

А.П. КОЖУШКО, В.Д. ДАНИЛЕНКО, С.Г. СЕЛЕВИЧ

АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТРАНСМІСІЙНИХ УСТАНОВОК СУЧАСНИХ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ

Проаналізовано технічні рішення світових тракторобудівників при побудові трансмісії колісних тракторів. При вирішенні поставленої мети використовувалась методика, яка передбачала аналіз трансмісії за способом трансформації крутного моменту (ступінчасті та безступінчасті) та принципом дії (механічні, гідравлічні, електричні). Як результат висвітлено моделі таких тракторобудівників як: Case IH, Claas, Deutz-Fahr, Fendt, John Deere, Massey Ferguson, New Holland, Steyr, Valtra. Практична значимість роботи полягає у наданні рекомендацій щодо актуальних технологій конструювання трансмісій колісних тракторів.

Ключові слова: колісний трактор, трансмісія, powershift, подвійне зчеплення, безступінчаста трансмісія, гібрид, електрифікація, електротрактор.

A. KOZHUSHKO, V. DANYLENKO, S. SELEVICH

ANALYSIS IN DEVELOPMENT OF TRANSMISSIONS FOR MODERN WHEELED TRACTORS

The increase in the production of agricultural food products leads to the creation of energy-rich wheeled tractors, which are able to realize the power of the engine by increasing the speed of movement (productivity) or traction characteristics. But this direction of development has a counterbalance in environmental protection actions. So, in the European Union, emissions of carbon monoxide, hydrocarbons, nitrogen oxides, solid particles, etc. are limited for off-road vehicles. The outlined directions of development are of a contradictory nature, so tractor manufacturers are trying to create transmission units designed to meet the performance and environmental needs of a wheeled tractor. Therefore, the material of this article aims to analyze the technical solutions of the world's tractor manufacturers in the construction of transmissions of wheeled tractors. When solving the set goal, a technique was used, which involved analysis by the method of torque transformation (stepped and stepless) and the principle of action (mechanical, hydraulic, electric). As a result, the models of such tractor manufacturers as: Case IH, Claas, Deutz-Fahr, Fendt, John Deere, Massey Ferguson, New Holland, Steyr, Valtra were analyzed. The practical significance of the work lies in the provision of recommendations on current technologies for the construction of transmissions of wheeled tractors.

Key words: wheeled tractor, transmission, powershift, double clutch, continuously variable transmission, hybrid, electrification, electric tractor.

Вступ. Продовольча безпека є пріоритетною та однією з найважливіших цілей будь-якої країни. За даними Продовольчої та Сільськогосподарської організацій ООН кількість населення на планеті Земля перевищить 9 млрд. осіб, що зумовлює до зростання виробництва продовольчих товарів. Це, в свою чергу, стає підґрунтям до створення енергонасичених колісних тракторів, які здатні реалізовувати потужність двигуна за рахунок збільшення швидкості руху (продуктивності) або тягових характеристик. Але даний напрямок розвитку має протизагугу в дії з захисту навколишнього середовища. Так, в Європейському Союзі з 2018 по 2021 роки запроваджувався «м'який» перехід на нові стандарти викидів Stage V для позадорожньої техніки, які обмежують викиди чадного газу, вуглеводнів, окисів азоту, твердих частинок, тощо. З метою дотримання цих вимог впроваджувалися наступні технології: вприскування Common Rail під високим тиском, рециркуляція охолоджених вихлопних газів, дизельний каталізатор окислення, селективне каталітичне відновлення та сажовий фільтр вихлопу.

Окресленні напрями розвитку мають суперечливий характер, тому тракторобудівники намагаються створювати силові установки, які б були покликані задовольняти потреби з продуктивності та екологічності колісного трактора. За принципом трансформації крутного моменту розрізняють ступінчасті та безступінчасті трансмісії, які за принципом дії поділяються на механічні, гідравлічні, електричні. Тракторобудівники також впроваджують альтернативні рішення при побудові силових агрегатів: гібридні (гідрооб'ємно-механічні

(ГОМТ) та електромеханічні трансмісії) або переходять на інше джерело живлення. Зважаючи на це, актуальним є проведення аналізу технічних рішень тракторобудівників трансмісійних силових установок для колісної техніки.

«Класична» будова трансмісії. Перші тракторні трансмісії базувались на механічній трансформації крутного моменту ступінчастим шляхом. Вони мали вузький діапазон регулювання швидкості. Їх розвиток відбувався в напрямках збільшення діапазонів ступеневого регулювання, числа кількості передач, можливості одночасної роботи приводів рушіїв та відбору потужності, збільшення числа місць відбору потужності, тощо. Наступним еволюційним кроком таких трансмісій стало впровадження немеханічних пристроїв безступінчастого регулювання (гідродинамічних, гідростатичних, електричних), а також за рахунок вдосконалення механізмів управління елементів трансмісії (зчеплення, коробки передач, диференціалів ведучих мостів, приводами відбору потужності, гальмівними механізмами) [1].

Механічні трансмісії з перемиканням передач рухомими шестернями з розривом потоку потужності (тобто зупинкою трактора) вже завершили своє існування і на нових моделях тракторів вже не застосовуються. Такий підхід обумовлено значними незручностями при експлуатації колісного трактора та зниженням продуктивності машинно-тракторного агрегату, а також з унеможливленням повноцінної реалізації потужності двигуна. Тому сьогодні популярними є механічні трансмісії, які мають змогу перемикати передачі під навантаженням (рис. 1).

