

В. О. Трегубов; О. В. Піонткевич, канд. техн. наук, доц.

ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ТРАНСМІСІЙ МОБІЛЬНИХ РОБОЧИХ МАШИН

У сучасних умовах розвитку машинобудування до мобільних робочих машин висуваються підвищені вимоги щодо енергоефективності, екологічності та надійності. Традиційні механічні трансмісії не завжди здатні забезпечити необхідну гнучкість керування та питому потужність, тому гідравлічні трансмісії залишаються домінуючим рішенням у цьому сегменті. Однак, класичні гідроприводи мають ряд недоліків, які пов'язані з внутрішніми втратами енергії, нагріванням робочої рідини та залежністю від якості технічного обслуговування. Це зумовлює актуальність наукового пошуку нових конструктивних рішень, методів керування та інтеграції гібридних технологій.

У статті проведено аналіз стану обладнання для гідравлічних трансмісій мобільних робочих машин на основі опрацювання наукових публікацій за останні роки та технічної документації провідних світових виробників. Детально розглянуто та порівняно гідравлічні схеми трансмісій. Особливу увагу приділено питанням підвищення коефіцієнту корисної дії за рахунок використання гідроприводів чутливих до навантаження. Проаналізовано ефективність застосування різних алгоритмів керування. Розглянуто переваги та недоліки використання гідравлічних дільників потоку, клапанних рішень та електронних систем керування. Проведено ґрунтовний аналіз ринку компонентів гідроприводу, представленого глобальними технологічними лідерами. Розглянуто необхідність забезпечення високого класу чистоти робочої рідини, контролю температурних режимів для запобігання деградації ущільнень, а також інтеграції інтелектуальних систем керування потоками енергії.

В результаті дослідження сформульовано перелік необхідних вимог до сучасних гідравлічних трансмісій. Визначено, що основним вектором подальшого розвитку галузі є не стільки створення принципово нових конструктивних рішень, скільки вдосконалення алгоритмів керування, гібридизація та мінімізація втрат енергії на всіх етапах її перетворення.

Ключові слова: мобільна робоча машина, гідросхема, гідравлічна трансмісія, гідроапаратура, антибуксувальний пристрій.

Вступ

Гідравлічні трансмісії мобільних робочих машин – це класичне рішення для передачі потужності та керування рухом коліс для будівельної, лісозаготівельної, комунальної чи сільськогосподарської техніки [1, 2, 3]. За останні роки інтерес до гідравлічних трансмісій зберігається, а в певних сегментах ринку суттєво зростає через потребу в енергоефективних гібридних системах [4, 5, 6]. Елементи гідравлічної трансмісії мають хорошу універсальність, гнучке та просте компонування, однак складну структуру внутрішньої будови гідроапаратури [7, 8]. Ринковий аналіз показує актуальність гідравлічних трансмісій, як основи для регенерації енергії за підвищеної точності керування робочими органами [9, 10, 11].

Постановка проблеми

Сучасні мобільні робочі машини характеризуються підвищеними вимогами до енергоефективності, надійності та екологічності, що зумовлює необхідність удосконалення їхніх трансмісійних систем [12, 13]. Традиційні механічні та електромеханічні трансмісії не завжди забезпечують належний рівень продуктивності та маневреності, особливо за умов інтенсивної експлуатації у складних природних умовах. Гідравлічні трансмісії демонструють значні переваги у передачі потужності, можливості плавного регулювання швидкості та створення високих зусиль у компактних габаритах [11, 14]. Разом з тим, вони мають і певні недоліки, зокрема втрати енергії на гідравлічних опорах, залежність від якості робочої рідини та необхідність регулярного технічного обслуговування. Проблема полягає у пошуку

інноваційних конструктивних рішень та обладнання, здатних мінімізувати ці недоліки й водночас посилити переваги гідравлічних трансмісій.

Актуальність дослідження визначається зростаючим попитом на високоефективні та надійні гідравлічні системи у будівельній, транспортній, сільськогосподарській та військовій техніці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розв'язання задачі класифікації систем керування мобільних робочих машин (рис. 1) та напрямки вдосконалення регенерації енергії активно досліджується сучасними науковцями [9]. Серед ключових напрямків досліджень можна виділити сучасний підхід до керування системою гідравлічної трансмісії на базі контролера.

Дослідники з Індії та Данії всебічно проаналізували точність та стабільність гідравлічних трансмісій з надійним керуванням, що ґрунтується на ПІД-регуляторі та робутному Н-невизначеному контролері [10]. Розроблено складну лінеаризовану модель невизначеної системи з використанням верхніх лінійних дробових перетворень. Результати їхнього моделювання показують, що Н-невизначений контролер пропонує кращу продуктивність порівняно з ПІД-регулятором з точки зору стабільності, згасання збурень та стійкості до коливань навантаження. Отримані результати підтверджено експериментально.

