

A. I. БОНДАРЕНКО**СУЧАСНІ ГІДРОБ'ЄМНО-МЕХАНІЧНІ ТРАНСМІСІЇ В ТРАКТОРОБУДУВАННІ**

В статті встановлено, що двопотокові гідрооб'ємно-механічні трансмісії (ГОМТ) представляють зараз єдиний вид безступінчастих передач, якими серійно обладнуються сільськогосподарські трактори. ГОМТ мають наступні переваги: можуть замінити не тільки ступінчасту механічну коробку передач, але і всю трансмісію машини разом зі зчепленням (головним фрикціоном), причому для самохідних машин типу трактор, бульдозер, навантажувач і тому подібне забезпечується перемиканням швидкісних піддіапазонів без зупинки при русі машини, без розриву потоку потужності; підвищують керованість самохідної машини в порівнянні з механічною ступінчастою трансмісією, оскільки дають можливість змінювати в широких інтервалах тягове зусилля на ведучих колесах машини при достатньо малих, прийнятних для водія зусиллях на органах керування; забезпечують плавне регулювання передавального відношення від двигуна до ведучих коліс, тобто безступінчасте регулювання швидкості, що істотно підвищує рухливість і ергономічність мобільних машин; безступінчасте регулювання ГОМТ сприяє якнайкращій адаптації самохідної машини до виконання заданого технологічного процесу і підтримки його стабільності. При цьому конструкції ГОМТ розвиваються у бік збільшення частини потужності, що передається механічним шляхом і зменшення числа фрикційних багатодискових муфт, відповідно зменшення кількості діапазонів (піддіапазонів) і складних механічних частин. Перспективним з точки зору підвищення не тільки рівня безпеки дорожнього руху, а й технічного рівня колісних тракторів з ГОМТ є: відмова від використання перемикання з піддіапазона на піддіапазон, оскільки перемикання може супроводжуватися стрибкоподібною зміною тиску робочої рідини, що призводить до ударних режимів в ГОП і зниженню її ресурсу, крім того, покриття всього діапазону швидкості за рахунок зміни лише відносного параметру регулювання ГОП призводить до суттєвого спрощення конструкції трансмісії; запобігання циркуляції потужності у замкнутому контурі ГОМТ при виконанні основних технологічних операцій; підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) трансмісії; зниження навантаження як на гідравлічну (гідромашину), так і елементи механічної (планетарний ряд (ПР) та зчеплення) частини ГОМТ в процесі гальмування.

Ключові слова: гідрооб'ємно-механічна трансмісія, трактор, безступінчаста трансмісія, піддіапазон, гідрооб'ємна передача.

A. И. БОНДАРЕНКО**СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРООБЪЕМНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ТРАНСМИССИИ В ТРАКТОРОСТРОЕНИИ**

В статье установлено, что двухпоточные гидрообъемно-механические трансмиссии (ГОМТ) представляют сейчас единственный вид бесступенчатых передач, которыми серийно оборудуются сельскохозяйственные тракторы. ГОМТ имеют следующие преимущества: могут заменить не только ступенчатую механическую коробку передач, но и всю трансмиссию машины вместе со сцеплением (главным фрикционом), причем для самоходных машин типа трактор, бульдозер, погрузчик и т.п. обеспечивается переключение скоростных поддиапазонов без остановки при движении машины, без разрыва потока мощности; повышают управляемость самоходной машины по сравнению с механической ступенчатой трансмиссией, поскольку дают возможность изменять в широких интервалах тяговое усилие на ведущих колесах машины при достаточно малых, приемлемых для водителя усилиях на органах управления; обеспечивают плавное регулирование передаточного отношения от двигателя к ведущим колесам, то есть бесступенчатое регулирование скорости, что существенно повышает подвижность и эргономичность мобильных машин; бесступенчатое регулирование ГОМТ способствует наилучшей адаптации самоходной машины для выполнения заданного технологического процесса и поддержания его стабильности. При этом конструкции ГОМТ развиваются в сторону увеличения части мощности, передаваемой механическим путем и уменьшение числа фрикционных многодисковых муфт, соответственно уменьшения количества диапазонов (поддиапазонов) и сложных механических частей. Перспективным с точки зрения повышения не только уровня безопасности дорожного движения, но и технического уровня тракторов с ГОМТ являются: отказ от использования переключения с поддиапазона на поддиапазон, поскольку переключение может сопровождаться скачкообразным изменением давления рабочей жидкости, что приводит к ударным режимам в ГОП и снижению ее ресурса, кроме того, покрытие всего диапазона скорости за счет изменения только относительного параметра регулирования ГОП приводит к существенному упрощению конструкции трансмиссии; предотвращения циркуляции мощности в замкнутом контуре ГОМТ при выполнении основных технологических операций; повышению коэффициента полезного действия (КПД) трансмиссии; снижению нагрузки как на гидравлическую (гидромашины), так и элементы механической (планетарный ряд (ПР) и сцепление) части ГОМТ в процессе торможения.

Ключевые слова: гидрообъемно-механическая трансмиссия, трактор, бесступенчатая трансмиссия, поддиапазон, гидрообъемная передача.

A.I. BONDARENKO**MODERN HYDRAULIC-MECHANICAL TRANSMISSIONS IN TRACTORING**

In the article, it is established that two-stream hydro-mechanical transmissions (GOMT) represent now the only kind of stepless gears, which are serially equipped with agricultural tractors. GOMTs have the following advantages: they can replace not only a stepped mechanical gearbox, but also the entire transmission of the machine together with the clutch (main friction), and for self-propelled machines such as a tractor, bulldozer, forklift and the like provides for switching high-speed sub-bands of the machine without gears. without breaking the power flow; increase the controllability of the self-propelled machine compared to the mechanical stepped transmission, as they make it possible to change the tractive effort on the drive wheels of the machine at wide intervals at sufficiently small, driver-friendly efforts on the controls; provide smooth regulation of the gear ratio from the engine to the drive wheels, ie continuously variable speed control, which significantly increases the mobility and ergonomics of mobile cars; the continuous control of the GOMT contributes to the best adaptation of the self-propelled machine to the desired technological process and to maintain its stability. In this case, the GOMT designs evolve toward an increase in the part of the power transmitted mechanically and a decrease in the number of friction multi-disc couplings, respectively, a decrease in the number of ranges (subbands) and complex mechanical parts. Promising from the point of view of increasing not only the level of road safety, but also the technical level of wheeled tractors with GOMT is: refusal to use the switch from subband to subband, since switching can be accompanied by a sudden change in the pressure of the working fluid, which leads to shock modes and reduced operating conditions its resource, in addition, the coverage of the entire speed range by changing only the relative parameter of the GOP regulation leads to a significant simplification of the transmission design; preventing the circulation of power in a closed-loop GOMT during the execution of basic technological operations; increasing the efficiency of the transmission (efficiency); reducing the load on both the hydraulic (hydro machine) and mechanical (planetary row (clutch) and clutch) elements of the GOMT during braking.