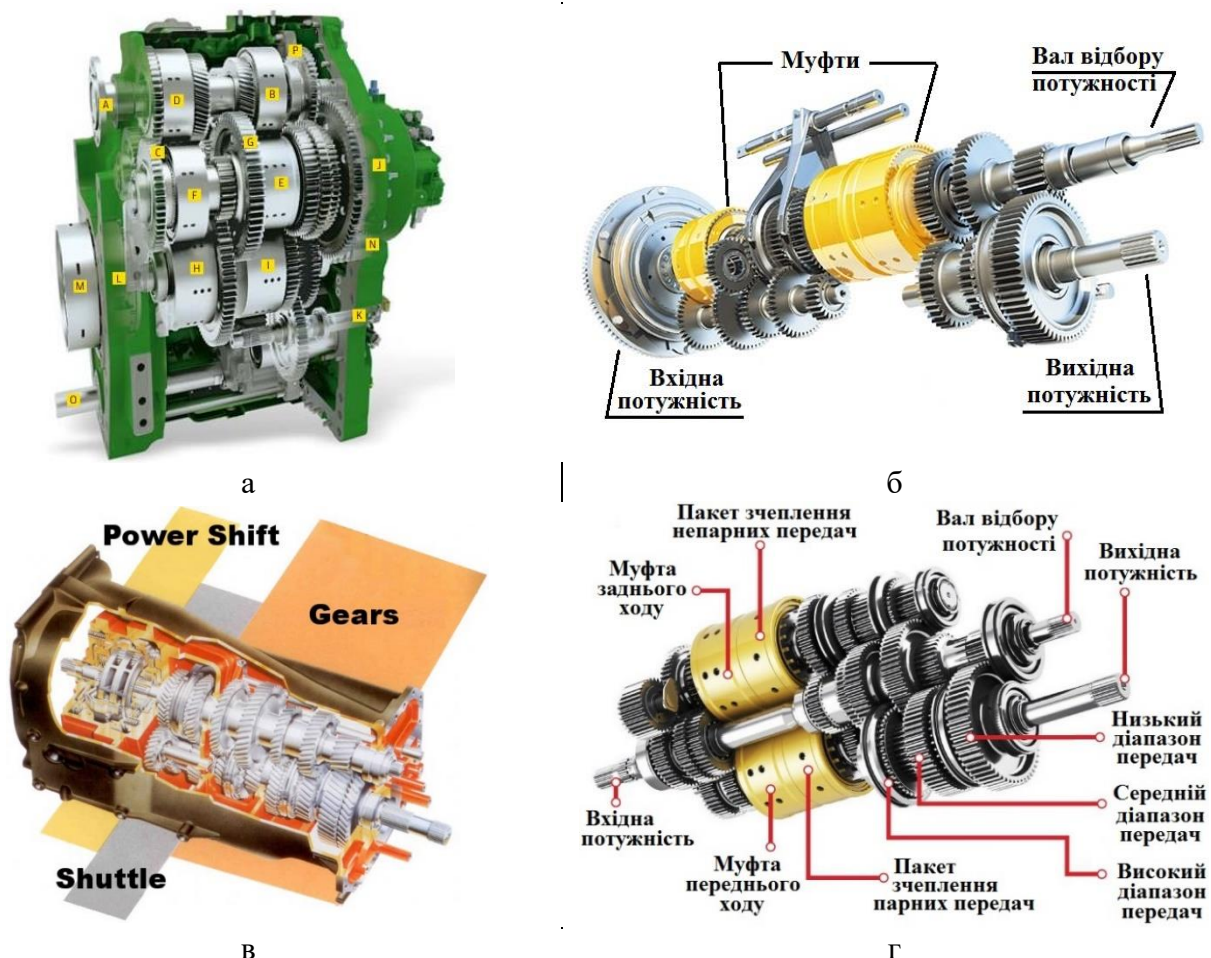


Рис. 1 – Приклади PowerShift світових тракторобудівників:

а – John Deere e23; б – New Holland Electro Command Semi-PowerShift [2]; в – Massey Ferguson 3140 з функцією Power Shuttle; г – New Holland Dynamic Command з Dual Clutch

В світовій термінології трансмісії, які під повним навантаженням перемикають передачі, називаються *PowerShift*. Під час напівсилового перемикання передач (*Semi-PowerShift*) оператор використовує зчеплення тільки між діапазонами і не на кожній передачі в межах діапазону (рис. 1б), тоді як повне силове перемикання не вимагає зчеплення прямо через діапазони та передачі [3]. За способом перемикання передач поділяються на гідро- та електрокеровані. Також слід відзначити впровадження додаткового агрегату для можливості перемикання напряму руху колісного трактора, тобто при русі вперед оператор-водій може потягнути за важіль та зупинити трактор і рухатися назад з тією ж швидкістю. Така функція називається *Power Shuttle* (або *Power Reverser* рис. 1в) [4]. Популярними є *PowerShift*, що мають розбиття за передачами: 16x16, 32x32. Збільшення кількості передач обумовлено бажанням задовольнити тягові властивості при виконанні технологічних робіт.

На базі *PowerShift* також відоме впровадження такого типу трансмісії, як *Double Clutch Transmission* (рис. 2), у якому крутний момент передається від одного зчеплення, що працює, до іншого зчеплення за допомогою контролю ковзання зчеплення. Обидва зчеплення по черзі вмикаються через різні передачі, і передача потужності продовжується під час перемикання передач через контроль крутного моменту зчеплення. Аналізуючи різновид таких трансмісій, відмітимо їх впровадження на тракторах New Holland, Case, Claas, John Deere, тощо [5 – 7].

Трансмісії *QuadriShift* від Claas та *DirectDrive* від John Deere використовують класичну технологію подвійного зчеплення: зміна швидкості відбувається за рахунок гідрокерованого перемикання передач без розриву потоку потужності [8, 9]. *Dyna E-Power* від Massey Ferguson пропонує використовувати технологію подвійного зчеплення для перемикання діапазону швидкостей, що забезпечить прогнозоване та плавне перемикання передач. Вона пропонує чотири діапазону з сімома швидкостями *PowerShift* кожна з напівперекриттями для максимальної продуктивності [10].

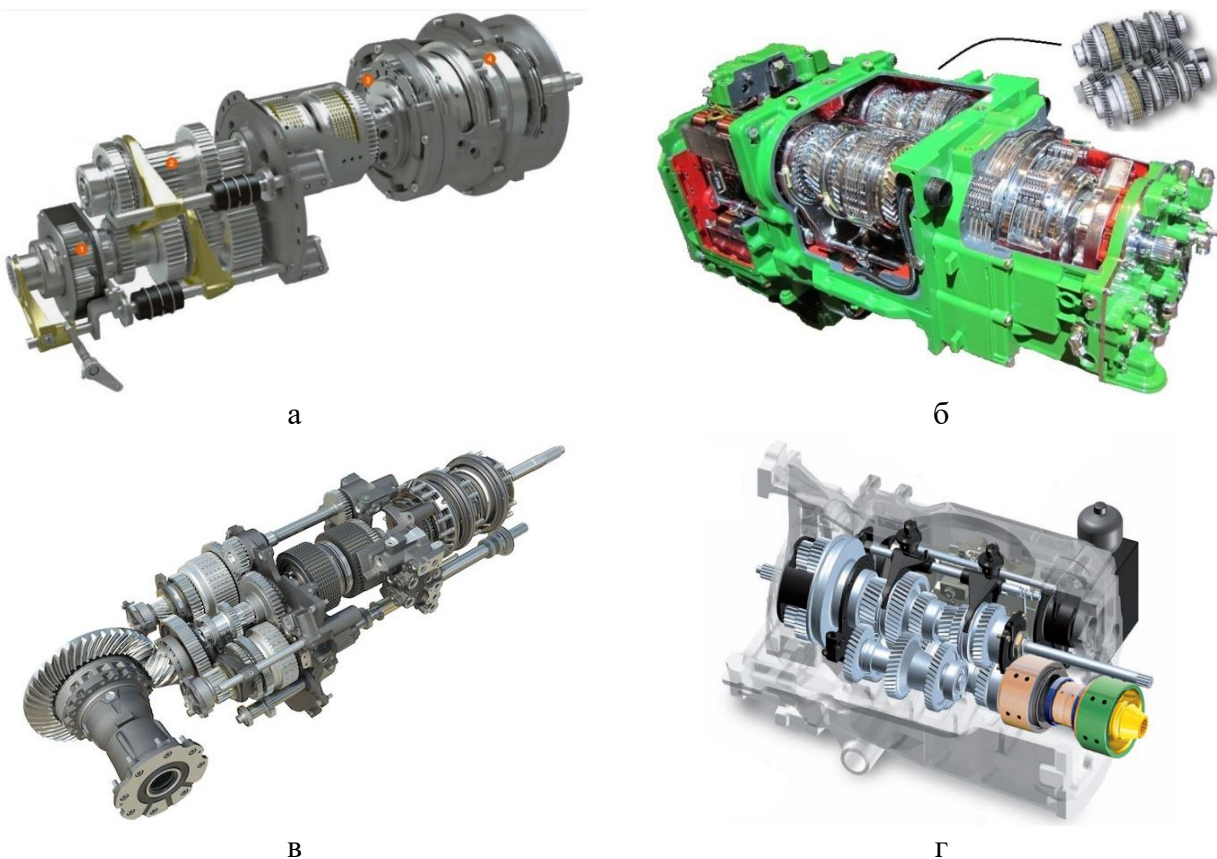


Рис. 2 – Приклади *Double Clutch Transmission* світових тракторобудівників:
 а – *QuadriShift* від Claas; б – *DirectDrive* від John Deere; в – *Dyna E-Power* від Massey Ferguson;
 г – CVT від Steyr