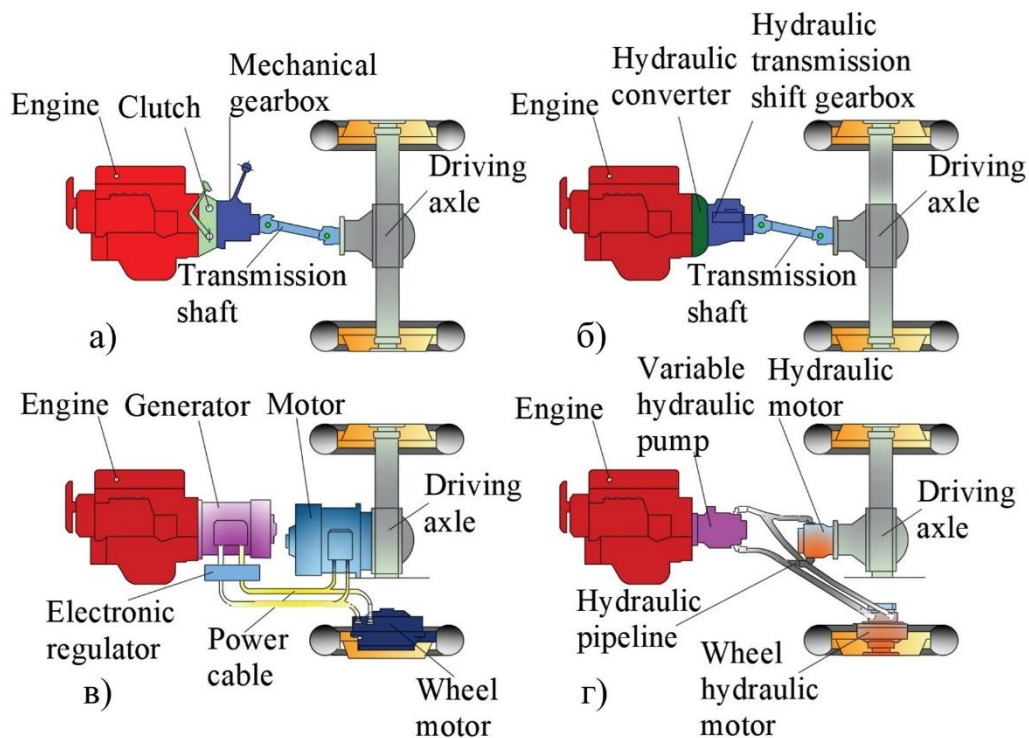


Рис. 1. Чотири типи трансмісій для мобільних робочих машин [9]: а) чисто механічні трансмісії; б) гідродинамічний привід; в) електричні трансмісії; г) гідравлічні трансмісії

Покращення енергетичних характеристик на основі гідравлічних трансмісій досліджено в роботі [11]. Автори розглянули проблеми низької енергоефективності гідравлічних систем порівняно з електричними та механічними аналогами. Вони систематизують методи зменшення втрат енергії та підвищення коефіцієнту корисної дії, класифікуючи їх на чотири основні: гібридизація, алгоритми керування, рекуперація втраченої енергії, зменшення втрат енергії. Отримані результати зведено до таблиці, де чітко прослідковується доцільність використання необхідної гідравлічної схеми відносно потреб: максимальна економія палива, наявність рекуперації за частих гальмувань мобільної машини або потреба в економічному об'ємному керуванні гідроприводом.

Проведено порівняльний аналіз різних підходів до підвищення енергоефективності

електрогідравлічних систем [22]. Автори ставлять акцент на інтеграції різних підходів для максимізації енергоефективності гідроприводу: децентралізований привод із пасивним фіксуванням навантаження, цифрової гідравліки із оптимізованими алгоритмами керування та інші. Реалізація отриманого ефекту досягається за рахунок сучасної гідроапаратури із незалежним керуванням потоками, нової конструкції гідронасосів із керуванням кожного поршня за рахунок електроклапанів, гідроаккумуляторів високого тиску.

Автори роботи [16] провели огляд робіт та досліджень по системі синхронізації руху коліс мобільних робочих машин. В розглянутій статті [17] продемонстровано результати імітаційного та експериментального дослідження впливу обладнання із синхронізацією за складних умов поля з нерівномірним навантаженням на колеса. Результати показують, що гідравлічна схема із двоступеневим керуванням: дільник потоку в парі із електромагнітними пропорційним клапаном дають більш точне регулювання швидкості прямолінійного руху, що становить 0,6 – 1,9 %, ніж одноступеневе пряме керування з показником точності до 3,7 %.

У роботах [18, 19] проведено дослідження із підвищення комфорту експлуатації нової гідроапаратури для мобільних робочих машин. Сучасні гідронасоси змінного об'єму повинні бути спроектовані так, щоб мінімізувати пульсації тиску та шум, що впливає на гідропривод та комфорт оператора [20]. А побудовані нові схеми повинні містити спеціальні глушники, ізоляцію вібрацій та акустичні кожухи для гідростанцій.