Keywords: hydro-mechanical transmission, tractor, stepless transmission, sub-range, hydraulic transmission.

Вступ. Агропромисловий комплекс є одним із найважливіших секторів економіки України, від рівня розвитку і стабільності функціонування якого залежить продовольча безпека країни. Постійне збільшення обсягів виробництва сільськогосподарської продукції, різкі коливання в потребі транспорту протягом року є передумовами зростання використання колісних тракторів в сільському господарстві. Прагнення до безступінчастого регулювання швидкості та тягового зусилля, підвищення ергономічних властивостей при виконанні різноманітних технологічних операцій стало головною причиною збільшення обсягу виробництва колісних сільськогосподарських тракторів з ГОМТ у світі.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. У переважній більшості розглянутих робіт автори пропонують структуру, основні конструктивні параметри двопотокових ГОМТ та формулюють рекомендації стосовно вибору способу реалізації службового та екстреного гальмування колісних тракторів з безступінчастими трансмісіями, орієнтуючись лише на особистий конструкторський досвід та керуючись евристичним методом. Наявність кількісних та якісних закономірностей зміни кінематичних, силових та енергетичних параметрів ГОМТ дозволила б не тільки знизити час на розробку ГОМТ, а й суттєво підвищити ефективність трансмісій ще на стадії проектування колісних тракторів [1-12].

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є дослідження сучасних ГОМТ в тракторобудуванні та визначення напрямків для подальшого їх розвитку.

Сучасні ГОМТ в тракторобудуванні. ГОМТ мають наступні переваги:

- можуть замінити не тільки ступінчасту механічну коробку передач, але і всю трансмісію машини разом зі зчепленням (головним фрикціоном), причому для самохідних машин типу трактор, бульдозер, навантажувач і тому подібне забезпечується перемиканням швидкісних піддіапазонів без зупинки при русі машини, без розриву потоку потужності;

- підвищують керованість самохідної машини в порівнянні з механічною ступінчастою трансмісією, оскільки дають можливість змінювати в широких інтервалах тягове зусилля на ведучих колесах машини при достатньо малих, прийнятних для водія зусиллях на органах керування;

- забезпечують плавне регулювання передавального відношення від двигуна до ведучих коліс, тобто безступінчасте регулювання швидкості, що істотно підвищує рухливість і ергономічність мобільних машин;

- безступінчасте регулювання ГОМТ сприяє якнайкращій адаптації самохідної машини до виконання заданого технологічного процесу і підтримки його стабільності;

- ГОМТ, які володіють властивістю реверсу, забезпечують перехід з руху вперед до руху заднім

ходом без зупинки і перемикання передач, що дуже важливе з погляду забезпечення технологічних робочих процесів для ряду видів транспортних засобів (бульдозерів, лісотехнічних тракторів, навантажувачів, грейдерів землерийних машин, машин спеціального призначення і так далі);

- ГОМТ бортового виконання забезпечують поворот самохідної машини на місці з нульовим радіусом, що є надзвичайно важливим функціональним видом руху для ряду машин;

- сприяють підвищенню надійності роботи двигуна завдяки демпфуючим властивостям робочої рідини гідропередачі (за рахунок певного відсотка газозмісту і витоків в щільних ущільненнях), внаслідок чого усувається жорсткий кінематичний зв'язок ведучих коліс машини з двигуном;

- забезпечують кращу тягову динаміку самохідної машини в порівнянні зі ступінчастими механічними трансмісіями, оскільки дають можливість на основі відповідного вибору регульованих характеристик максимально завантажити двигун і підтримувати його максимальну активну потужність;

- при раціональному виборі регульованих характеристик ГОМТ двигун може працювати в режимі максимальної потужності або мінімальної витрати палива у всьому швидкісному діапазоні самохідної машини;

- ГОМТ значно легше автоматизуються в порівнянні зі ступінчастими механічними трансмісіями, що спрощує керування самохідною машиною та дозволяє забезпечити найбільш раціональні режими роботи двигуна відповідно заданого технологічного процесу;

- підвищують середню швидкість руху по бездоріжжю за рахунок кращого використання потужності двигуна.

До основних недоліків ГОМТ відноситься:

- нижчий ККД в порівнянні зі ступінчастими механічними трансмісіями – в сучасних конструкціях ГОМТ їх ККД на 3 – 5% нижче;

- при перемиканні з піддіапазона на піддіапазон в контурі, в якому розташована гідропередача, може стрибкоподібно змінюватися тиск робочої рідини, що призводить до ударних режимів в ГОП і зниженню її ресурсу;

- при гальмуванні зі швидкості, як правило 15 км/год та більше, і некоректному виборі способу гальмування та інтенсивності зміни параметрів регулювання ГОП спостерігається не тільки стрибкоподібна зміна тиску робочої рідини в ГОП, а також різке збільшення значень кутових швидкостей ланок ГОМТ, що супроводжується перевантаженням як ГОП, так і ПР та зчеплення;

- робочі режими з циркуляцією потужності призводять до відносно великих втрат і тепловиділення, можуть бути небажаними з погляду міцності та надійності елементів трансмісії;

- вельми чутливі до температури навколишнього середовища, оскільки в'язкість робочої рідини істотно змінюється з температурою і,

як при низьких, так і при високих температурах можуть погіршуватися технічні характеристики трансмісії;

- із-за різниці навантажень на ведучих колесах самохідної машини з ГОМТ бортового виконання, а також із-за різниці робочих зазорів в ГОП таких ГОМТ, спостерігається шкідливе явище відхилення від прямолінійного заданого курсу, що без відповідної автоматичної системи курсової корекції підвищує психофізіологічне навантаження на оператора-водія;

- реверсивні ГОМТ з першим повнопотоковим діапазоном не забезпечують, як правило, достатнього динамічного чинника транспортній машині із-за виходу тиску навантаження в ГОП на клапанний режим; при цьому підвищення робочого об'єму ГОП, яке сприяє усуненню цього недоліку, погіршує габаритні і масові показники ГОМТ в цілому;

- необхідність використовувати якісні робочі рідини з високим ступенем чистоти;

- необхідність застосування узгоджувальних редукторів між двигуном і насосами, а також між гідромоторами і колесами;

- підвищений шум при роботі на високому тиску і при високій частоті обертання (високочастотні коливання робочої рідини);

- необхідна відносно висока кваліфікація персоналу для проведення технічного обслуговування при експлуатації самохідних машин з ГОМТ;

- вища вартість і складність виготовлення за рахунок, як правило, застосування гідромашин великого робочого об'єму.

Проте, застосування уніфікованих складальних одиниць (насосів, гідромоторів, гідроциліндрів і так далі), організація їх масового виробництва дозволяють знизити собівартість ГОМТ. Тому зараз такі всесвітньо відомі транснаціональні корпорації як «CNH», «AGCO», «SDF», а також компанії «John Deere» і «Claas» переходять на масовий випуск тракторів з ГОМТ.