Унікальною трансмісією за своєю будовою є безступінчаста ГОМТ CVT від Steyr (рис. 2г), яка складається з гідравлічної та механічної гілок в поєднанні з технологією подвійного зчеплення (рис. 3). Інтелектуальна взаємодія гідравлічних і механічних компонентів забезпечує економічність колісного трактора.

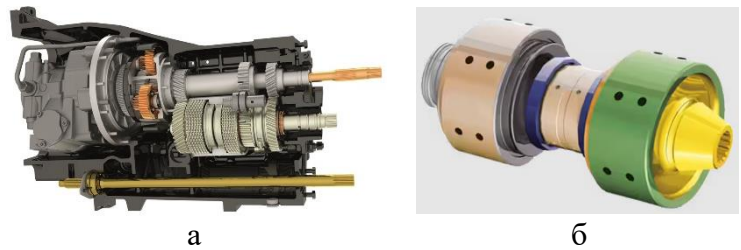


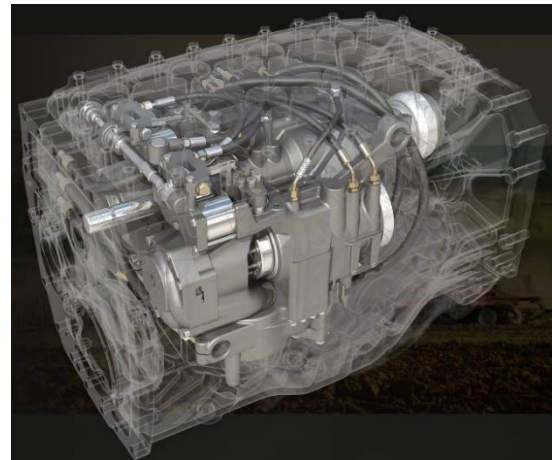
Рис. 3 – Складові безступінчастої трансмісії CVT від Steyr: а – ГОМТ; б – подвійне зчеплення

Гібридні силові агрегати. Найбільш розвиненими та розповсюдженими гібридними силовими установками є гідрооб'ємно-механічні трансмісії. Перша поява такої трансмісії датується 1965 роком, коли компанія Wheel Horse Products представила садовий трактор з гідравлічною CVT. Проте даний концепт не був сприйнятий тракторобудівниками за умови неякісної роботи гідравлічної гілки. Продовження та суттєвий поштовх у впровадженні даної технології було набуто у 1996 році, коли Fendt на колісному тракторі Fendt 926 представив трансмісію Vario. Через рік корпорація AGCO придбала Fendt та розширила впровадження таких трансмісій на моделі тракторів Challenger Tractor, Massey Ferguson і TerraGator [11].

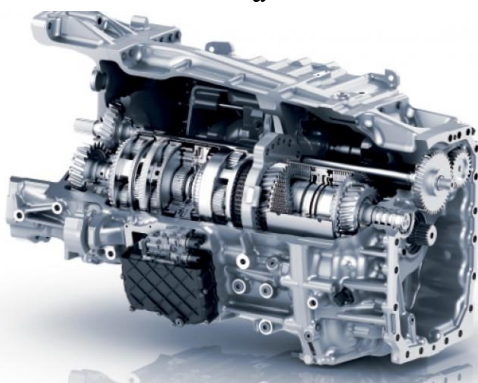
За своєю будовою ГОМТ (рис. 4) розрізняються за принципом розміщення планетарного механізму (суматора гідравлічної та механічної гілок) [12 – 14]: «диференціал на вході», «диференціал на виході» та змішана будова, яка передбачає наявність диференціалів, як на вході, так і на виході з трансмісії.



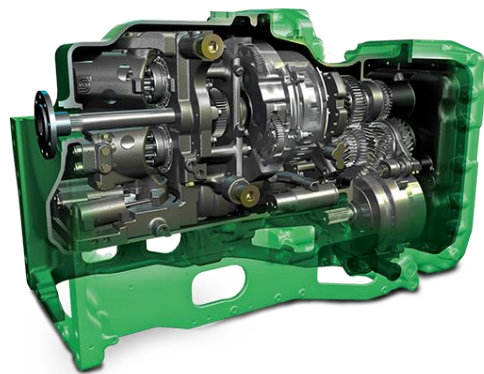
а



б



в



























г
















Рис. 4 – Приклади ГОМТ світових тракторобудівників:
а – Auto Command від New Holland; б – Dyna-VT від Massey Ferguson; в – TTV від Deutz-Fahr;
г – AutoPowr / IVT від John Deere

За останні десятиліття ГОМТ склала гідну конкуренцію механічним трансмісіям [15]. В табл. 1 наведено аналіз світових тракторобудівників з запропонованими видами трансмісій.

Таблиця 1 – Огляд видів трансмісій на відомих моделях тракторів

Case IH [16]				
55-120 к.с (Farmall)	110-140 к.с (Maxxum)	125-225 к.с (Puma)	280-400 к.с (Magnum)	400-600 к.с (Steiger)
				
Synchroshift (12F/12R; 20F/20R)	Synchroshift (12F/12R); Hi/Lo PowerShift (24F/24R); Semi Powershift (16F/16R)	Full-Powershift (18F/6R); Semi-Powershift (18F/6R)	PowerDrive (18F/4R; 19F/4R; 21F/5R)	Powershift (16F/4R)
CVX*				
Claas [17]				
72-101 к.с (NEXOS)	95-130 к.с (ARION 410-430)	140-170 к.с (ARION 620-640 C)	197-238 к.с (ARION 820-850)	320-410 к.с (ARION 920-950)
				
PowerShift (12F/12R; 24F/24R)	QuadriShift (16F/16R)	QuadriShift (16F/16R; 24F/24R)	HexaShift (24F/24R)	CMATIC*
Deutz-Fahr [18]				
66-116 к.с (Серія 5)	129-230 к.с (Серія 6)	247-287 к.с (Серія 7-8)	295-336 к.с (Серія 9)	
				
PowerShift (15F/15R; 30F/15R)	RCshift (30F/15R)	TTV*		
TTV*				
Fendt [19]				
79-517 к.с				
				
