторні гідромотори з робочим об'ємом 200 см³.

Таким чином, з огляду на сучасні тенденції автоматизації, підвищення ефективності та гібридизації машин, а також досвід закордонних конструкторів (табл. 1) – застосування ГОМТ в траншейних землерийних машинах виглядає технічно доцільним і економічно обґрунтованим. Це відкриває перспективи для створення високопродуктивних, адаптивних і більш надійних зразків техніки.

Перспектива впровадження електромеханічних (гібридних) трансмісій. Сучасні вимоги до підвищення енергоефективності, екологічності та автоматизації мобільних машин сприяють активному розвитку електромеханічних трансмісій, які часто реалізуються у вигляді гібридних систем. Такі трансмісії поєднують двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) з електричним приводом та енергетичним накопичувачем (акумуляторною батареєю або суперконденсатором), що дозволяє ефективно адаптувати роботу машини до різних експлуатаційних умов [22, 24]. На відміну від традиційних механічних або ГОМТ, електромеханічні трансмісії забезпечують безступінчасте регулювання швидкості, рекуперацію енергії при гальмуванні та можливість роботи приводу у режимі електротяги без запуску ДВЗ. Завдяки цьому досягається зниження витрати пального до 20–30% у циклічних режимах роботи, характерних для землерийної, дорожньої та кар'єрної техніки.

Ключовими перевагами електромеханічних трансмісій є: висока гнучкість та адаптивність до змінних навантажень; підвищена точність керування тяговим зусиллям та робочими органами; можливість роздільного приводу ходової частини та навісного обладнання; зменшення зносу механічних компонентів трансмісії; придатність до автоматизованого та дистанційного керування. З технічної точки зору, електромеханічні трансмісії можуть реалізовуватись за паралельною, послідовною або комбінованою схемою, що дозволяє гнучко адаптувати компоновку до конкретного типу машини. Наприклад, у важкій техніці ефективним є послідовний варіант, де ДВЗ працює в оптимальному режимі лише для заряджання тягової батареї, а усі робочі процеси забезпечуються електричними двигунами.

В [25] досліджується кілька конфігурацій гібридної силової установки для типової будівельної машини – екскаватора-навантажувача. Характеристики їзди по дорозі та завантаження вантажівки екскаватором-навантажувачем аналізуються за допомогою

симуляційних досліджень. Результати чітко вказують на переваги та недоліки кожної конфігурації гібридної силової установки.

В [26] розглядається сучасний стан гібридних фронтальних навантажувачів та екскаваторів, зосереджуючись на конфігурації силової установки, пристроях накопичення енергії та стратегіях управління енергією. Описано основи класифікації та характеристики кожної конфігурації силової установки. Узагальнено переваги та недоліки акумуляторів, суперконденсаторів, гідроакумуляторів та маховиків, що використовуються в гібридній будівельній техніці. Обговорюються технологічні виклики та тенденції розвитку гібридної будівельної техніки найближчим часом.

Таким чином, впровадження електромеханічних (гібридних) трансмісій у важку мобільну техніку, зокрема траншейні машини, є перспективним напрямом, що відповідає сучасним тенденціям розвитку енергоефективного, автоматизованого та екологічно безпечного машинобудування.

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця ефективності різних типів трансмісій для землерийних машин

Критерій	Механічна трансмісія	Гідрооб'ємна трансмісія (ГОТ)	Гідрооб'ємно-механічна трансмісія (ГОМТ)	Електромеханічні (гібридні) трансмісії
Енергоефективність	Висока на постійній швидкості	Низька при високому навантаженні	Висока у всьому діапазоні навантажень	Висока, з можливістю рекуперації енергії
Регулювання швидкості	Ступінчасте	Плавне, безступінчасте	Плавне, безступінчасте, з високим ККД	Плавне, безступінчасте, з високим ККД
Реверсування ходу	Через реверсивну передачу або КПП	Пряме, через зміну потоку	Пряме, без зміни конфігурації передач	Пряме, електронне
Можливість автоматизації	Обмежена	Висока	Висока	Відмінна
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	85–90%	60–75%	80–88%	85–92% (в залежності від конфігурації)
Стійкість до перевантажень	Середня	Висока	Висока	Середньо-висока (залежно від системи)
Складність обслуговування	Середня	Висока (гідравліка чутлива)	Середня (простішою, ніж повна гідростатика)	Висока (системи управління, електроніка)
Вартість виготовлення	Низька	Висока	Висока	Висока
Маса трансмісії	Відносно низька	Висока	Висока	Висока
Адаптивність до змінних умов ґрунту	Низька	Висока	Висока	Висока
Придатність для електрогідравлічного управління	Обмежена	Відмінна	Відмінна	–