Автори роботи [5] провели експериментальні дослідження ефективності гідравлічної трансмісії для передачі енергії від океанічних течій, як постійного та екологічно безпечного джерела енергії. В результаті система гідравлічної трансмісії показала досить низьку ефективність, в середньому близько 22 %. На втрати енергії впливали в'язкість робочої рідини, внутрішній знос та інше, що підкреслює необхідність в подальших дослідженнях та удосконаленні системи гідравлічної трансмісії.

Авторами робіт [21, 22, 23] запропоновано сучасні підходи до зменшення втрат на тертя та витоки в гідроприводі. Зокрема запропоновано використовувати інноваційні ущільнення [21]. Використання лазерного текстурування поверхонь за правильного підбору діаметра мікролунок залежно від в'язкості оливи можна досягти зниження тертя до 80 % [22]. Сучасні шестеренні насоси, внутрішня оболонка корпусу якого може мікро-зміщуватися разом із шестернями під навантаженням, щоб знизити тертя та ризики заклинювання [23].

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є сформулювати основні вимоги до гідравлічних трансмісій на основі комплексного огляду сучасних гідравлічних схем та обладнання для мобільних робочих машин за рахунок аналізу актуальних наукових публікацій. Для досягнення поставленої мети, сформульовано наступні завдання:

- проаналізувати основні типи гідравлічних схем, які використовують в гідравлічних трансмісіях;
- виконати аналіз гідроапаратури для гідравлічних трансмісій;
- сформулювати основні вимоги до гідравлічних трансмісій та визначити перспективні напрямки подальших досліджень.

Схеми гідравлічних трансмісій

На основі аналізу опрацьованих наукових публікацій [8, 9, 11] виділимо типи гідравлічних схем: з відкритим контуром (рис. 2, а) та з закритим контуром (рис. 2, б). Гідравлічна схема з відкритим контуром призначена для передачі потужності від двигуна до робочих органів машини, де робоча рідина після виконання роботи повертається в гідробак. Перевагами такої гідравлічної трансмісії над іншими є універсальність (один насос може живити кілька різних споживачів одночасно), охолодження (велика кількість оливи в гідробаку краще розсіює тепло, що знижує ризик перегріву системи) та простота обслуговування (фільтрація відбувається у загальному гідробаку, що спрощує контроль за чистотою оливи). Однак цій

системі притаманні недоліки: габарити (потрібен об'ємний гідробак, що збільшує вагу та розміри машини), кавітація (існує ризик підсмоктування повітря, якщо рівень оливи в гідробаку занадто низький або насос працює на занадто високих обертах) та менша динамічність (порівняно із закритим контуром, такі системи повільніше реагують на зміну напрямку руху). Застосовуються гідравлічні схеми із відкритим контуром на техніці де багато різних виконавчих органів: обприскувачі, трактори, бульдозери, екскаватори, косарки.

В свою чергу гідравлічні схеми із закритим контуром більш популярні для гідравлічних трансмісій за рахунок їх компактності, динамічності та контролю керування, вищого показника коефіцієнту корисної дії. Недоліками такої гідравлічної трансмісії є складність охолодження (оскільки одна й та сама олива постійно циркулює в малому об'ємі, вона швидко нагрівається, що вимагає обов'язкового встановлення теплообмінників), вузька спеціалізація (один насос зазвичай обслуговує лише один мотор) та вимогливість (система потребує високої точності виготовлення компонентів та дуже якісної фільтрації). Закритий контур ідеально підходить для трансмісії мобільної техніки, де потрібна маневреність та точність: зернозбиральні комбайни, навантажувачі, дорожні катки та асфальтоукладальники, снігоприбиральна та комунальна техніка.

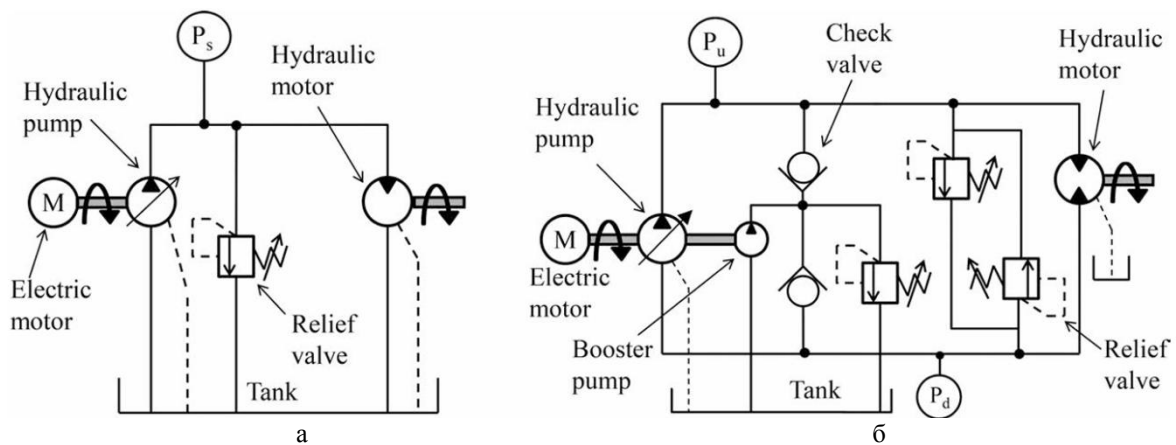


Рис. 2. Типові гідравлічні схеми з розімкнутим (а) та замкнутим (б) контурами [11]

Окремо слід відзначити наявність в гідравлічній схемі гідроапаратури, яка забезпечує чутливість до навантаження (рис. 3) [24, 25]. Гідропривід, який працює при різних режимах роботи із гідроапаратурою чутливою до навантаження може забезпечити економію енергії до 40 % порівняно з класичними нерегульованими системами.