Vario*				
John Deere [20]				
50-250 к.с	75-155 к.с	110-410 к.с	390-640 к.с	
				
PowrReverser/PowrQuad (16F/16R); Powr8 (32F/16R); AutoQuad/CommandQuad/DirectDrive (24F/24R)		e23 (23F/11R)	e18 (18F/6R)	
AutoPowr / IVT*				
Massey Ferguson [21]				
75-120 к.с (MF 3)	105-145 к.с (MF 5S)	135-180 к.с (MF 6S)	155-210 к.с (MF 7S)	205-305 к.с (MF 8S)
				
PowerShift (15F/15R)	Dyna-4 (16F/16R); Dyna-6 (24F/24R)	Dyna-6 (24F/24R);		Dyna-7 (28F/28R); Dyna E-Power
Dyna-VT*				

закінчення табл. 1

New Holland [22]				
55-75 к.с. (T4)	80-117 к.с. (T5)	116-150 к.с. (T6)	150-313 к.с. (T7)	340-396 к.с. (T8)
				
Synchro Shuttle (12F/12R; 20F/20R); Powershuttle (12F/12R; 20F/20R)	Synchro Shuttle (20F/20R); Powershuttle (12F/12R); Split Command (24F/24R); Dual Command (24F/24R)	Electro Command; Dynamic Command	RC Semi (18-19F/6R); RC Full (18-19F/6R)	Ultra Command (19F/4R; 21F/5R)
Auto Command*				
Steyr [23]				
58-114 к.с. (Kompakt)	116-150 к.с. (Profi)	150-180 к.с. (Impuls)	185-240 к.с. (Absolut)	250-300 к.с. (Terrus)
				
Synchroshift (12F/12R); PowerShift (24F/24R)	S-Matic (16F/16R); PowerShift (24F/24R)	CVT*		
CVT*				
Valtra [24]				
75-135 к.с. (Серія А)	135-201 к.с. (Серія N)	155-271 к.с. (Серія T)	230-305 к.с. (Серія Q)	290-405 к.с. (Серія S)
				
Valtra Power Shuttle (12F/12R; 16F/16R; 24F/24R)	Valtra Power Shuttle (12F/12R; 16F/16R; 24F/24R)	Direct CVT*		AVT*
Direct CVT*				

* ГОМТ

З аналізу даних табл. 1 помітно, що використання ГОМТ загалом спостерігається на моделях з високою потужністю. Ця тенденція пояснюється більшою доцільністю використання ГОМТ на тракторах при виконанні тягових робіт за рахунок швидкого безступінчастого та плавного підбору необхідного передавального числа трансмісії.

Світові тракторобудівники почали глобальну електрифікацію сільськогосподарської техніки на базі гібридної концепції за допомогою інтегрованих системних рішень. Така тенденція перш за все обумовлена зниженням викидів в зовнішнє середовище та збільшенням продуктивності.

Першими кроками електрифікації колісних тракторів можна рахувати впровадження додаткового трьох-фазного електрогенератора на маховику двигуна (рис. 5). Так, в моделях John Deere 7430E/7530E Premium [25] і 6210RE, частина виробленої електроенергії від генератора споживалась допоміжними пристроями двигуна з електричним приводом: вентилятором радіатора та компресором кондиціонера, що дозволило якісно контролювати час роботи та швидкість цих пристроїв. Вироблена електроенергія може бути доступна на зовнішніх розетках. За результатами польових випробувань встановлено, що при порівнянні електрифікованої та звичайної версії трактора 7530, отримано зниження витрати палива на 4% при боронуванні та 16% при буксируванні причепа по дорозі [26].

Таку ж технологію надала Fendt у моделі X Консерт. Трактор і агрегат обмінюються даними через перевірену стандартизовану мережу ISOBUS. Електрична потужність до 130 кВт передається до знарядь у формі джерела постійної напруги 700 В через «POWERBUS». Таким же чином, POWERBUS забезпечує живлення внутрішніх споживачів трактора, таких як електричний привід вентилятора або насоси охолоджуючої рідини.

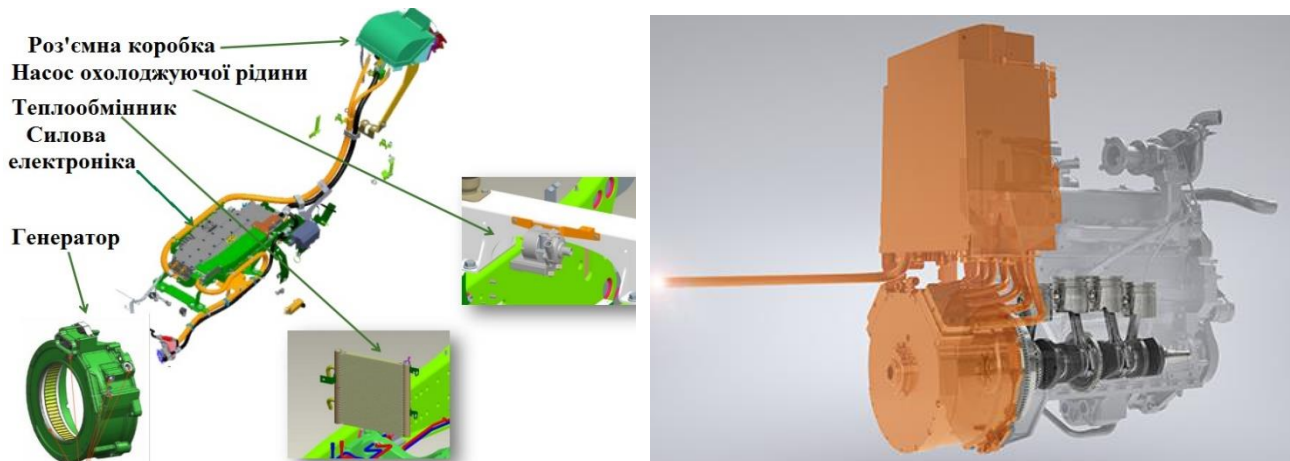


Рис. 5 – Компоненти електрифікації колісних тракторів:
а – John Deere 6210 RE [27]; б – Fendt X Concept [25]

Компанія Steyr представила інноваційний Hybrid Drivetrain Konzept (рис. 6), який побудовано за концепцією дизель/електричний гібрид. Основна увага зосереджена на перевагах систем електричного приводу, які могли б привести в дію легкий трактор з високою потужністю, що забезпечить зменшення паливної витрати близько 8%. Також зазначається, що даний концепт набагато ефективніший у збереженні стабільної максимальної швидкості під час руху в гору – це досягається завдяки застосуванню технології суперконденсаторів, яка дає змогу збільшити потужність трактора при збільшенні опору руху.