Висновки. У результаті проведеного аналізу встановлено, що подальший розвиток конструкцій трансмісійних установок ланцюгових землерийних машин має орієнтуватися на впровадження адаптивних, енергоефективних та автоматизованих систем передавання потужності. Традиційні гідромеханічні трансмісії, хоча й забезпечують високу надійність в умовах складного середовища, але поступаються за низкою ключових параметрів сучасним гідрооб'ємно-механічним та електромеханічним трансмісіям.

ГОМТ демонструє високу гнучкість у регулюванні швидкості та тягового зусилля, що особливо важливо для роботи в неоднорідному ґрунті зі змінними навантаженнями. Водночас, електромеханічні трансмісії відкривають широкі можливості для впровадження безступінчастого регулювання, рекуперації енергії та інтеграції з системами автоматизованого керування. Їх використання дозволяє суттєво підвищити енергоефективність, маневреність і

адаптивність машини до різних експлуатаційних режимів роботи. Проведений порівняльний аналіз трансмісійних систем свідчить про доцільність поетапного переходу до гібридних або повністю електромеханічних трансмісій у перспективних зразках ланцюгових землерийних машин. Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці комбінованих трансмісій з електронним управлінням, які поєднують переваги гідравлічних і електричних приводів з метою досягнення високих показників ефективності, надійності та ресурсу.

Подяка. Загальний підхід розроблено в рамках науково-дослідного проєкту «Наукове обґрунтування підходів до створення гібридних силових установок об'єктів інженерно-будівельної техніки» (№ 0125U000240).

Список літератури:

