e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

EVOLUTION OF HYDRAULIC AND ELECTROHYDRAULIC SYSTEMS OF AGRICULTURAL MACHINERY: ENERGY EFFICIENCY, INTELLIGENT CONTROL AND DEVELOPMENT TRENDS

M. Mikulina*

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
mobile fluid power,
load-responsive control,
energy regeneration,
adaptive control,
digital communication

Article history:
Received 10.09.2026
Reviewed 30.09.2026
Approved 30.11.2026

****Corresponding author:***
marinamikulina1@ukr.net

ABSTRACT

Hydraulic systems remain an important means of power transmission and control in modern agricultural machinery. Increasing tractor power, the number of actively driven working units and the level of automation has promoted a transition from circuits with fixed-displacement pumps and mechanically operated valves to load-sensing, electrohydraulic and digitally controlled systems. The purpose of the study is to systematize the stages of development of hydraulic and electrohydraulic systems in agricultural machinery, identify approaches to improving their energy efficiency, and determine further development trends. A structured thematic review of scientific publications from 2000–2026 and a comparative analysis of official technical documentation from leading tractor manufacturers were carried out. Open-centre and closed-centre systems, load sensing, independent metering, pump-controlled drives, electrohydraulic control, Power Beyond, standardized digital tractor–implement communication, Tractor Implement Management and electronic transmission of the load signal were considered. The analysis indicates that the main reserve for improving efficiency is the reduction of throttling losses and better matching of pressure and flow to actual consumer demand. Recent tractor–implement control concepts demonstrate that efficiency can be improved by optimising pressure control. Modern high-power production tractors widely use variable-displacement pumps, electrohydraulic valves, Power Beyond and digital tractor–implement communication; the maximum hydraulic flow of the analysed systems is approximately 205–318 L/min. Comparison of research concepts with commercial solutions showed that load sensing, electronically controlled valves and ISOBUS have reached a high level of technological maturity, whereas independent metering, local electro-hydraulic actuators, energy regeneration and predictive control remain emerging directions. Electrification does not eliminate hydraulic drives but changes the way energy flows are generated, distributed and coordinated, promoting a transition towards hybrid cyber-physical electrohydraulic architectures with sensor-based monitoring and adaptive control.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2325

To cite this article:
Mikulina, M. (2026). Evolution of hydraulic and electrohydraulic systems of agricultural machinery: energy efficiency, intelligent control and development trends. *Agricultural Machines*, *52*, 27-40. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2325

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 631.3:621.22

ЕВОЛЮЦІЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ

М.О. Мікуліна*

Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
АСМ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
мобільний гідропривод, регулювання за навантаженням, рекуперація енергії, адаптивне регулювання, цифрова взаємодія

Історія публікації:
Отримано 10.09.2026
Прорецензовано 30.09.2026
Затверджено до друку 30.11.2026

Автор для листування:*
marinamikulina1@ukr.net

АНОТАЦІЯ

Гідравлічні системи залишаються одним із основних засобів передавання та регулювання потужності в сучасній сільськогосподарській техніці. Зростання потужності тракторів, кількості активних робочих органів і рівня автоматизації зумовило перехід від схем із насосами постійної продуктивності та механічними розподільниками до Load Sensing, електрогідравлічних і цифрово керованих систем. Мета дослідження – систематизувати етапи розвитку гідравлічних та електрогідравлічних систем сільськогосподарської техніки, визначити напрями підвищення їх енергоефективності та тенденції подальшого розвитку. Проведено структурований тематичний огляд наукових публікацій 2000–2026 рр. та порівняльний аналіз офіційної технічної документації провідних виробників тракторів. Розглянуто системи з відкритим і закритим центром, Load Sensing, незалежне керування потоками, насосно-керовані приводи, електрогідравлічне регулювання, Power Beyond, стандартизовану цифрову взаємодію трактора з агрегатом, Tractor Implement Management та електронне передавання сигналу навантаження. Показано, що головним резервом підвищення ефективності є зменшення дросельних втрат і узгодження тиску та подачі з фактичною потребою споживача. Сучасні схеми керування трактором і агрегатом демонструють можливість підвищення енергоефективності завдяки оптимізації регулювання тиску. Встановлено, що серійні трактори високого класу потужності широко використовують регульовані насоси, електрогідравлічні клапани, Power Beyond і цифрову взаємодію з агрегатованими машинами; максимальна продуктивність проаналізованих гідросистем становить близько 205–318 л/хв. Порівняння наукових і серійних рішень показало високу технологічну зрілість Load Sensing, електронних клапанів і стандартизованої цифрової взаємодії, тоді як Independent Metering, локальні електрогідравлічні приводи, рекуперація та прогнозне керування залишаються перспективними.. Електрифікація не витісняє гідравлічний привод, а змінює спосіб формування і координації енергетичних потоків, сприяючи переходу до гібридних кіберфізичних електрогідравлічних систем із сенсорним моніторингом та адаптивним керуванням.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2325

Цитувати цю статтю:
Мікуліна, М. О. (2026). Еволюція гідравлічних та електрогідравлічних систем сільськогосподарської техніки: енергоефективність, інтелектуальне керування та тенденції розвитку. *Сільськогосподарські машини*, *52*, 27-40. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2325

СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Гідравлічні системи широко застосовуються у тракторах і сільськогосподарських машинах для передавання потужності, керування навісними механізмами та приводами активних робочих органів. Висока питома потужність і можливість плавного регулювання забезпечили їх тривале використання, однак зростання потужності машин, кількості споживачів та рівня автоматизації підвищило вимоги до енергоефективності, точності й швидкодії гідроприводу.