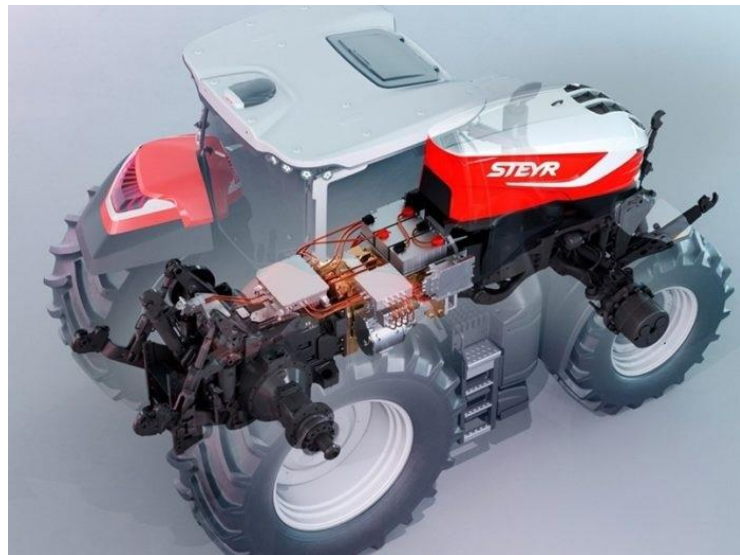


Рис. 6 – Hybrid Drivetrain Konzept від Steyr [28]

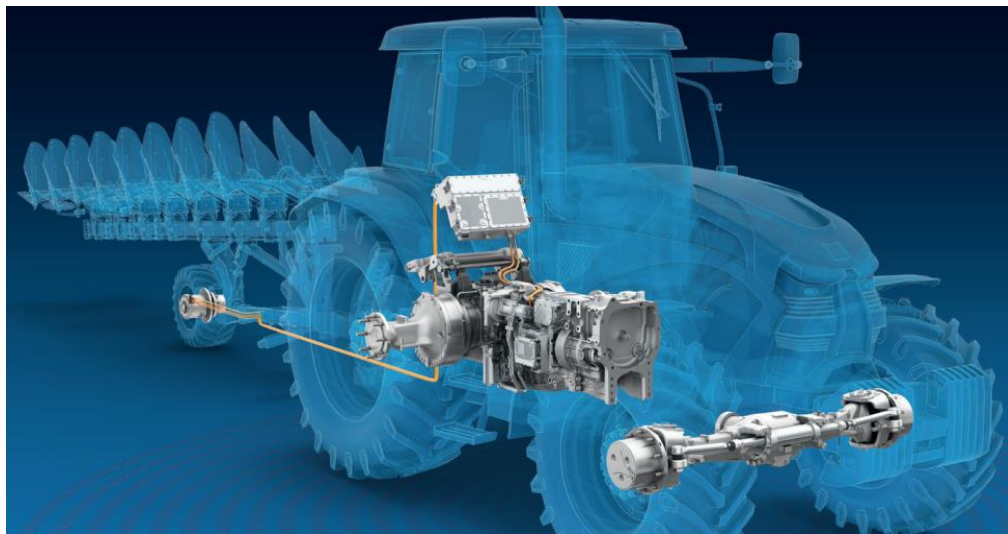
Це збільшує потужність трактора при збільшенні опору руху, забезпечуючи при цьому збільшення інтенсивності прискорення до 25% та збереження стабільного швидкісного руху при виконанні тягових робіт з піковими навантаженнями в умовах високої тяги.

Також відомими гібридними концепціями є виробництва компаній ZF [29] та John Deere [30] (рис. 7), які побудовані на базі ГОМТ, це трансмісії eTERRAMATIC та eAutoPowr, відповідно. У цих трансмісіях електрична система – генератор та електродвигун – замінюють всю гідрооб'ємну передачу. Електричний двигун безпосередньо приводить в рух електрогенератор, від якого перетворений струм (з постійного в змінний) надходить до трансмісії. Обидва механізми є безщітковими та мають рідинне охолодження (частина виробленої енергії може подаватись у зовнішню розетку). Потім крутний момент передається від електродвигуна до планетарного механізму, де підсумовується механічна гілка потужності з електричною. Відомо, що трансмісія eAutoPowr дозволяє рухатися зі швидкістю до 5 км/год вперед і назад за рахунок енергії, отриманої тільки від електродвигуна.

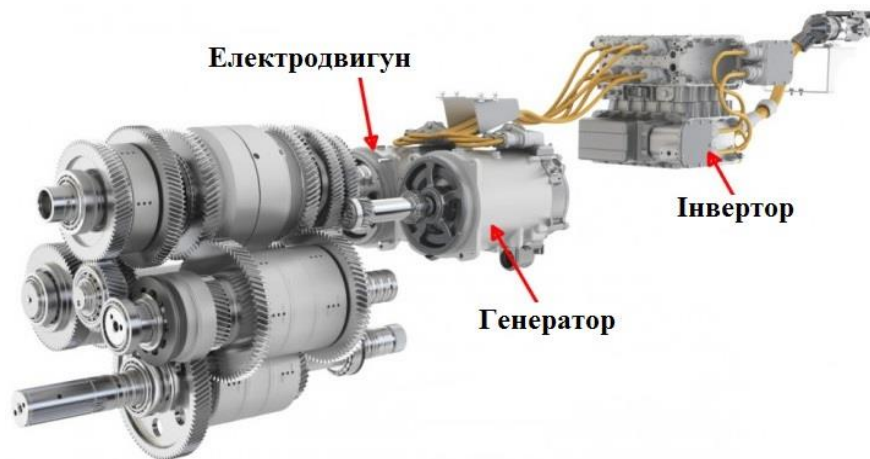
Електрична енергія також передається назовні до супутніх машин. Частина виробленої потужності може бути використана для системи приводу, частина – для зовнішньої розетки – до 80 кВт (eTERRAMATIC) та 100 кВт (eAutoPowr), з напругою 480 В (постійний струм).

Потужність, що передається назовні є не додатковою, а частиною, що розподіляється назовні і на привід трансмісії трактора. Відомо, що $\sim 80\%$ потужності, виробленої двигуном внутрішнього згоряння трактора, розподіляється на трансмісію, а до 20% на додаткові агрегати, які під'єднанні до зовнішньої розетки. Якщо зовнішнє живлення вимкнено, тоді 100% потужності направлено на трансмісію трактора. У майбутньому ВВП також може мати електричне живлення.

Варто відзначити, що приводи на агрегатах не мають постійного живлення від зовнішньої розетки, вони вмикаються автоматично, коли датчики фіксують пробуксовку коліс трактора. Також включення відбувається при русі машинно-тракторного агрегату в гору. Таким чином, дана технологія дозволяє зменшити баласт на тракторі, який зазвичай передбачає збільшення тяги, що також впливає на зменшення ущільнення ґрунту та споживання палива.



а



б

Рис. 7 – Електрофікація трактора на базі трансмісій:
а – eTERRAMATIC від ZF; б – eAutoPowr від John Deere

Електрифікований трактор на базі CLAAS Arion 650 [31] оснащений стартер-генератором колінчастого вала (синхронна машина постійного збудження, PSM) між дизельним двигуном і безступінчастою коробкою передач. Батарея високої напруги підключена безпосередньо до проміжного кола постійного струму та захищена роздільними контакторами в лініях високої напруги. Дизельний двигун можна від'єднати на вхідній стороні генератора від трансмісії, таким чином трактор від послідовної схеми переходить до паралельної схеми гібрида (рис. 8).

Повністю гібридне електричне (HEV) силове рішення для колісної сільськогосподарської техніки представлено від Case ProHybrid EECVT (рис. 9). Трактор на базі звичайного Case MXM з двигуном 120 кВт і двома електромашинами по 50 кВт кожна. Одна електрична машина, яка працює як генератор, виробляє енергію другій, яка працює як двигун. Надлишок енергії зберігається в батареї 11,5 кВт/год. Крім того, енергію від гальмування можна рекуперувати та відправляти в акумулятор. У цьому рішенні силової установки трактор може працювати в повністю електричному режимі або в гібридному режимі з дизельним двигуном і електродвигунами разом через трансмісію CVT [32].