У світовій практиці ГОМТ знайшли застосування на тих самохідних машинах, де механічні передачі не здатні ефективно і раціонально вирішувати завдання підведення і трансформації по заданих законах потужності від двигуна до робочих органів або рушіїв машини.

Також ГОМТ застосовуються на сільськогосподарських машинах: зернозбиральних (роторийний комбайн Case 2388 Axial Flow, комбайни серії Vector, Claas Lexion 450 та ін.) і кормозбиральних комбайнах (ПН-450, DON 680M, RSM 1401, RSM 1701 та ін.), сільськогосподарських і промислових колісних та гусеничних тракторах (малогабаритний трактор Iseki TXG23, малогабаритний трактор Iseki TH4260, трактор Gianni Ferrari PG230 4 H, Четра-11C, Четра-11.01KC, Husqvarna CTH 220 Twin, Fendt серії Vario, John Deere 8530, John Deere серії 8000RT, Challenger MT 665B, Massey Ferguson 8480, Puma CVX та ін.).

Провідними виробниками гідрообладнання для самохідних машин з ГОМТ є фірми: «Bosch-Rexroth», «Sauer-Danfoss», «Eaton Hydraulics» («Vickers», «Aeroquip», «Boston», «Char-Lynn», «Eaton», «Hydro-Line» і «Weatherhead»), «Plessey», «Denison Hydraulics», «Linde» та ін.

ГОМТ підрозділяються на повнопотокові, коли вся потужність двигуна передається гідравлічним шляхом, і двопотокові (з диференціалами на вході, виході, зі змінною (різною) структурою), де менша частина потоку потужності (20 – 50%) передається гідравлічним шляхом, а решта частини (зазвичай більша) – механічним шляхом.

Однією з головних переваг повнопотокової ГОМТ є можливість підведення роздільно-регульованого (по будь-якому закону) потоку потужності індивідуально до кожного колеса або елемента рушіїв, незалежно від його відстані від живлячої установки і положення в просторі.

Перші тракторні трансмісії були механічні, ступінчасті з обмеженими узгоджувальними функціями – вузьким діапазоном швидкісного регулювання та мінімальними функціями відбору потужності. Розвивалися вони в напрямках збільшення діапазонів ступеневого регулювання, числа передач, забезпечення одночасної роботи приводів рушіїв та відбору потужності, збільшення числа місць відбору потужності, застосування 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). У результаті з'явилися нові типи трансмісії, що класифікуються за способом регулювання (безступінчасті, ступінчасто-безступінчасті) і виду носіїв енергії (механічні, гідромеханічні, електромеханічні).

В умовах ринкової економіки вибір оптимального типу трансмісії для тракторів різних потужностей, призначення і конкретних умов експлуатації визначається споживачем незалежно від пропозицій фірм-виробників. Тому всі тракторобудівні фірми прагнуть встановлювати на своїй продукції трансмісії таких типів і пропонувати такі їх альтернативні варіанти, які мають попит у споживача на ринку конкретного регіону. При цьому враховуються не тільки кон'юнктура ринку і пропозиції фірм-конкурентів, але і напрями господарської діяльності, природно-кліматичні, законодавчі (що стосуються, зокрема, обмежень транспортних швидкостей) та інші особливості цих країн, а також можлива платоспроможність потенційного споживача.

За останні десять років відбулося злиття низки виробників сільськогосподарської техніки в великі концерни («CNH», «AGCO», «SDF»). Така структурна реорганізація дозволила фінансувати масштабні дослідницькі проекти і запропонувати не окремі машини, а комплекс аграрних технологій для

конкретних споживачів і регіонів. Паралельно йде процес постійного нарощування можливостей електронних компонентів з одночасним їх здешевленням. Наявність цих чинників дозволила провідним тракторним фірмам здійснювати перехід від механічних до мехатронних систем на тракторах, збільшуючи продуктивність машинно-тракторних агрегатів і покращуючи умови праці оператора.

В даний час спостерігаються дві тенденції у сфері виробництва тракторів. Перша – розробка і виробництво власних оригінальних безступінчастих трансмісій, друга – це адаптація готових трансмісій під необхідне конструювання трактора.

Концерн «CNH» зусиллями фахівців своїх підрозділів «Case IH», «New Holland» і «Steyr» створив власне виробництво безступінчастих трансмісій, виділивши два напрями для роботи: розробка трансмісій EasyDrive з ланцюговим механічним варіатором для тракторів потужністю до 85 кВт (версія для тракторів потужністю 30 – 37 кВт вже запущена у виробництво і встановлюється на трактори New Holland серії 3000 Boomer) і розробка трансмісії з гідростатичним модулем для тракторів потужністю 110 – 185 кВт. Остання отримала назву Auto Command та покликана замінити встановлювану на тракторах концерну трансмісію S-Matic, що виробляється фірмою «ZF».

Компанія «John Deere» має три безступінчасті коробки передач для різних потужностних діапазонів. Серії 6030 Premium і 7030 Premium потужністю 95 – 123 кВт і 131 – 144 кВт, відповідно, оснащуються коробками передач Ессом виробництва «ZF». У той же час зібрані в США трактори серії 7030 оснащуються безступінчастою коробкою власного виробництва з подвійним зчепленням для плавного перемикання між чотирма діапазонами. Трактори серії 8030 потужністю 180 – 265 кВт виділені в серію 8R та комплектуються трансмісією власного виробництва Auto Powr.

Фірма «Fendt» – єдина на сьогоднішній день фірма, що відмовилася від виробництва ступінчастих коробок перемикання передач. Весь модельний ряд тракторів цієї фірми оснащується безступінчастими двопотоковими трансмісіями Vario. Трансмісія, представлена фірмою «Fendt» ще в 1996 р., залишається єдиною, у якій зміна швидкості в діапазоні 0 – 60 км/год забезпечується тільки за рахунок гідравлічної складової потоку потужності, що можливо за рахунок використання спеціально розроблених спільно з фірмою «Sauer Danfoss» аксіально-поршневих гідромашин з кутами нахилу 45° в обидва боки. Трансмісія має декілька виконань для застосування на тракторах різних потужностей і призначень, включаючи і однодіапазонну коробку для тракторів малої потужності.

Всі трансмісії тракторів Fendt потужністю 100 кВт і більше характеризуються сумісним керуванням двигуна і трансмісії завдяки оригінальному програмному забезпеченню і можуть керуватися тільки однією педаллю. Трансмісії Vario

виробляють на заводі концерну «AGCO» в Бельгії і встановлюються на трактори всіх марок, що входять в концерн «AGCO» («Massey Fergusson», «Fendt», «Valtra» і «Challenger»).