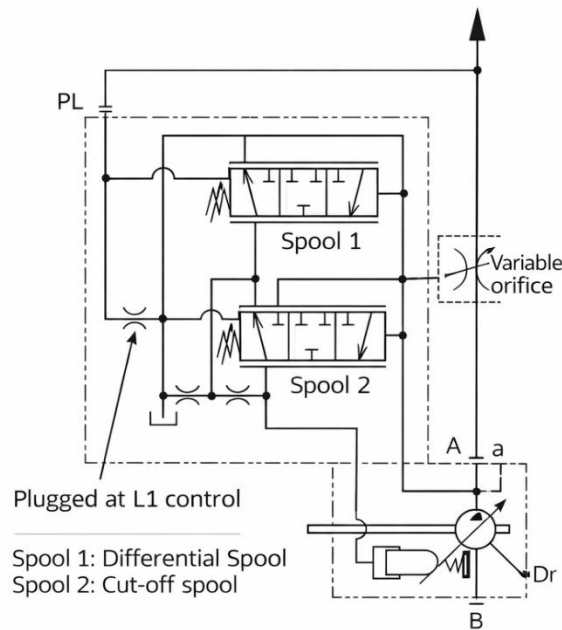


Рис. 3. Гідравлічна схема керування регульованого гідронасоса через регулятори, Kawasaki K3VLS [25]

Найбільш поширені способи керування подачею реалізовані через наявність: регулятора подачі для регульованого гідронасоса (Kawasaki K3VLS), клапана розподілу потоку для нерегульованого гідронасоса (Eaton CLS) або електронного керування робочим об'ємом (LindeHydraulics HPR-02 ЕТР). Регульований гідронасос зі змінним робочим об'ємом подає рівно стільки робочої рідини і під таким тиском, скільки потрібно виконавчому органу в цей момент за рахунок регулятора подачі. Клапан розподілу потоку зазвичай вмонтований в багатосекційний золотниковий блок керування та забезпечує необхідну подачу робочої рідини доки не буде створено достатнього тиску для переміщення навантаження. Електронне керування робочим об'ємом гідронасоса – це найсучасніша технологія та спрямована на подолання більшості недоліків попередньо згаданих систем, за рахунок чіткої відповідності потреб виконавчих органів та керуванню цим процесом за рахунок контролера.

Синхронізація шасі мобільних машин має бути узгоджена під час проектування нових гідроприводів. Існують багато схемних рішень [16, 17, 26, 27] по синхронізації багатомоторних гідравлічних систем: механічне з'єднання, дільники потоку (рис. 4), електронні системи керування, конфігурація головний-ведений (master-slave configuration), гідравлічні синхронні мотори. Вибір методу синхронізації залежить від параметрів: необхідна точність, відстань між вузлами та бюджет проекту. Однак, для критичних задач найкраще підходить метод на основі електронних систем керування, що дає найкращий результат по точності синхронізації, але має найбільшу вартість. Тоді як для задач із меншою точністю синхронізації може бути достатньо механічних або клапанних рішень, що в свою чергу зменшить вартість виробу.

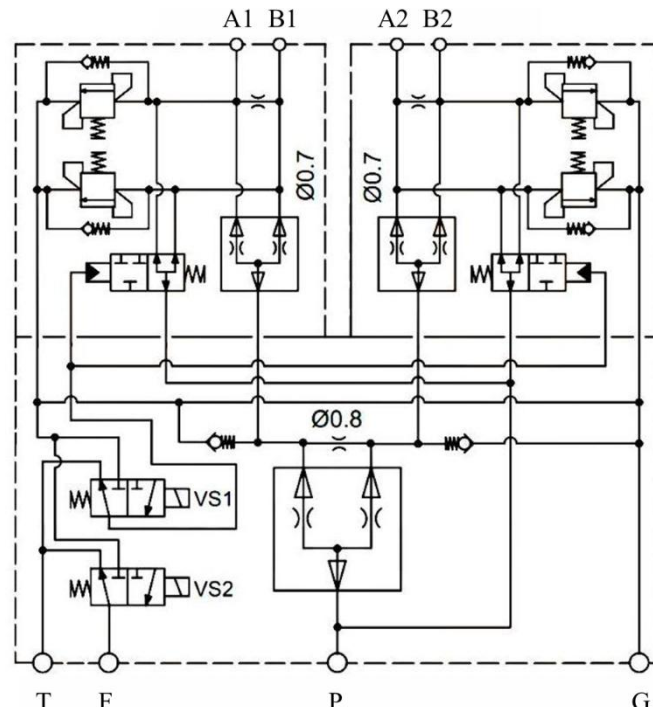


Рис. 4. Гідравлічна схема дільника потоку Poclain FD-4M [27]