1. Будівельні машини та обладнання : підручник / О. М. Лівінський, О. М. Пшінько, М. В. Савицький [та ін.]. – Київ : Українська академія наук ; МП Леся, 2015. – 612 с.
2. Інженерна техніка та спеціальні машини для ліквідації надзвичайних ситуацій : навч. посіб. / О. М. Ларін, І. М. Грицина, Н. І. Грицина, А. Я. Калиновський, Б. І. Кривошей. – Харків : НУЦЗУ, 2012. – 380 с.
3. Ніколаєнко В. А. Створення мобільної землерийної машини безперервної дії за динамічною навантаженістю : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. А. Ніколаєнко ; наук. керівник М. О. Гончар ; ХНАДУ. – Харків, 2021. – 209 с.
4. Аврунін Г. А. Розрахунок параметрів гідромотора та динаміки об'ємного гідропривода ланцюгового робочого органу землерийної траншейної машини / Г. А. Аврунін, І. Г. Кириченко, В. Б. Самородов, І. І. Мороз // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Гідравлічні машини та гідроагрегати. – 2021. – № 2. – С. 48–57.
5. Kim J., Kwon O. S., Hai N. L. D., Ko J. H. Study on the design of an underwater chain trencher via a genetic algorithm // Journal of Marine Science and Engineering. – 2019. – Vol. 7, No. 12. – Article 429. – DOI: 10.3390/jmse7120429.
6. Giang D. T. Study to determine the effect of blade distance and chain speed on the productivity of trench excavators using Taguchi method // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2023. – Vol. 17, No. 4. – P. 139–149. – <https://doi.org/10.12913/22998624/169427>.
7. Tan H., Shen C., Guo Z., Li D., Ma S., Xu L. Structural parameters optimization and experiment of trenching blades via DEM // INMATEH Agricultural Engineering. – 2024. – No. 74. – Article 934. – <https://doi.org/10.35633/inmateh-74-82>.
8. Smieszek M., Musiiko V., Mateichyk V., Tsiuman M., Koval A., Mościszewski J. Determination of continuous earthmoving machinery course stability under the conditions of cyclic lateral loading // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 14. – Article 7029. – DOI: 10.3390/app12147029.
9. Ditch Witch introduces heavy-duty trencher with purpose-built design features for superior ROI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ditchwitch.com/on-the-job/ditch-witch-introduces-heavy-duty-trencher-with-purpose-built-design-features-for-superior-roi/>
10. Ditch Witch introduces its largest trencher, the HT275 for heavy-duty installations [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://constructionreviewonline.com/products/ditch-witch-introduces-its-largest-trencher-the-ht275-for-heavy-duty-installations/>
11. Trencor T16 Sales Sheet [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу: https://trencor.com/wp-content/uploads/2022/05/TRN-PROD-12836-01-T16-Sales-Sheet-2021_v1.pdf
12. Tesmec – Траншейні машини [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tesmec.com/ru/node/569>
13. Vermeer Corporation. Pipeline Trencher Lineup 2023 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.vermeer.com/getmedia/f63b306c-50be-412b-afbb-4c218163f222/pipeline-trencher-lineup-2023.pdf>
14. Vermeer Corporation. Vermeer T1255III Terrain Leveler [Електронний ресурс] // Construction Equipment. – Режим доступу: <https://www.constructionequipment.com/directory/product/10752392/vermeer-corporation-vermeer-t1255iii-terrain-leveler>
15. BigIron Auctions. 2008 Astec RT1160 Trencher Backhoe [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bigiron.com/Lots/2008AstecRT1160TrencherBackhoe>
16. Astec Underground. RT1160 Ride-on Trencher [Електронний ресурс] // TJ-Tiefbautechnik GmbH. – Режим доступу: https://www.tj-tiefbautechnik.de/assets/docs/screen_ASTEC_RT1160.pdf
17. ПЗМ-2 [Електронний ресурс] // СВІП. – Режим доступу: <https://vijskpen.fandom.com/uk/wiki/ПЗМ-2>
18. Сафонов Т. Інженерна техніка Нацгвардії зміцнює оборону Харківщини [Електронний ресурс] / Т. Сафонов // Мілітарний. – 2022. – 18 квітня. – Режим доступу: <https://mil.in.ua/uk/news/inzhenerna-tehnika-natsgvardiyi-zmitsnyuye-oboronu-harkivshhyuny/>
19. Мусійко В. Д., Гончар М. О., Ніколаєнко В. А. Динамічні навантаження в мобільній землерийній машині безперервної дії під час стопоріння робочих органів // Вісник Харківського національного автомобільно-

- дорожнього університету : зб. наук. пр. – Харків : ХНАДУ, 2020. – Вип. 88, т. 2. – С. 61–66. – <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.61>.
20. Самородов В. Б., Бондаренко А. І., Кожушко А. П., Пелипенко Є. С., Мітцель М. О. Перспективні трансмісії колісних тракторів // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Автомобіле- та тракторобудування. – 2014. – № 10 (1053). – С. 3–10.
 21. Самородов В. Б., Кальченко Б. І., Ребров О. Ю., Кожушко А. П., Чернишев Д. О. Робота безступінчастої трансмісії, що розроблена НТУ «ХПІ» та АТ «ХТЗ», в економічному режимі // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2017. – № 14 (1236). – С. 73–79.
 22. Кожушко А. П., Даниленко В. Д., Селевич С. Г. Аналіз розвитку трансмісійних установок сучасних колісних тракторів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Автомобіле- та тракторобудування. – 2022. – № 2. – С. 118–131. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.13>
 23. До модернізації об'ємних гідроприводів колісної землерийної машини на базі тракторів ХТЗ / Г. А. Аврунін, О. Ю. Ребров, І. Г. Пімонов, О. В. Щербак, І. І. Мороз // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Автомобіле- та тракторобудування : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 1. – С. 96–106. – <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.1.11>.
 24. Даниленко В. Д., Ткачов В. Ю., Кожушко А. П., Горбов О. М. Обґрунтування конструкційного вибору силової установки електротрактора // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Автомобіле- та тракторобудування : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2023. – № 2. – С. 43–51. – <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.2.05>.
 25. Pioro D. J., Shepherd J., Maciejowski J. M. Simulation and analysis of powertrain hybridisation for construction equipment // International Journal of Electric and Hybrid Vehicles. – 2010. – Vol. 2, No. 3. – P. 240–258. – <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2010.033700>.
 26. Wang J., Yang Z., Liu S., Zhang Q., Han Y. A comprehensive overview of hybrid construction machinery // Advances in Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 8, No. 3. – <https://doi.org/10.1177/1687814016636809>.