Рис. 8 – Високовольтна система в CLAAS Arion 650 Hybrid



Рис. 9 – Case ProHybrid EECVT

Таким чином, електрифікація колісних тракторів на базі гібридних технологій базується на будові класичних механічних трансмісій та заміні гідравлічних гілок на електричні в концепції ГОМТ.

Силові агрегати на альтернативних джерелах.

Електричний трактор, який має повну електричну трансмісію, представлено компанією Multi Tool Trac з Нідерландів (рис. 10). Ця силова установка використовує 6-циліндровий дизельний двигун потужністю 210 к.с., що приводить в дію електричні силові агрегати з номінальною 4 x 22 кВт та максимальною 4 x 44 кВт потужністю, які постачають енергію до літій-іонної батареї ємністю 30 кВт·год. Це забезпечує 0,5 години безперервної роботи. Електрична енергія подається від батареї на 4 електродвигуни на колесах [25]. Трактор має унікальне регулювання ширини колії на ходу та п'ять положень для всіх поширених агрегатів і сільськогосподарських обладнань.



Рис. 10 – Multi Tool Trac

Компанія John Deere запропонувала повністю електромобільні трактори (EV). Автономний

трактор GridCON (рис. 11а) з постійним підключенням до електромережі з місця поля. Трактор оснащений спеціальною котушкою з кабелем живлення довжиною 1 км, встановленим у передній частині трактора. За допомогою кабелю живиться два електродвигуни, один потужністю 100 кВт для приводу трактора, а другий потужністю 200 кВт для виведення потужності на знаряддя. Трактор має максимальну швидкість 20 км/год. Також відомі дві повністю електричні трактори John Deere: модель 1RE, повністю електричний прототип невеликого компактного трактора з очікуваним часом роботи 4,5 год на одному заряді (рис. 11б); другий – Joker, прототип повністю електричної та повністю автономної машини (рис. 11в). Joker має потужність 500 кВт та не містить кабіну, що надає трактору статус повністю автономного. У 2021 році, на додаток до описаних розробок, компанія John Deere вже провела польові випробування автономних машин, що працюють у групі (рис. 11г). У цьому конкретному прикладі John Deere GridCON постачає електроенергію на John Deere Joker. Однак ідея полягає в тому, щоб забезпечити енергією кілька машин [33].



а



б



в



г

Рис. 11 – Електротрактори компанії John Deere:
а – GridCON; б – 1RE; в – Joker; г – GridCON та Joker

Компанія Fendt представила модель e100 Vario, який має вихідну потужність 50 кВт з літій-іонною батареєю ємністю 100 кВт·год і напругою 650 В (рис. 12). Для зарядки використовується або струм напругою 400 В і потужністю до 22 кВт, що підключається через роз'єм стандарту СЕЕ, або постійний струм від зарядної колонки Supercharging Option. При використанні роз'єму стандарту CCS типу 2 через 40 хв. акумулятор буде заряджений на 80%. Крім того, електродвигун дозволяє рекуперувати енергію і в процесі роботи. Час роботи оцінено в 5 годин при помірному навантаженні [34].



Рис. 12 – Fendt e100 Vario

Також можна відмітити такі електротрактори: Kramer 5055e, Escorts Farmtrac 26E, Case 580 EV «Project Zeus», Rigitrac SKE50, JCB 525-60e, ХТЗ-2511Е [35, 36], які побудовані за тими ж принципами, як і Fendt та John Deere.

Як видно з аналізу, побудова потужних електротракторів зараз неможлива, тому тракторобудівники намагаються апробувати технологію повної електрифікації тракторів на малопотужних моделях.

Висновки. В роботі представлено відомі конструкційні рішення силових установок сучасних колісних тракторів. Окреслено відмінності між наведеними рішеннями. Встановлено, що тракторобудівники в своїх моделях рівнозначно пропонують споживачам, як класичні PowerShift, так і ГОМТ. Використання тракторів з ГОМТ має більшу доцільність при виконанні тягових робіт за рахунок якіснішої пристосованості до зміни тягової навантаги. З метою підлаштування PowerShift під можливість оптимальної реалізації тягового зусилля тракторобудівники реалізують трансмісії з розбиттям 24x24 та 32x32. Також в останні роки проводяться роботи з електрифікації трансмісій шляхом розробки гібридних силових установок, які ґрунтуються на конструкції PowerShift та ГОМТ. Впровадження повністю електричних силових установок на колісних тракторах спостерігається на малопотужних моделях.

Список літератури:

1. Самородов В.Б., Бондаренко А.І., Кожушко А.П., Пелипенко Є.С., Мітцель М.О. Перспективні трансмісії колісних тракторів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Автомобіле- та тракторобудування.* 2014. – № 10 (1053). С. 3 – 10.
2. 16x16 Semi-PowerShift (SPS) Transmission [Електронний ресурс]. *Boothel Tractor Parts.* – Режим доступу: <https://www.bootheltractorparts.com/mobile/view-part.php?sn=381424> (дата звернення: 12.11.2022).
3. Clarke A. Understanding CVT and powershift transmissions when buying a tractor [Electronic resource]. *Farmers Weekly.* – Mode of access: <https://www.fwi.co.uk/machinery/tractors/understanding-cvt-and-powershift-transmissions-when-buying-a-tractor> (reference date: 12.11.2022).
4. Power shuttle [Електронний ресурс]. *Wikipedia.* – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_shuttle (дата звернення: 12.11.2022).
5. Moon S.P., Moon S.G., Kim J.S., Sohn J.H., Kim Y.J., Kim S.C. Transmission Efficiency of Dual-clutch Transmission in Agricultural Tractors. *Journal of Drive and Control.* 2022. Vol. 19, №. 1, P. 43 – 50. <https://doi.org/10.7839/KSFC.2022.19.1.043>
6. Galvagno E., Velardocchia M., Vigliani A. Dynamic and kinematic model of a dual clutch transmission. *Mechanism and Machine Theory.* 2011. Vol. 46, № 6, P. 794 – 805. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.01.013>