З незалежних виробників безступінчастих трансмісій варто виділити фірму «ZF», що виробляє декілька модельних рядів безступінчастих трансмісій для сільськогосподарських тракторів:

- трансмісії Ессом серії 1,5; 1,8; 2,0 для тракторів з двигунами потужністю 74 – 155 кВт;

- трансмісії Ессом серії 2,4; 2,9; для тракторів з двигунами потужністю 147 – 220 кВт;

- трансмісії Ессом серії 3,0 і 3,5 для тракторів рамної конструкції з двигунами потужністю 220 – 295 кВт;

- нові трансмісії Ессом 4,5 та Ессом 5,0 на передачу потужності до 480 кВт. Першою фірмою, що встановила трансмісію Ессом 5,0 на універсальний тягово-енергетичний засіб Xerion потужністю 355 кВт і 385 кВт, що має рамну конструкцію і однакові колеса, стала компанія «Claas». Також трансмісія встановлена на прототип трактора Terrion ATM класичної компоновки потужністю 255 – 295 кВт.

Повна лінійка універсально-просапних тракторів Terrion, а також трактор Terrion ATM 7360 тягового класу 7, потужністю 253 кВт, трансмісією ZF Ессом 5.0, виробництва якого почалося в 2011 р., виготовляється компанією «АгроТехМаш» з штаб-квартирою в Санкт-Петербурзі і заводом в Тамбові.

Безступінчасті трансмісії швейцарської фірми «MALI» представлені двома серіями: WSE для тракторів потужністю до 110 кВт і WSG для тракторів потужністю 118 – 405 кВт. У гідростатичному контурі передачі використані регульовані гідромашини з похилим блоком, що мають максимальний кут повороту 45° в обидва боки, аналогічні машинам «Sauer Danfoss», що використовуються в коробках Vario концерну «AGCO». На дослідному зразку російського трактора Кировець потужністю 315 кВт була вперше встановлена трансмісія фірми «MALI».

Розглянемо більш детально принцип роботи тракторних ГОМТ.

Перше дослідження в області гідростатичної трансмісії було виконано в Національному інституті сільськогосподарського машинобудування Великобританії, де розроблявся прототип на основі гідростатичного керування, який був представлений в 1954 р. Створена гідростатична передача керувалася за допомогою регульованого аксіально-поршневого насоса, що сполучався з радіально-поршневим мотором безпосередньо через трубопроводи.

У 1967 р. в США почав випускатися так званий International Harvester, який мав двигун потужністю 60 кВт та дві регульовані гідромашини, що розташовувалися в одному корпусі. Трансмісія працювала в двох діапазонах. В ході дослідження було виявлено, що робота в двох діапазонах

призвела до кращої ефективності на малих та високих швидкостях трансмісії.

Проект був виконаний, на думку багатьох експертів, на доброму рівні, але гідромашини, що використовувались в гідростатичній трансмісії, створювали високі втрати та високу собівартість порівняно зі ступінчастими трансмісіями.

Як відмічалось раніше, вперше серійне виробництво сільськогосподарських тракторів з двопотоковою ГОМТ почала фірма «Fendt» в 1996 р.. Всі трактори, що випускаються цією фірмою (потужність 51 – 287 кВт) на теперішній час оснащені однією з найбільш оригінальних і ефективних безступінчастих ГОМТ – Fendt Vario. Конструкція трансмісії виконана за схемою з «диференціалом на вході» (рис. 1). Характерна особливість ГОМТ Fendt Vario – використання в тракторах потужністю 85 кВт і більше двох діапазонів швидкостей: робочого та транспортного, а також в деяких трансмісіях двох гідромоторів, що регулюються (рис. 1, б). Перемикання між діапазонами виконується водієм при зупиненому тракторі за допомогою синхронізованих зубчастих муфт.

ККД ГОМТ Fendt Vario лише на 1,5 – 2% гірше, ніж у трактора з механічною трансмісією. На малих швидкостях ККД трансмісії Fendt Vario помітно вище, ніж у конкурентів, хоча у Fendt тут дуже велика частка потужності, що передається гідравлічним шляхом (зменшується від 100% при 0,02 км/год до 0% – при максимальній швидкості). Відносно високий ККД досягається застосуванням спеціально сконструйованих гідромашин фірми «Sauer Danfoss» з кутом нахилу блоку циліндрів до 45°, втрати у яких значно зменшені. На ККД трансмісії Fendt Vario також позитивно впливає простота конструкції механічної частини передачі, в якій використовується всього лише один диференціал.

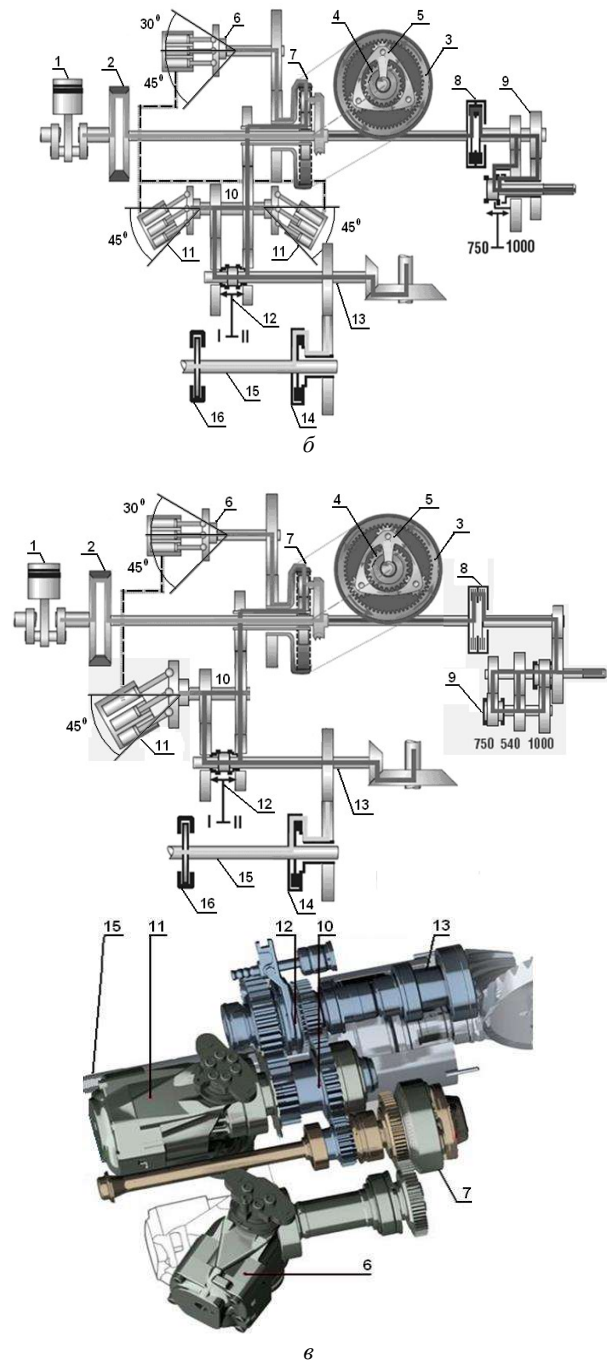
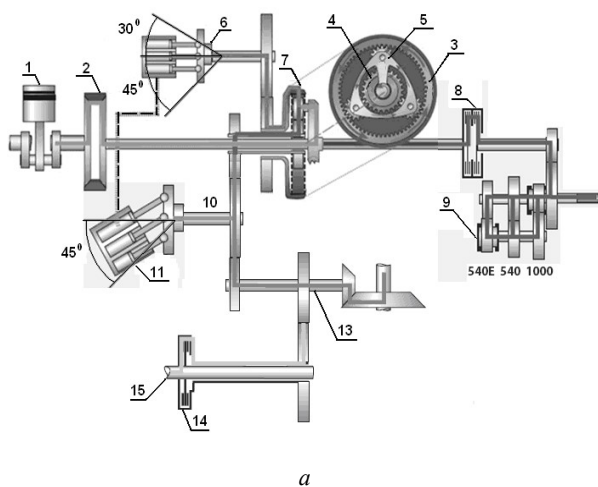