Гібридні трансмісії дозволяють використовувати переваги різних видів перетворення енергії. Класифікують гібридні трансмісії за типом вторинного джерела енергії (електричний або гідравлічний) та за архітектурою з'єднання (послідовна, паралельна, розгалужена). Розрізняють такі типи гібридизації трансмісій: електричний гібрид (Electric Hybrid – EH), гідравлічні гібриди (Hydraulic Hybrid – HH), гідромеханічна трансмісія (Hydro-Mechanical Transmission – HMT), гідро-електрична синергія (Hydraulic-Electric Synergy – HESS). Велика кількість робіт [9, 11, 29] присвячена гідравлічним гібридам з використанням гідроаккумуляторів високого тиску (рис. 5). Основні переваги та недоліки різних типів гібридних трансмісій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз гібридних трансмісій мобільних робочих машин

Тип гібридизації	Основні переваги	Основні недоліки
Електричний (EH)	Висока густина енергії батарей (дозволяє тривалий рух)	Батареї повільно приймають і віддають великі струми, що робить їх менш ефективними для рекуперації різкого гальмування важкої техніки. Висока вартість компонентів
Гідравлічний (HH)	Висока питома потужність, швидка зарядка	Менша густина енергії (важкі акумулятори). Знижує коефіцієнт корисної дії при русі на високій швидкості
Гідромеханічний (HMT)	Забезпечує кращу економії палива за рахунок оптимального коефіцієнту корисної дії у всіх режимах	Складність конструкції
Гідро-електрична синергія (HESS)	Вирішує проблему низької питокої потужності батарей та низької енергоємності гідроаккумуляторів	Складна конструкція та висока вартість компонентів

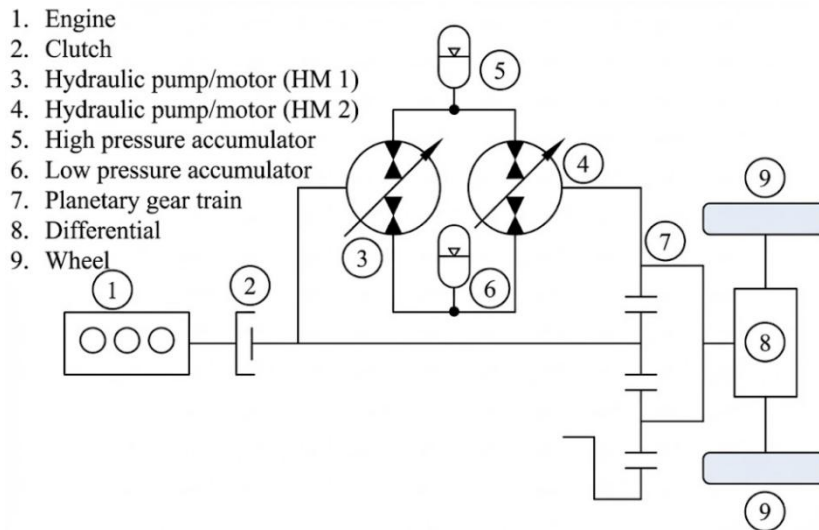


Рис. 5. Гідромеханічна трансмісія з гідроакумуляторами [11]

Часто використовуються два гідроакумулятори: високого тиску для накопичення енергії та низького тиску, як резервуар для всмоктування, щоб уникнути кавітації та зменшити об'єм гідробака.

Обладнання та провідні виробники гідроапаратури

Ефективність та надійність сучасних мобільних робочих машин безпосередньо залежать від технічного рівня компонентів, що входять до складу їхніх гідравлічних трансмісій. Світові виробники гідравлічного обладнання [27, 29, 30] сьогодні переживає етап стрімкої трансформації, спричиненої посиленням вимог щодо енергозбереження та екологічної безпеки. В умовах глобальної конкуренції правильний вибір гідронасосів, гідромоторів та іншої гідроапаратури (таблиця 2) стає критичним фактором, що визначає продуктивність та життєвий цикл мобільних робочих машин.

Таблиця 2

Обладнання для гідравлічних трансмісій мобільних робочих машин

Обладнання	Основні характеристики	Переваги	Недоліки	Доцільність використання
Радіально-поршневий гідромотор (Poclain MS)	Високий момент до 30 кН·м, низькі оберти до 200 об/хв. Тиск до 450 бар.	Прямий привід, високий коефіцієнт корисної дії на старті та брудостійкість.	Обмежена максимальна швидкість, велика маса.	Сільгосптехніка (комбайни, обприскувачі), лісові машини, де потрібна тяга.
Аксіально-поршневий гідромотор (Rexroth A6VM)	Високі оберти до 4000 об/хв, змінний робочий об'єм.	Компактність, широкий діапазон регулювання швидкості.	Потребує планетарного редуктора, чутливий до бруду.	Будівельна техніка (екскаватори, навантажувачі), транспортні засоби.
Героторний гідромотор (Danfoss OMP/OMR)	Низький/середній тиск до 175 бар.	Низька ціна, компактність, надійність.	Низький коефіцієнт корисної дії, не підходить для високих навантажень.	Комунальна техніка, легкі конвеєри, привід щіток.
Гідронасос закритого контуру (Danfoss H1)	Змінний об'єм, вбудований насос підживлення та клапани.	Забезпечує реверс, гальмування двигуном, висока точність.	Висока вартість, складність обслуговування.	Гідростатичні трансмісії всіх типів мобільних робочих машин.