References (transliterated):

1. Livinskyi, O. M., Pshinko, O. M., Savytskyi, M. V., et al. (2015). Budivelni mashyny ta obladdannia [Construction machines and equipment]. Kyiv: Ukrainska akademiia nauk; MP Lesia.
2. Larin, O. M., Hrytsyna, I. M., Hrytsyna, N. I., Kalynovskyi, A. Ya., & Kryvoshei, B. I. (2012). Inzhenerna tekhnika ta spetsialni mashyny dlia likvidatsii nadzvychnykh sytuatsii [Engineering equipment and special machines for emergency response]. Kharkiv: NUTSZU.
3. Nikolaenko, V. A. (2021). Stvorennia mobilnoi zemleryinoi mashyny bezperervnoi dii za dynamichnoi navantazhenistiu [Development of a mobile continuous-action excavator based on dynamic loading] (PhD dissertation, 05.05.04). Kharkiv: KhNADU.
4. Avrunin, H. A., Kyrychenko, I. H., Samorodov, V. B., & Moroz, I. I. (2021). Rozrakhunok parametriv hidromotora ta dynamiky obiemnoho hidropryvoda lantsiuhovoho robochoho orhanu zemleryinoi transheinoi mashyny [Calculation of parameters of hydraulic motor and dynamics of volumetric drive of chain working body of trenching machine]. Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Ser.: Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty, (2), 48–57.
5. Kim, J., Kwon, O. S., Hai, N. L. D., & Ko, J. H. (2019). Study on the design of an underwater chain trencher via a genetic algorithm. Journal of Marine Science and Engineering, 7(12), 429. <https://doi.org/10.3390/jmse7120429>
6. Giang, D. T. (2023). Study to determine the effect of blade distance and chain speed on the productivity of trench excavators using Taguchi method. Advances in Science and Technology Research Journal, 17(4), 139–149. <https://doi.org/10.12913/22998624/169427>
7. Tan, H., Shen, C., Guo, Z., Li, D., Ma, S., & Xu, L. (2024). Structural parameters optimization and experiment of trenching blades via DEM. INMATEH Agricultural Engineering, 74, Article 934. <https://doi.org/10.35633/inmateh-74-82>
8. Smieszek, M., Musiiko, V., Mateichyk, V., Tsiuman, M., Koval, A., & Mościszewski, J. (2022). Determination of continuous earthmoving machinery course stability under the conditions of cyclic lateral loading. Applied Sciences, 12(14), 7029. <https://doi.org/10.3390/app12147029>
9. Ditch Witch. (n.d.). Ditch Witch introduces heavy-duty trencher with purpose-built design features for superior ROI [Online resource]. Retrieved from <https://www.ditchwitch.com/on-the-job/ditch-witch-introduces-heavy-duty-trencher-with-purpose-built-design-features-for-superior-roi/>
10. Construction Review Online. (n.d.). Ditch Witch introduces its largest trencher, the HT275 for heavy-duty installations [Online resource]. Retrieved from <https://constructionreviewonline.com/products/ditch-witch-introduces-its-largest-trencher-the-ht275-for-heavy-duty-installations/>
11. Trencor. (2021). T16 Sales Sheet [Online resource]. Retrieved from https://trencor.com/wp-content/uploads/2022/05/TRN-PROD-12836-01-T16-Sales-Sheet-2021_v1.pdf
12. Tesmec. (n.d.). Trancheinyi mashyny [Trenching machines] [Online resource]. Retrieved from <https://www.tesmec.com/ru/node/569>