Рис. 1. Функціональна схема трансмісії Fendt Vario: а – потужність двигуна 51 – 92 кВт; б – потужність двигуна 162 – 287 кВт; в – потужність двигуна 85 – 176 кВт; 1 – двигун внутрішнього згоряння; 2 – демпфер крутильних коливань; 3 – коронна шестерня; 4 – сонячна шестерня; 5 – водило; 6 – гідронасос; 7 – ПР; 8 – муфта включення валу відбору потужності; 9 – вал відбору потужності; 10 – вал, на якому відбувається складання потужностей від гідравлічної та механічної гілок; 11 – гідромотор; 12 – муфта перемикання діапазонів руху; 13 – привід на задній міст; 14 – муфта включення приводу переднього моста; 15 – привід на передній міст; 16 – трансмісійний гальмівний механізм

Гідронасос і гідромотор в ГОМТ Fendt виконані регульованими. Рух назад здійснюється зворотним

нахилом блоку насоса, що забезпечує швидкий реверс. При русі назад виникає в ГОМТ циркуляція потужності, що декілька знижує ККД передачі, але при русі заднім ходом це не так важливо.

Фірма «Valtra» на трактори потужністю 90 – 140 кВт серій N і T встановлює трансмісію Direct (рис. 2), що працює за схемою «диференціал на виході» (аналогічно працюють ГОМТ CNH, ZF-Essom і Steyr-S-matic), забезпечує безступінчасте регулювання швидкості в чотирьох діапазонах (коробка передач діапазонів на рис. 1.5 не наведена): 0 – 9 км/год, 0 – 18 км/год, 0 – 30 км/год і 0 – 50 км/год. Перемикачі діапазони можна тільки при зупиненому тракторі, швидкості в діапазонах при русі як вперед, так і назад однакові.

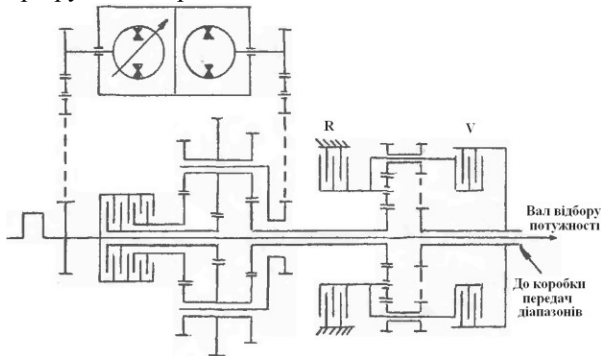


Рис. 2. Кінематична схема трансмісії Direct

Фірма «CNH» розробила нову безступінчасту трансмісію з використанням подвійного зчеплення, яка встановлюється на трактори Puma CVX фірми «Case IH», T7000 Auto Command фірми «New Holland», CVT фірми «Steyr» потужністю 123 – 165 кВт (рис. 3).

Кожне з двох встановлених зчеплень має свій власний вал для передачі потужності, при цьому один вал проходить усередині іншого. Потужність передається по черзі по валах, які використовуються при увімкненні відповідного зчеплення. Одне зі зчеплень підключає непарні передачі, інше – парні. На вільному валу коробки передач здійснюється попередній вибір наступної бажаної передачі і з'єднання відповідного зубчастого колеса з вільним валом коробки передач через синхронізатор. За допомогою одночасного увімкнення і вимкнення зчеплень потужність передається через заздалегідь обрану передачу без розриву потоку потужності. Даний вид коробки вважається найбільш досконалим (для тракторів – із-за зменшення числа фрикційних багатодискових муфт і, відповідно, втрат в них).

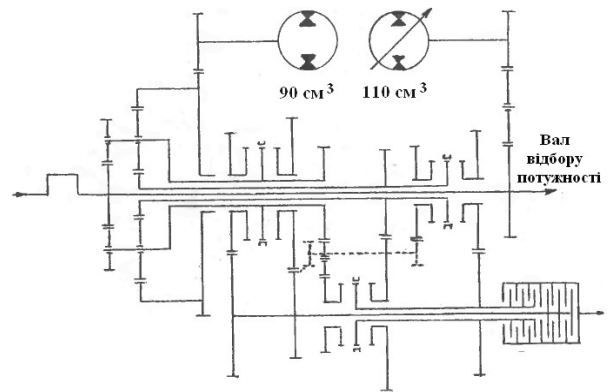
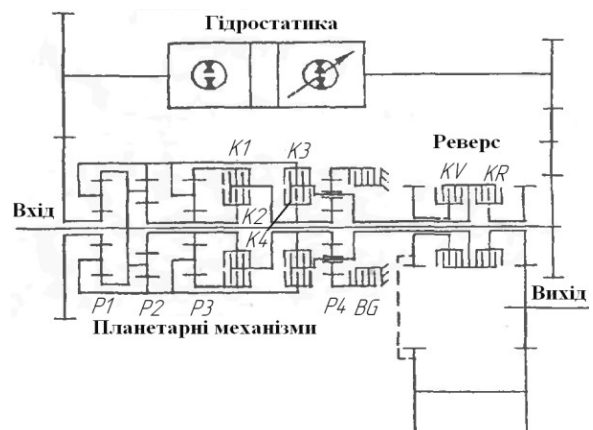


Рис. 3. Кінематична схема трансмісії CNH

У трансмісії CNH подвійне зчеплення розташоване на веденому валу (на відміну від автомобільних коробок передач, де подвійне зчеплення розташовується на ведучому валу). Всього в коробці є чотири передачі переднього ходу, що забезпечують максимальну швидкість 50 км/год і дві передачі заднього ходу (максимальна швидкість 30 км/год).