Таблиця 2

Гідроаккумулятор (балонний або мембранний)	Об'єм 0.7-50 л, тиск до 350 бар.	Рекуперація енергії, згладжування пульсацій, аварійне керування.	Потребує періодичної перевірки зарядки азотом.	Гібридні приводи, системи підвіски стріли, гальмівні системи.
Шестеренний дільник потоку (Rotary Flow Divider)	Механічний вузол із з'єднаними шестернями. Точність синхронізації $\pm 1.5...3\%$.	Надійність, працює без електроніки, забезпечує жорстке блокування.	Шумний, громіздкий, гріє масло.	Прості 4WD шасі, підйомні платформи, сільськогосподарська техніка бюджетного класу.
Клапан дільник (Spool Divider)	Золотниковий тип. Точність $\pm 5...10\%$.	Дешевий, компактний, легкий у монтажі. Працює на розділення і об'єднання потоків.	Низька точність, великі втрати тиску (дроселювання), чутливий до в'язкості.	Допоміжні функції (синхронізація аутигерів).
Електронна антибуксувальна система (ASR/TC)	Комплекс обладнання: датчики швидкості коліс, контролер, пропорційні клапани.	Висока ефективність, економія палива, режим "вільного диференціала" на поворотах.	Висока вартість, складність налаштування, залежність від датчиків.	Сучасні лісозаготівельні машини, обприскувачі, високі класні навантажувачі.
Гальмівний клапан (Counter balance Valve)	Клапан типу "over center". Створює підпір у зливній лінії мотора.	Забезпечує плавне динамічне гальмування, запобігає кавітації, фіксує зупинку.	Генерує тепло при гальмуванні.	Лебідки, привід ходу на схилах, поворотні платформи екскаваторів.

Особливість експлуатації гідравлічного обладнання включає високу чистоту робочої рідини. Особливо це необхідно для гідроприводів чутливих до навантаження та аксіально-поршневих вузлів. Вимагається клас чистоти не гірше ISO 4406 18/16/13. Оптимальна в'язкість мінеральної оливи зазвичай знаходиться за $50 - 60^{\circ}\text{C}$. Перегрів вище 80°C призводить до деградації ущільнень і падіння об'ємного коефіцієнту корисної дії. За холодного пуску або забитому всмоктувальному фільтрі можуть виникати кавітація, яка руйнує насос за лічені години. Гідроприводи із закритим контуром вимагають справного насоса підживлення, а регулярна заміна фільтрів підживлення та дренажних фільтрів є критично необхідною.

Саме глобальні технологічні лідери задають стандарти якості та формують вектори розвитку галузі гідроприводу, впроваджуючи нові матеріали та технології обробки поверхонь. На ринку домінують кілька глобальних корпорацій, які часто поглинають менші бренди (таблиця 3).

Таблиця 3

Глобальні технологічні лідери з виробництва обладнання для гідравлічних трансмісій

Виробник	Країна походження	Спеціалізація в трансмісіях
Bosch Rexroth	Німеччина	Світовий лідер. Аксиально-поршневі гідронасоси A4VG, гідромотори A2FM/A6VM. Електронні системи керування BODAS.
Danfoss Power Solutions	Данія / США	Включає колишній Eaton та Sauer-Danfoss. Лідери в орбітальних гідромоторах, рульовому керуванні та гідронасосах серії H1.
Poclain Hydraulics	Франція	Винахідники та лідери ринку радіально-поршневих гідромоторів (серія MS) для прямого приводу коліс (DirectDrive).
Kawasaki Precision Machinery	Японія	Основний постачальник для екскаваторної техніки (гідронасоси K3V, мотори серії M).
Parker Hannifin	США	Широкий спектр гідромоторів (серія Torqmotor) та гідронасосів (серія Gold Cup).

Аналіз номенклатури ринку дозволяє інженерам не лише орієнтуватися в доступних технологічних інноваціях, а й враховувати уніфікацію та ремонтпридатність машин.

Основні вимоги до гідравлічних трансмісій мобільних робочих машин

Сучасні вимоги до гідравлічних трансмісій формуються під впливом глобальних екологічних та економічних викликів. Основний фокус змістився з простої передачі потужності на інтелектуальне керування енергією. Вимоги, які ставляться до сучасних гідравлічних трансмісій мобільних робочих машин: енергоефективність та економія палива; екологічність та здатність до рекуперації енергії; мінімізація внутрішніх втрат; поєднання високої питомої потужності та енергоємності; керованість, стабільність та комфорт.