13. Vermeer Corporation. (2023). Pipeline Trencher Lineup 2023 [Online resource]. Retrieved from <https://www.vermeer.com/getmedia/f63b306c-50be-412b-afbb-4c218163f222/pipeline-trencher-lineup-2023.pdf>
14. Vermeer Corporation. (n.d.). Vermeer T1255III Terrain Leveler [Online resource]. In Construction Equipment. Retrieved from <https://www.constructionequipment.com/directory/product/10752392/vermeer-corporation-vermeer-t1255iii-terrain-leveler>
15. BigIron Auctions. (n.d.). 2008 Astec RT1160 Trencher Backhoe [Online resource]. Retrieved from <https://www.bigiron.com/Lots/2008AstecRT1160TrencherBackhoe>
16. Astec Underground. (n.d.). RT1160 Ride-on Trencher [Online resource]. TJ-Tiefbautechnik GmbH. Retrieved from https://www.tj-tiefbautechnik.de/assets/docs/screen_ASTEC_RT1160.pdf
17. SVP. (n.d.). PZM-2 [Online resource]. Retrieved from <https://vijskpenz.fandom.com/uk/wiki/ПЗМ-2>
18. Safronov, T. (2022, April 18). Inzhenerna tekhnika Natsgvardii zmitsniue oboronu Kharkivshchyny [Engineering equipment of the National Guard strengthens the defense of Kharkiv region]. *Military* [Online resource]. Retrieved from <https://mil.in.ua/uk/news/inzhenerna-tehnika-natsgvardiyi-zmitsnyuye-oboronu-harkivshchyny/>
19. Musiiko, V. D., Honchar, M. O., & Nikolaienko, V. A. (2020). Dynamic loads in mobile continuous earthmoving machines during working tool jamming. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 88(2), 61–66. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.61>
20. Samorodov, V. B., Bondarenko, A. I., Kozhushko, A. P., Pylypenko, Y. S., & Mitsel, M. O. (2014). Prospective transmissions for wheeled tractors. *Bulletin of NTU "KhPI". Ser.: Automotive and Tractor Engineering*, (10(1053)), 3–10.
21. Samorodov, V. B., Kalchenko, B. I., Rebrov, O. Yu., Kozhushko, A. P., & Chernyshov, D. O. (2017). Operation of the continuously variable transmission developed by NTU "KhPI" and PJSC "KhTZ" in economic mode. *Bulletin of NTU "KhPI"*, (14(1236)), 73–79.
22. Kozhushko, A. P., Danylenko, V. D., & Selevych, S. H. (2022). Analysis of the development of transmission systems of modern wheeled tractors. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automotive and Tractor Engineering*, (2), 118–131. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.13>
23. Avrunin, H. A., Rebrov, O. Yu., Pimonov, I. H., Shcherbak, O. V., & Moroz, I. I. (2022). Toward modernization of the volumetric hydraulic drives of wheel-type earthmoving machines based on KhTZ tractors. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automotive and Tractor Engineering*, (1), 96–106. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.1.11>
24. Danylenko, V. D., Tkachov, V. Yu., Kozhushko, A. P., & Horbov, O. M. (2023). Substantiation of the structural choice of the power plant for an electric tractor. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automotive and Tractor Engineering*, (2), 43–51. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.2.05>
25. Pioro, D. J., Shepherd, J., & Maciejowski, J. M. (2010). Simulation and analysis of powertrain hybridisation for construction equipment. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 2(3), 240–258. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2010.033700>
26. Wang, J., Yang, Z., Liu, S., Zhang, Q., & Han, Y. (2016). A comprehensive overview of hybrid construction machinery. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(3). <https://doi.org/10.1177/1687814016636809>

Надійшла (received): 21.04.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Кожушко Андрій Павлович (Andrii Kozhushko) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4725-5911>; e-mail: Andreykozhushko7@gmail.com

Мітцель Микола Олександрович (Mykola Mittsel) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0722-7799>; e-mail: mykola.mittsel@khp.edu.ua

Карпов Вадим Олегович (Vadym Karpov) – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7851-2458>; e-mail: vadym.karpov@mit.khpi.edu.ua

Кононенко Сергій Миколайович (Serhii Kononenko) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3874-4772>; e-mail: serhiikono@gmail.com

Малишев Сергій Євгенійович (Serhii Malyshev) – Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, провідний інженер відділу нелінійної механіки та математичного моделювання, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7739-9230>; e-mail: malyshev13091995@gmail.com