Безступінчасте регулювання швидкості забезпечується спільною роботою коробки передач і ГОМТ, що складається з диференціала, розташованого на вході трансмісії, і двох гідромашин: регульованого насоса і нерегульованого мотора (обидва виробництва «Bosch-Rexroth»). ГОМТ працює за схемою «диференціал на виході» в чотирьох піддіапазонах на передньому ходу і в двох піддіапазонах на задньому. Тип ГОМТ і число піддіапазонів переднього ходу співпадає з ГОМТ «ZF» – Essom, проте у останньої для перемикачів використовується сім фрикційних багатодискових муфт, а у ГОМТ CNH – тільки дві. Зменшення числа муфт повинне знизити втрати і підвищити ККД трансмісії.

Кінематична схема трансмісії Essom фірми «ZF» наведена на рис. 4. Конструкція механічної частини ГОМТ досить складна (що зумовлює і складніше керування в порівнянні з Fendt): містить чотири диференціали, п'ять фрикційних багатодискових муфт для перемикачів піддіапазонів і дві муфти переднього та заднього ходу. За допомогою останніх виконується швидкий реверс.



Діаграма перемикання

	$V, \text{км/год}$	$K1$	$K2$	$K3$	$K4$	BG	KV	KR	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$
Вперед	0-6	+				+	+		+	+	+	+
	6-12		+			+	+		+	+		+
	12-24		+	+			+		+			
	24-48		+		+		+		+	+		
Назад	0-6	+				+		+	+	+	+	+
	6-12		+			+		+	+	+		+
	12-24		+	+				+	+			
	24-48		+		+			+	+	+		

Рис. 4. Кінематична схема трансмісії ZF Ессом 5.0

Оскільки при перемиканні піддіапазонів потік потужності, що передається, не повинен розриватися, то в точці перемикання спочатку вмикається «нова», вільна від навантаження муфта, тоді як «стара» залишається увімкненою. У цьому стані відбувається спеціальна корекція об'єму регульованої гідромашини і потік навантаження та потужності змінюється, спричиняючи перекладання крутного моменту зі «старої» на «нову» муфту, що вмикається. Після виконаної корекції «стара» муфта звільняється і може бути вимкнена.

Вперше трансмісія Ессом 5.0 була представлена на виставці «Agritechnica - 2007», призначена в першу чергу для тракторів потужністю 260 – 370 кВт, але може використовуватися і в інших областях. Відмінності від попередніх моделей Ессом полягають у вужчій компоновці та в змінній схемі реверсу. Раніше передній хід і реверс виконувалися за допомогою фрикційних муфт KV і KR та шестерень. У Ессом 5.0 ці елементи видалені, у вихідний планетарний ряд $P4$ додані сонячна шестерня (з маленькими сателітами), що поєднана з додатковою фрикційною муфтою BG . При увімкненні муфти BG водило ряду $P4$ (вихід ГОМТ) обертається в прямому напрямі, а при вимкненні (гальмуванні) муфти BG – в зворотному. Зміни привели до того, що Ессом 5.0, в порівнянні з попередніми моделями, має при русі вперед одне додаткове зубчасте зачеплення, а при русі назад – два додаткові зачеплення. Хоча таке рішення може бути викликане конструкторськими міркуваннями, воно погіршує ККД передачі.

Швидкість руху заднім ходом при новій схемі реверсу складає всього 14 км/год. Для досягнення швидкості 50 км/год фірма «ZF» пропонує проміжну компоновку без додаткової сонячної шестерні, проте увімкнення реверсу тоді буде можливе тільки при зупинці.

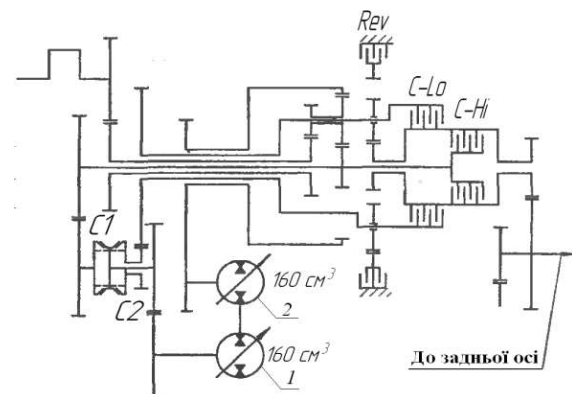
Максимальна швидкість руху тракторів з Ессом 5.0, як і у попередніх моделей Ессом, складає 50 км/год.

У варіанті Ессом 5.0 для російського трактора Terrion ATM 7400 конструкція реверсу змінена, збільшені швидкості переднього ходу до 63 км/год, а заднього – до 56 км/год.

У всіх ГОМТ, виконаних за схемою «диференціал на виході», використовується, як правило, одна регульована і одна нерегульована

гідромашини. Перша й головна перевага такої конструкції полягає в малій установчій потужності гідромашин завдяки використанню декількох піддіапазонів. Так, в ГОМТ S-Matic, Ессом і CNH установча потужність кожної гідромашини складає половину потужності двигуна трактора. На початку кожного піддіапазону така ж потужність циркулює в замкнутому контурі передачі, викликаючи зниження її ККД. Оскільки в кінці піддіапазонів (на другій їх половині) циркуляції потужності немає, то при перемиканні з одного піддіапазону на інший з'являється «стрибок» ККД. Друга перевага ГОМТ такої структури полягає в тому, що в нульових крапках регульовальної характеристики, тобто при відносному параметрі регулювання ГОП $e = 0$ (і в не великій околиці навколо $e = 0$, яка називається «особливою зоною»), вся потужність двигуна передається через механічну частину ГОМТ з високим ККД. ГОМТ, що виконані за схемою «диференціал на виході» проєктуються таким чином, щоб ці нульові крапки ($e = 0$) та «особливі зони» відповідали технологічним швидкостям трактора – саме тоді забезпечується найбільш високий ККД машинно-тракторних агрегатів.

Схеми «диференціал на вході» та «диференціал на виході» знайшли також застосування в ГОМТ зі змінною структурою (рис. 5 – 6). Така структура означає, що в кожному піддіапазоні, на які розбивається весь діапазон ГОМТ, може використовуватися одна з наступних схем: з диференціалом на вході; з диференціалом на виході; з декількома диференціалами.