7. Mattetti M., Michielan E., Mantovani G., Varani M. Objective evaluation of gearshift process of agricultural tractors. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 224, 2022, P. 324 – 335, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.11.001>
8. QUADRISHIFT and HEXASHIFT [Електронний ресурс]. *Claas*. – Режим доступу: <https://www.claas.co.uk/products/tractors/arion400-2021/engine-drivetrain-2021/quadrishift-and-hexashift-/2491392> (дата звернення: 12.11.2022).
9. DirectDrive [Електронний ресурс]. *John Deere*. – Режим доступу: https://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/en_NA/tractors/2013/feature/transmissions/6r/directdrive_transmission.html (дата звернення: 12.11.2022).
10. Massey Ferguson MF 8S-Serie führt eine neue Ära praktischer, zuverlässiger und vernetzter Traktoren ein [Електронний ресурс]. *Massey Ferguson*. – Режим доступу: https://www.masseyferguson.com/de_de/discover-mf/news/news/mf-8s-series-introduces-new-era-tractors.html (дата звернення: 12.11.2022).
11. Gilbert B. History of IVT/CVT Transmissions [Electronic resource]. *Prezi*. – Mode of access: <https://prezi.com/dszmene31xp7/history-of-ivtcvt-transmissions/> (reference date: 12.11.2022).
12. Кожушко А.П. Результати моделювання роботи колісного трактора з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями, що працюють по схемі «диференціал на вході». *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: Науковий журнал*. 2015. №1 (3). С. 93 – 102.
13. Кожушко А.П. Особливості роботи колісних тракторів з гідрооб'ємно-механічними трансмісіями. *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.* 2015. №31. С. 70 – 82.
14. Samorodov V., Kozhushko A., Pelipenko E. Formation of a rational change in controlling continuously variable transmission at the stages of a tractor's acceleration and braking. *Eastern-European Joournal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4/7 (82). P. 37 – 44. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75402
15. Samorodov V., Pelipenko E. Analysis of the development modern transmission wheeled tractors. *International Collection of scientific proceedings*. 2016. Vol. 6 (13). P. 49 – 57.
16. Our Products [Електронний ресурс]. *Case IH*. – Режим доступу: <https://www.caseih.com/emea/en-gb/home> (дата звернення: 16.11.2022).
17. CLAAS Group [Електронний ресурс]. *Claas*. – Режим доступу: <https://www.claas-group.com/> (дата звернення: 16.11.2022).
18. Tractors [Електронний ресурс]. *Deutz-Fahr*. – Режим доступу: <https://www.deutz-fahr.com/en-us/tractors> (дата звернення: 16.11.2022).
19. Traktoren von Fendt [Електронний ресурс]. *Fendt*. – Режим доступу: <https://www.fendt.com/de/traktoren> (дата звернення: 16.11.2022).
20. Tractors [Електронний ресурс]. *John Deere*. – Режим доступу: <https://www.deere.com/en/tractors/> (дата звернення: 16.11.2022).
21. Our Product Range [Електронний ресурс]. *Massey Ferguson*. – Режим доступу: <https://www.masseyferguson.com/en.html> (дата звернення: 16.11.2022).
22. Tractors & Telehandlers [Електронний ресурс]. *New Holland*. – Режим доступу: <https://agriculture.newholland.com/eu/en-uk?market=uk> (дата звернення: 16.11.2022).
23. TRACTORS [Електронний ресурс]. *Steyr Traktoren*. – Режим доступу: <https://www.steyr-traktoren.com/en-distributor/agriculture/produkte/traktoren> (дата звернення: 16.11.2022).
24. VALTRA TRACTOR RANGE [Електронний ресурс]. *Valtra*. – Режим доступу: <https://www.valtra.com/> (дата звернення: 16.11.2022).
25. Weymann S. Electric drivelines for tractors and agricultural machinery. Part 2. *Agricultural, Horticultural and Forest Engineering*. 2016, 61(5), P. 8 – 10.
26. Pessina D., Facchinetti D. Gemelli diversi. *Macchine Agricole*. 2009. № 7. P. 44 – 51. – Mode of access: http://www.researchgate.net/publication/303142160_Gemelli_diversi (reference date: 17.11.2022).
27. Krah J.O., Sobotzik J., Hambloch M. Tractor/implement electrification: Opportunities and challenges. *EtherCat in Mobile Applications*. 2013. 21 p. – Mode of access: https://www.ethercat.org/2013/mobile_applications/files/03_ethercat_mobile_app_johndeere.pdf (reference date: 17.11.2022).
28. STEYR unveils innovations to its Hybrid Drivetrain Konzept [Електронний ресурс]. *Driving Technology News*. – Режим доступу: <https://drivingtechnology.news/steyr-hybrid-drivetrain-konzept/> (дата звернення: 17.11.2022).
29. Auer M., Igl S., Grad K. Visions on electric drive components for implements and trailers. *29th Members Meeting*. 2019. 11 p.
30. Przekładnia John Deere eAutoPowr. Jak działa i jakie ma zalety? [Електронний ресурс]. *FARMER.pl*. – Режим доступу: <https://www.farmer.pl/technika-rolnicza/maszyny-rolnicze/przekladnia-john-deere-eautopowr-jak-dziala-i-jakie-ma-zalety,117607.html> (дата звернення: 17.11.2022).
31. Tetzlaff S. System-wide electrification and appropriate functions of tractor and implement. *Landtechnik*. 2015. № 70(5), P. 203 – 216. <http://doi.org/10.15150/lt.2015.2676>.
32. Caban J., Zarajczyk J., Szmigielski M. [et al.] Hybrid drive as a future in agricultural technology. *Proceedings of the Institute of Vehicles*. 2018, № 3(177), P. 19 – 27.

33. Kalociński T. Modern trends in development of alternative powertrain systems for non-road machinery. *Combustion Engines*. 2022, № 188(1), P. 42 – 54. <https://doi.org/10.19206/CE-141358>.
34. Mocera F., Somà A. A Review of Hybrid Electric Architectures in Construction, Handling and Agriculture Machines. *New Perspectives on Electric Vehicles*. 2022. <http://doi.org/10.5772/intechopen.99132>.
35. Самородов В.Б., Краснокутський В.М., Ткачов В.Ю. Розвиток електротракторів в Україні. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Автомобіле- та тракторобудування*. 2020. № 2. С. 19 – 23.
36. Самородов В.Б., Краснокутський В.М., Ткачов В.Ю. Метод вибору акумуляторної батареї для електротракторів. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. 29-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2021. 2021. – С. 161.

References (transliterated):