Економія палива є ключовою вимогою через вичерпність природних паливних ресурсів. Наприклад, використання гібридизації дозволяє заощадити від 20 % до 40 % палива, а гідропривід з регульованим гідронасосом – до 40 %. Саме тому енергоефективність традиційної гідравлічної трансмісії вважається меншою порівняно з механічними чи електричними, і необхідно покращувати її коефіцієнт корисної дії.

Окрім економії палива, гідроприводи повинні сприяти зменшенню забруднення навколишнього середовища, яке зростає через використання викопного палива. Часті цикли гальмування та дроселювання призводять до генерації тепла, що є формою втраченої енергії та вимагає додаткових систем охолодження. В свою чергу сучасна гідравлічна трансмісія повинна вміти не просто розсіювати енергію гальмування, а накопичувати її для повторного використання шляхом рекуперації у гідравлічних акумуляторах.

Інженерні рішення для гідроприводів мобільних робочих машин повинні вирішувати проблеми із дросельними втратами, втрати на тертя в рухомих елементах гідроапаратури та витоки робочої рідини за рахунок її перетікання. Втрати тиску за рахунок зменшення напору під час проходження робочої рідини через фітинги, труби та клапани є обов'язковим етапом вдосконалення сучасного гідроприводу.

Для важкої техніки ставиться вимога балансу між потужністю та запасом енергії, що часто неможливо забезпечити одним джерелом. Гідропривід повинний компенсувати недоліки окремих накопичувачів за рахунок акумуляторів, щоб забезпечити високу щільність потужності. Гідравлічні компоненти трансмісії повинні зберігати свою перевагу у високій питомій потужності на одиницю ваги.

Важливою вимогою є забезпечення високої керованості, що часто реалізується через пропорційні клапани або сервоклапани. Дослідження та усунення нестабільності під час

роботи з декількома виконавчими органами одночасно. Сучасна гідроапаратура повинна бути спроектована так, щоб мінімізувати пульсації тиску та шум, який впливає на комфорт оператора.

Висновки

Проведений аналіз гідравлічних схем для проектування гідравлічних трансмісій дозволяє зробити висновки, що розглянуті дослідження суттєво підвищують енергоефективність та екологічність мобільних робочих машин. Основний пріоритет покладається на гібридизацію, керуваність, стабільність та комфорт трансмісій мобільних робочих машин.

Правильний підбір гідравлічного обладнання суттєво впливає на технічні характеристики, продуктивність та життєвий цикл мобільних робочих машин. Лідером з проектування обладнання для гідравлічних трансмісій мобільних робочих машин виступає Poclain Hydraulics.

Сформульовано основні вимоги до обладнання гідравлічних трансмісій мобільних робочих машин. Основний вектор наукових пошуків спрямований не на створення нових типів гідроапаратури, а на інтелектуальне керування потоками енергії та створення гібридів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A compact hydro-mechanical transmission solution to wheel loader propulsion system and its control strategy / F. Wang et al. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2023. V. 238 (13). P. 4114–4128. DOI: 10.1177/09544070231191157.
2. Березюк О. В., Яворський В. Є. Удосконалена математична модель роботи гідроприводу механізму завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз із урахуванням зносу пар тертя. *Наукові праці «ВНТУ»*. 2025. № 1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/788>. DOI: 10.31649/2307-5376-2025-1-154-164.
3. Піонткевич О. В. Вплив параметрів системи керування гідроприводом мобільної робочої машини на динамічні характеристики. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. №2. С.68–76.
4. Березюк О. В. Огляд конструкцій машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. №1. С. 3–8.
5. Handoko C. R., Mukhtasor M., Koenhardono E. S. Performance Evaluation of Hydrostatic Transmission Systems in Tidal Energy Conversion. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 576, P. 04006. DOI: 10.1051/e3sconf/202457604006.
6. Mendieta W., Flynn D. Hydrostatic transmission technology for wind turbines: grid-forming, system service and maintenance capabilities. In *23rd Wind & Solar Integration Workshop (WIW 2024)*. 2024. Vol. 2024. P. 1067–1074. DOI: 10.1049/icp.2024.3915.
7. Application and analysis of hydraulic wind power generation technology / K. Liu et al. *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 48. 101117. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101117.
8. Xiong S., Wilfong G., Lumkes J. Jr. Components Sizing and Performance Analysis of Hydro-Mechanical Power Split Transmission Applied to a Wheel Loader. *Energies*. 2019. Vol. 12 (9), 1613. DOI: 10.3390/en12091613.
9. Review of Research on Hydrostatic Transmission Systems and Control Strategies / Q. Fan et al. *Processes*. 2025. V. 13 (2), 317. DOI: 10.3390/pr13020317.
10. Precision and Stability in Hydrostatic Transmissions with Robust H_∞ Control Under Parametric Uncertainties / S. K. Mishra et al. *Journal of Experimental and Theoretical Analyses*. 2025. V. 3 (2). DOI:10.3390/jeta3020014.
11. Mahato A. C., Ghoshal S. K. An Overview of Energy Savings Approaches on Hydraulic Drive Systems. *International Journal Fluid Power*. 2020. Vol. 21 (1). P. 81–118. DOI: 10.13052/ijfp1439-9776.2114.
12. Березюк О. В. Аналітичне дослідження математичної моделі гідроприводу вивантаження твердих побутових відходів із сміттєвоза. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2011. № 34 (4). С. 80–83.
13. Березюк О. В. Розробка та дослідження нової структури екологічної машини для очистки населених пунктів від твердих відходів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*. 2008. № 1. С. 92–98.
14. A novel algorithm for hydrostatic-mechanical mobile machines with a dual-clutch transmission / Y. Xiang et al. *Energies*. 2022. Vol. 15 (6), 2095. DOI: 10.3390/en15062095.
15. Лозінський Д. О., Піонткевич О. В., Сиротін О. А. Інноваційні підходи до підвищення енергоефективності електрогідравлічних систем. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2025. №2. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/836>. DOI: 10.31649/2307-5376-2025-2-214-221.
16. Review of research and development of hydraulic synchronous control system / R. Li et al. *Processes*. 2023. Vol. 11 (4). DOI: 10.3390/pr11040981.