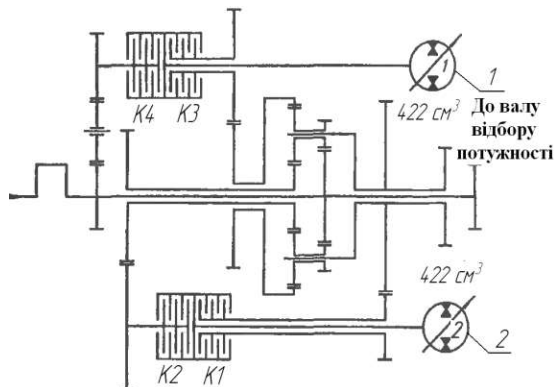


Діаграма перемикання

		$C1$	$C2$	$C-Lo$	$C-Hi$	Rev
Вперед	$M1$	+		+		
	$M2$		+	+		
	$M3$		+		+	
	$M4$	+			+	
Назад	$M1R$	+				+
	$M2R$		+			+

Рис. 5. Кінематична схема трансмісії John Deere Auto Powr 8345R: 1, 2 – гідромашини

ГОМТ змінної структури Auto Powr використовується на тракторі John Deere 8345R (потужність 254 кВт, максимальна експлуатаційна маса 18 тон і швидкість 50 км/год). Вона має чотири швидкісні піддіапазони, для створення яких використовується диференціал, в якому дві ланки, – велика сонячна і коронна шестерні, мають постійні зв'язки, відповідно, з двигуном і гідромашиною 2, а дві інших ланки, – мала сонячна шестерня і водило, мають змінні зв'язки з гідромашиною 1 і виходом ГОМТ. Піддіапазони перемикаються двома зубчастими синхронізованими і двома фрикційними багатодисковими муфтами.



Діаграма перемикання

		K1	K2	K3	K4
Вперед	V1	+	+	+	
	V2		+	+	
	V3		+		+
Назад	R	+			+

Рис. 6. Кінематична схема трансмісії MALI WSG 500:
1, 2 – гідромашини

ГОМТ змінної структури WSG 500 фірми «MALI» (дочірня фірма концерну «Liebherr») призначена для тракторів потужністю 380 кВт і дозволяє досягати швидкості 62 км/год. Відомостей про використання цієї трансмісії на яких-небудь об'єктах поки немає. У ГОМТ WSG 500 застосовані регульовані аксіально-поршневі гідромашини з похилим блоком (кут нахилу до 45°, робочий об'єм до 422 см³) власного виробництва фірми. В даний час це найбільші аксіально-поршневі гідромашини в тракторах ГОМТ.

ГОМТ WSG 500 має три швидкісні піддіапазони, створювані диференціалом, в якому дві ланки, – велика сонячна шестерня і водило, постійно зв'язані, відповідно, з двигуном і виходом ГОМТ, а дві інших ланки, – мала сонячна і коронна шестерні, мають змінні зв'язки з гідромашинами. Перемикання піддіапазонів здійснюються чотирма фрикційними багатодисковими муфтами.

Реверс в WSG 500 виконується за допомогою повнопотокової передачі, в якій гідромашина 2 є насосом, а гідромашина 1 – мотором. При русі заднім ходом трансмісія має найменший ККД.

В 2014 р. компанією «Claas» для тракторів Claas Arion розроблена трансмісія Cmatic (рис. 7) з двома регульованими гідромашинами, де кожна з гідромашин в певний проміжок часу завдяки оригінальній конструкції планетарного та гальмівного механізмів виконує функції як гідронасоса, так і гідромотора. Максимальний ККД трансмісії 0,90 – 0,93, максимальна швидкість трактора 50 км/год.



Рис. 7. Трансмісія Cmatic компанії «Claas»

Висновки.

Використання ГОМТ повнопотокового типу, яке реалізується різними, але в цілому не багаточисельними схемами, не набуло розповсюдження на сільськогосподарських тракторах (із-за невисокого загального ККД трансмісії – 0,50 – 0,75), де, як правило, використовуються двопотокові ГОМТ.

Двопотокові ГОМТ представляють зараз єдиний вид безступінчастих передач, що серійно встановлюються на сільськогосподарських тракторах. Область їх використання росте як по числу моделей тракторів, так і по потужності, що передається. Частка колісних тракторів з ГОМТ у діапазоні потужності двигуна 170 – 250 кВт складає близько 50% від загальної кількості.

Конструкції ГОМТ розвиваються у бік збільшення частини потужності, що передається механічним шляхом і зменшення числа фрикційних багатодискових муфт, відповідно зменшення кількості діапазонів (піддіапазонів) і складних механічних частин.

За результатами аналізу наукових концепцій і тенденцій застосування ГОМТ в тракторобудуванні, встановлено, що незважаючи на достатню розповсюдженість ГОМТ, сучасні конструкції тракторних трансмісій даного типу потребують подальшого удосконалення, зокрема: відмови від використання перемикання з піддіапазона на піддіапазон для унеможливлення виникнення ударних режимів в ГОП; запобігання циркуляції потужності у замкнутому контурі ГОМТ при виконанні трактором основних технологічних операцій; підвищення ККД трансмісії; зниження навантаження як на гідравлічну, так і елементи механічної частини, що дозволить підвищити не тільки технічний рівень тракторів, а й рівень безпеки дорожнього руху при гальмуванні.

Список літератури

1. Bondarenko A.I. Scientific Basis of the Theory of Vehicles Braking With Stepless Hydrostatic Mechanical Transmissions / A.I. Bondarenko // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna (Austria). – 2015. – № 1 – 2. – P. 124 – 127.
2. Самородов В.Б. Безступінчасті гідрооб'ємно-механічні трансмісії як невід'ємний елемент сучасних тракторів / В.Б. Самородов, В.В. Єпіфанов, А.І. Бондаренко // Вісник СевНТУ. – Севастополь: СевНТУ. – 2012. – № 135. – С. 244 – 247.
3. Самородов В.Б. Анализ бесступенчатой трансмиссии тракторов серии Fendt 900 Vario: что скрывается за рекламой? / В.Б. Самородов, А.И. Бондаренко // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 6. – С. 48 – 52.
4. Samorodov V.B. Experimental Appropriateness Verification of K. Gorodetsky's Mathematical Model for Losses Determination in Hydrostatic Transmissions for Modern Hydraulic Machines / V.B. Samorodov, S.A. Shuba, O.I. Derkach, V.M. Shevtzov, N.A. Mittsel // Eastern European Scientific Journal: Düsseldorf (Germany): Auris Verlag. – 2014. – № 6. – P. 285 – 291.
5. Кожушко А.П. Порівняльний аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень робочих процесів у безступінчастих гідрооб'ємно-механічних трансмісіях // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні засади сталого розвитку національного господарства», 21 – 22 листопада 2014 р., м. Кам'янець-Подільський / Міністерство аграрної політики та продовольства України, Подільський державний аграрно-технічний університет. – Кам'янець-Подільський: Подільський державний аграрно-технічний університет, 2014. – С. 181 – 184.
6. Кожушко А.П. Визначення оптимального закону зміни параметрів регулювання гідромашин гідрооб'ємної передачі в процесі розгону колісних тракторів з гідрооб'ємно-механічною трансмісією / А.П. Кожушко // Вісник Сумського національного аграрного університету. – Суми: СНАУ. – 2014. – № 11 (26). – С. 108 – 114.
7. Taran I.O. Substantiating of Rational Law of Hydrostatic Drive Control Parameters While Accelerating of Wheeled Tractors with Hydrostatic and Mechanical Transmission / I.O. Taran, A.P. Kozhushko // Вісник Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. – 2016. – № 6. – С. 70 – 76.
8. Підвищення техніко-економічних показників колісних тракторів з безступінчастими трансмісіями раціональною зміною параметрів регулювання гідромашин в процесі розгону / Андрій Павлович Кожушко / Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2016 р.
9. Самородов В.Б. Уточнення методика определения потерь в планетарных механизмах передач и результаты исследования потоков мощностей в гидрообъемно-механических трансмиссиях / В.Б. Самородов, Д.О. Волонцевич, А.В. Рогов // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2001. – № 4. – С. 76 – 83.
10. Самородов В.Б. Гидрообъемно-механическая трансмиссия гусеничной машины с автономным бесступенчатым управлением в прямолинейном движении и в повороте / В.Б. Самородов, О.Н. Агапов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 64 (970). – С. 3 – 8.
11. Старожук И.А. Влияние типа механизма поворота трактора на напряженность труда тракториста / И.А. Старожук, Г.С. Цейтлина, В.С. Сафронов // Тракторы и сельхозмашины. – 1999. – № 2. – С. 12 – 14.
12. Самородов В.Б. Бесступенчатый механизм поворота гусеничных тракторов ХТЗ / В.Б. Самородов, С.Л. Абдула, С.П. Гудзь, З.Э. Забелышинский // Новости Академии инженерных наук Украины. Инженерные проблемы АПК. – 2006. – № 1(28). – С. 29 – 32.