1. Samorodov V., Bondarenko A., Kozhushko A., Pelypenko E., Mittsel M. Perspektyvni transmisii kolisnykh traktoriv [Prospective transmissions of wheeled tractors]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automobile and tractor building]*. Kharkiv, NTU "KhPI". 2014. no 10 (1053). pp. 3 – 10.
2. 16x16 Semi-PowerShift (SPS) Transmission [Electronic resource]. *Boothel Tractor Parts*. URL: <https://www.bootheltractorparts.com/mobile/view-part.php?sn=381424> (accessed: 12.11.2022).
3. Clarke A. Understanding CVT and powershift transmissions when buying a tractor [Electronic resource]. *Farmers Weekly*. URL: <https://www.fwi.co.uk/machinery/tractors/understanding-cvt-and-powershift-transmissions-when-buying-a-tractor> (accessed: 12.11.2022).
4. Power shuttle [Electronic resource]. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Power_shuttle (accessed: 12.11.2022).
5. Moon S.P., Moon S.G., Kim J.S., Sohn J.H., Kim Y.J., Kim S.C. Transmission Efficiency of Dual-clutch Transmission in Agricultural Tractors. *Journal of Drive and Control*. 2022. Vol. 19, №. 1, P. 43 – 50. <https://doi.org/10.7839/KSFC.2022.19.1.043>
6. Galvagno E., Velardocchia M., Vigliani A. Dynamic and kinematic model of a dual clutch transmission. *Mechanism and Machine Theory*. 2011. Vol. 46, № 6, P. 794 – 805. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.01.013>
7. Mattetti M., Michielan E., Mantovani G., Varani M. Objective evaluation of gearshift process of agricultural tractors. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 224, 2022, P. 324 – 335, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.11.001>
8. QUADRISHIFT and HEXASHIFT [Electronic resource]. *Claas*. URL: <https://www.claas.co.uk/products/tractors/arion400-2021/engine-drivetrain-2021/quadrishift-and-hexashift-2491392> (accessed: 12.11.2022).
9. DirectDrive [Electronic resource]. *John Deere*. URL: https://salesmanual.deere.com/sales/salesmanual/en_NA/tractors/2013/feature/transmissions/6r/directdrive_transmission.html (accessed: 12.11.2022).
10. Massey Ferguson MF 8S-Serie führt eine neue Ära praktischer, zuverlässiger und vernetzter Traktoren ein [Electronic resource]. *Massey Ferguson*. URL: https://www.masseyferguson.com/de_de/discover-mf/news/news/mf-8s-series-introduces-new-era-tractors.html (accessed: 12.11.2022).
11. Gilbert B. History of IVT/CVT Transmissions [Electronic resource]. *Prezi*. URL: <https://prezi.com/dszmene31xp7/history-of-ivtcvt-transmissions/> (accessed: 12.11.2022).
12. Kozhushko A. Rezultaty modelivannia roboty kolisnoho traktora z hidroobiemno-mekhanichnymy transmissiaymy, shcho pratsiuiut po skhemi «dyferentsial na vkhodi» [The results of modeling the operation of a wheeled tractor with hydraulic-volumetric-mechanical transmissions operating according to the "input differential" scheme]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: Naukovyi zhurnal [Modern technologies in mechanical engineering and transport: Scientific journal]*. 2015. no 1 (3). pp. 93 – 102.
13. Kozhushko A. Osoblyvosti roboty kolisnykh traktoriv z hidroobiemno-mekhanichnymy transmissiaymy [Peculiarities of the operation of wheeled tractors with hydro-volumetric-mechanical transmissions]. *Silskohospodarski mashyny: Zb. nauk. st [Agricultural machines: Coll. of science art]*. 2015. no 31. pp. 70 – 82.
14. Samorodov V., Kozhushko A., Pelipenko E. Formation of a rational change in controlling continuously variable transmission at the stages of a tractor's acceleration and braking. *Eastern-European Joournal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4/7 (82). P. 37 – 44. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75402
15. Samorodov V., Pelipenko E. Analysis of the development modern transmission wheeled tractors. *International Collection of scientific proceedings*. 2016. Vol. 6 (13). P. 49 – 57.
16. Our Products [Electronic resource]. *Case IH*. URL: <https://www.caseih.com/emea/en-gb/home> (accessed: 16.11.2022).
17. CLAAS Group [Electronic resource]. *Claas*. URL: <https://www.claas-group.com/> (accessed: 16.11.2022).
18. Tractors [Electronic resource]. *Deutz-Fahr*. URL: <https://www.deutz-fahr.com/en-us/tractors> (accessed: 16.11.2022).
19. Traktoren von Fendt [Electronic resource]. *Fendt*. URL: <https://www.fendt.com/de/traktoren> (accessed: 16.11.2022).
20. Tractors [Electronic resource]. *John Deere*. URL: <https://www.deere.com/en/tractors/> (accessed: 16.11.2022).

21. Our Product Range [Electronic resource]. Massey Ferguson. URL: <https://www.masseyferguson.com/en.html> (accessed: 16.11.2022).
22. Tractors & Telehandlers [Electronic resource]. New Holland. URL: <https://agriculture.newholland.com/eu/en-uk?market=uk> (accessed: 16.11.2022).
23. TRACTORS [Electronic resource]. Steyr Traktoren. URL: <https://www.steyr-traktoren.com/en-distributor/agriculture/produkte/traktoren> (accessed: 16.11.2022).
24. VALTRA TRACTOR RANGE [Electronic resource]. Valtra. URL: <https://www.valtra.com/> (accessed: 16.11.2022).
25. Weymann S. Electric drivelines for tractors and agricultural machinery. Part 2. Agricultural, Horticultural and Forest Engineering. 2016, 61(5), P. 8 – 10.
26. Pessina D., Facchinetti D. Gemelli diversi. Macchine Agricole. 2009. № 7. P. 44 – 51. URL: http://www.researchgate.net/publication/303142160_Gemelli_diversi (accessed: 17.11.2022).
27. Krah J.O., Sobotzik J., Hambloch M. Tractor/implement electrification: Opportunities and challenges. EtherCat in Mobile Applications. 2013. 21 p. URL: https://www.ethercat.org/2013/mobile_applications/files/03_ethercat_mobile_app_johndeere.pdf (accessed: 17.11.2022).
28. STEYR unveils innovations to its Hybrid Drivetrain Konzept [Electronic resource]. Driving Technology News. URL: <https://drivingtechnology.news/steyr-hybrid-drivetrain-konzept/> (accessed: 17.11.2022).
29. Auer M., Igl S., Grad K. Visions on electric drive components for implements and trailers. 29th Members Meeting. 2019. 11 p.
30. Przekładnia John Deere eAutoPowr. Jak działa i jakie ma zalety? [Electronic resource]. FARMER.pl. URL: <https://www.farmer.pl/technika-rolnicza/maszyny-rolnicze/przekladnia-john-deere-eautopowr-jak-dziala-i-jakie-ma-zalety,117607.html> (accessed: 17.11.2022).
31. Tetzlaff S. System-wide electrification and appropriate functions of tractor and implement. Landtechnik. 2015. № 70(5), P. 203 – 216. <http://doi.org/10.15150/lt.2015.2676>.
32. Caban J., Zarajczyk J., Szmigielski M. [et al.] Hybrid drive as a future in agricultural technology. Proceedings of the Institute of Vehicles. 2018, № 3(177), P. 19 – 27.
33. Kalociński T. Modern trends in development of alternative powertrain systems for non-road machinery. Combustion Engines. 2022, № 188(1), P. 42 – 54. <https://doi.org/10.19206/CE-141358>.
34. Mocera F., Somà A. A Review of Hybrid Electric Architectures in Construction, Handling and Agriculture Machines. New Perspectives on Electric Vehicles. 2022. <http://doi.org/10.5772/intechopen.99132>.
35. Samorodov V., Krasnokutskyi V., Tkachov V. Rozvytok elektrotraktoriv v Ukraini [Development of electric tractors in Ukraine]. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series. : Automobile and tractor construction]. 2020. no 2. pp. 19 – 23.
36. Samorodov V., Krasnokutskyi V., Tkachov V. Metod vyboru akumuliatornoj batarei dlia elektrotraktoriv [The method of choosing a battery for electric tractors]. Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dop. 29-yi mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2021 [Information technologies: science, engineering, technology, education, health: theses add. 29th International science and practice conf. MicroCAD-2021]. 2021. – 161 p.

Надійшла (received): 10.12.2022 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

Даниленко Віталій Дмитрович (Vitalii Danilenko) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2787-3947>; e-mail: vitalii.ddanilenko@gmail.com

Селевич Сергій Геннадійович (Sergey Selevich) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- і тракторобудування, м. Харків, Україна; e-mail: ntu.kpi.at@gmail.com