17. Zhang H., Zheng J. Comparison of straight line driving synchronous control methods and validation of 4WD sprayer chassis with hydraulic power. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*. 2016. Vol. 32 (23). P. 43-50. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.23.006.
18. Stosiak M., Karpenko M. Reduction the Impact of Vibration on a Hydraulic Drive Components—Valves and Pipelines. In *Dynamics of Machines and Hydraulic Systems: Mechanical Vibrations and Pressure Pulsations*. 2024. P. 101–148. DOI: 10.1007/978-3-031-55525-1_5.
19. Skaistis S. Noise control for hydraulic machinery. CRC Press. 2020. 251 p.
20. Research on flow and pressure ripple reduction of axial piston pump based on optimized damping groove / H. Du et al. *AIP Advances*. 2025. Vol. 15 (4). 045329. DOI: 10.1063/5.0230483.
21. Hybrid hydrodynamic-hydrostatic piston seal for low friction and leakage in hydraulic piston machines / Y. Fanget al. *Tribology International*, 2025. V. 215 (8), 111470. DOI: 10.1016/j.triboint.2025.111470.
22. Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication / D. Braun et al. *Tribology international*. 2014. Vol. 77. P. 142–147. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.04.012.
23. Komagata M., Yamamoto K., Nakamura Y. Design of movable casing for friction reduction of external gear pump for hydraulic actuators. In *IFTo MM World Congress on Mechanism and Machine Science*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2023. P. 389–398. DOI: 10.1007/978-3-031-45770-8_39.
24. Веб-сайт: Load Sensing Methods for Mobile Hydraulic Systems. URL: <https://www.crossco.com/resources/articles/load-sensing-methods-for-mobile-hydraulic-systems/> (Дата звернення 06.10.2025).
25. Kushwaha P., Dasgupta K., Ghoshal S. K. A comparative analysis of the pump controlled, valve controlled and prime mover controlled hydromotor drive to attain constant speed for varying load. *ISA transactions*. 2022. Vol. 120. P. 305–317. DOI: 10.1016/j.isatra.2021.03.020.
26. Веб-сайт: What are the synchronization methods for hydraulic motors in a multi-motor system? URL: <https://www.hydromotor.com/blog/what-are-the-synchronization-methods-for-hydraulic-motors-in-a-multi-motor-sys-441480.html> (Дата звернення 08.10.2025).
27. Веб-сайт: FD-M2, FD-M3, FD-M4 – Medium Duty Flow Divider For Traction Control. URL: <https://poclain.com/products/hydraulic-valves/hydraulic-valves-power-transmission-motion-control/flow-divider-traction-control/medium-duty-flow-divider-fd-m/fd-m2-fd-m3-fd-m4-medium-duty-flow-divider-traction-control> (Дата звернення 08.10.2025).
28. Study and Simulation of a Hydraulic Hybrid Powertrain / A. Macor et al. *72nd Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2017, 6–8 September 2017, Lecce, Italy, 2017*. P. 1131–1138. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.08.279.
29. Веб-сайт: Poclain Hydraulics Selection Guide 2024. URL: <https://poclain.com/sites/default/files/2023-11/selection-guide-2024.pdf> (Дата звернення 10.10.2025).
30. A Survey of Power train Technologies for Energy-Efficient Heavy-Duty Machinery / QuanZ. et al. *Proceedings of the IEEE*. March 2021. Vol. 109, №3. P. 279–308. DOI: 10.1109/JPROC.2021.3051555.

Стаття надійшла до редакції 07.09.2025.

Стаття пройшла рецензування 26.12.2025.

Трегубов Вадим Олександрович – аспірант кафедри технологій та автоматизації машинобудування, e-mail: vadym.tregubow@gmail.com.

Піонткевич Олег Володимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування, e-mail: piontkevych@vntu.edu.ua.

Вінницький національний технічний університет.