References (transliterated)

1. Bondarenko A.I. Scientific Basis of the Theory of Vehicles Braking With Stepless Hydrostatic Mechanical Transmissions / A.I. Bondarenko // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna (Austria). – 2015. – № 1 – 2. – P. 124 – 127.
2. Samorodov V.B. Bezstupinchasti gidroob'yemno-mexanichni transmissiyi yak nevid'yemny'j element suchasny'x traktoriv / V.B. Samorodov, V.V. Yepifanov, A.I. Bondarenko // Visnyk SevNTU. – Sevastopol': SevNTU. – 2012. – # 135. – S. 244 – 247.
3. Samorodov V.B. Analiz z besstupenchatoj transmy'ssy'y' traktorov sery'y' Fendt 900 Vario: chto skryvaetsya za reklamoj? / V.B. Samorodov, A.Y'. Bondarenko // Traktory y' sel'xozmashy'ny. – 2012. – # 6. – S. 48 – 52.
4. Samorodov V.B. Experimental Appropriateness Verification of K. Gorodetsky's Mathematical Model for Losses Determination in Hydrostatic Transmissions for Modern Hydraulic Machines / V.B. Samorodov, S.A. Shuba, O.I. Derkach, V.M. Shevtzov, N.A. Mittsel // Eastern European Scientific Journal: Düsseldorf (Germany): Auris Verlag. – 2014. – № 6. – P. 285 – 291.
5. Kozhushko A.P. Porivnyal'ny'j analiz rezul'tativ eksperymental'ny'x ta teorety'chny'x doslidzhen' robochy'x procesiv u bezstupinchasty'x gidroob'yemno-mexanichny'x transmissiyax // Materialy' Mizhnarodnoyi naukovo-prakty'chnoyi konferenciyi «Innovacijni zasady stalogo rozvy'tku nacional'nogo gospodarstva», 21 – 22 ly'stopada 2014 r., m. Kam'yanec'-Podil's'kyj / Ministerstvo agramoyi polity'ky' ta prodovol'stva Ukrainy', Podil's'kyj derzhavny'j agramo-technichny'j universy'tet. – Kam'yanec'-Podil's'kyj: Podil's'kyj derzhavny'j agramo-technichny'j universy'tet, 2014. – S. 181 – 184.
6. Kozhushko A.P. Vy'znachennya opty'mal'nogo zakonu zminy' parametriv reguluyuvannya gidromashy'n gidroob'yemnoyi peredachi v procesi rozgonu kolisny'x traktoriv z gidroob'yemno-mexanichnoyu transmissiyeu / A.P. Kozhushko // Visnyk Sums'kogo nacional'nogo agramo universy'tetu. – Sumy': SNAU. – 2014. – # 11 (26). – S. 108 – 114.
7. Taran I.O. Substantiating of Rational Law of Hydrostatic Drive Control Parameters While Accelerating of Wheeled Tractors with Hydrostatic and Mechanical Transmission / I.O. Taran, A.P. Kozhushko // Вісник Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. – 2016. – № 6. – С. 70 – 76.
8. Pidvy'shennya tekhniko-ekonomichny'x pokazny'kiv kolisny'x traktoriv z bezstupinchasty'my' transmissiyamy' racional'noyu zminoyu parametriv reguluyuvannya gidromashy'n v procesi rozgonu / Andriy Pavlovy'ch Kozhushko / Dy'sertaciya na zdobuttya naukovoogo stupenya kandy'data tekhnichny'x nauk za special'nisty 05.22.02 – avtomobili ta traktory'. – Nacional'ny'j tekhnichny'j universy'tet "Xarkivs'kyj polytexnichny'j insty'tut", Xarkiv, 2016 r.
9. Samorodov V.B. Utochnennaya metody'ka opredeleny'a poter' v planetarny'x mexany'zmax peredach'y' rezul'taty y'ssledovany'a potokov moshhnostej v gy'droob'yemno-mexany'chesky'x transmy'ssy'yax / V.B. Samorodov, D.O. Voloncev'y'ch, A.V. Rogov // Y'integry'rovannyye technology'y' y' energosberezheny'e. – 2001. – # 4. – S. 76 – 83.
10. Samorodov V.B. Gy'droob'yemno-mexany'cheskaya transmy'ssy'ya gusen'y'chnoy mashy'ny s avtonomnym besstupenchatym upravlen'y'em v pryamoly'nejnom vy'zheny'y' y' v povorote / V.B. Samorodov, O.N. Agapov // Visnyk Nacional'nogo tekhnichno universy'tetu «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – # 64 (970). – С. 3 – 8.
11. Starozhuk Y'.A. Vly'yany'e ty'pa mexany'zma povorota traktora na napryazhennost' truda traktory'sta / Y'.A. Starozhuk, G.S. Cejtyl'na, V.S. Safronov // Traktory y' sel'xozmashy'ny. – 1999. – # 2. – S. 12 – 14.
12. Samorodov V.B. Besstupenchatij mexany'zm povorota gusen'y'chny'x traktorov XTZ / V.B. Samorodov, S.L. Abdula, S.P. Gud'z', Z.Э. Zabelyshy'nsky'j // Novosty' Akademiy'y' y'nzhenerny'x nauk Ukrainy'. Y'nzhenerny'e problemy APK. – 2006. – # 1(28). – S. 29 – 32.

Надійшла (received) 01.09.2020

Відомості про авторів / сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Анатолій Ігорович (Bondarenko Anatolii Igorovich) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедр автомобіле- і тракторобудування; м. Харків, Україна; Scopus Author ID 57193723070; ORCID 0000-0001-6861-6942; e-mail: anatoliybon13@gmail.com.