Розвиток тракторної гідравліки характеризується переходом від механічного керування до електрогідравлічних систем із замкненими контурами регулювання. Сучасні навісні системи можуть використовувати інформацію про положення робочого органу, тягове навантаження та буксування, а дослідження спрямовані на багатопараметричне та адаптивне керування *(Wang et al., 2021; Sun et al., 2022)*.

Одним із головних напрямів розвитку є підвищення енергетичної ефективності. Load Sensing системи узгоджують подачу насоса з потребою споживачів, проте зберігають втрати, пов'язані з регулювальним перепадом тиску, дроселюванням і одночасною роботою контурів із різним навантаженням. Альтернативні способи керування тиском у системі «трактор–агрегат» дають змогу істотно зменшувати ці втрати *(Tian et al., 2024a; Tian et al., 2024b)*.

Паралельно гідросистема інтегрується з електронними підсистемами трактора та агрегатованої машини. Передумови такого підходу були сформульовані під час розвитку інтегрованого керування трактором і знаряддям *(Scarlett, 2001)*, а стандарт ISO 11783 сформував основу для стандартизованого цифрового обміну між електронними блоками, сенсорами та виконавчими механізмами *(Paraforos et al., 2019).*

Сучасні огляди підтверджують, що електрогідравлічне керування тракторів розвивається у напрямі поєднання контролю глибини, тягового опору та буксування із сенсорними системами й мікропроцесорним керуванням *(Sahu & Mandal, 2025)*. Водночас дослідження енергоефективності, автоматизації та цифрової взаємодії часто розглядаються окремо.

Недостатньо систематизованим залишається взаємозв'язок між еволюцією схем гідроприводу, способами зменшення енергетичних втрат, електронним керуванням, цифровою взаємодією та їх практичною реалізацією у серійній сільськогосподарській техніці. Комплексне зіставлення наукових розробок із промисловими рішеннями дає змогу оцінити рівень технологічної зрілості окремих підходів і визначити найбільш імовірні напрями подальшого розвитку.

Мета дослідження – систематизувати основні етапи розвитку гідравлічних та електрогідравлічних систем сільськогосподарської техніки, проаналізувати рішення щодо підвищення їх енергетичної ефективності та функціональності, зіставити наукові підходи із серійними технічними рішеннями та визначити перспективні напрями розвитку в умовах автоматизації, цифровізації й електрифікації мобільних машин.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Проведено тематичний аналітичний огляд наукових публікацій 2000–2026 рр. Для формування джерельної бази використовували рецензовані статті, матеріали наукових конференцій та офіційні технічні матеріали виробників. Публікації відбирали за тематичною відповідністю питанням енергоефективності мобільних гідросистем, Load Sensing, електрогідравлічного керування, цифрової взаємодії трактора й агрегату та електрифікації гідроприводу.

До аналізу включали рецензовані статті, оглядові праці та окремі матеріали конференцій, що містили теоретичні або експериментальні результати щодо мобільних гідравлічних та електрогідравлічних систем. Перевагу надавали роботам із DOI, кількісними показниками енергоефективності, точності керування або експериментальною валідацією. Роботи, що не стосувалися мобільної гідравліки, дублікати та матеріали без достатнього опису методів і результатів виключали.

Відібрані публікації систематизовано за напрямами: open-center і closed-center системи; насоси змінної продуктивності та Load Sensing; електрогідравлічне керування; Independent Metering; pump-controlled приводи; рекуперація енергії; цифрова взаємодія трактора з агрегатом; адаптивне керування; електрифіковані та розподілені електрогідравлічні системи.

Для оцінювання ступеня практичного впровадження проаналізовано офіційні технічні матеріали John Deere, Fendt, Case IH, New Holland, CLAAS і Massey Ferguson. Порівнювали тип гідросистеми, продуктивність насосів, кількість зовнішніх гідравлічних контурів, наявність Load Sensing, Power Beyond, електрогідравлічних клапанів та засобів цифрової взаємодії з агрегатованою машиною.

Результати узагальнювали за схемою «наукова проблема – технічне рішення – отриманий ефект – рівень практичного впровадження – перспективний напрям розвитку». Такий підхід використано для зіставлення наукових досліджень із конструктивними рішеннями серійної техніки та формування узагальненої картини еволюції гідравлічних систем.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Еволюція гідравлічних систем сільськогосподарської техніки

Розвиток гідравлічних систем тракторів і сільськогосподарських машин відбувався разом зі зростанням кількості споживачів, потужності та вимог до точності керування. Функція гідроприводу поступово змістилася від простого переміщення навісних механізмів до керованого розподілу потужності між декількома виконавчими органами.

Одними з перших масово поширених були системи з відкритим центром (open-center), характерні для сільськогосподарської техніки середини XX ст. Насос постійної продуктивності безперервно забезпечував циркуляцію робочої рідини через розподільник, що спрощувало конструкцію, але спричиняло непродуктивні втрати енергії *(Jarboe, 1983).*

Поширення систем із закритим центром (closed-center) та насосів змінної продуктивності дало можливість зменшити втрати в режимі очікування і краще узгодити подачу з потребою споживачів. Водночас у системах постійного тиску зберігалися втрати через підтримання надлишкового тиску та дроселювання *(Kay, 1966)*.

Ключовим етапом стало впровадження Load Sensing (LS), за якого насос підтримує тиск, достатній для найбільш навантаженого активного споживача, із необхідним регулювальним запасом. Серійне застосування load-sensitive систем у сільськогосподарських тракторах документовано вже на початку 1970-х років *(Khatti, 1973)*, а подальший розвиток pressure- and flow-compensated LS-систем забезпечив ефективніше живлення декількох функцій від одного джерела потоку *(Jarboe, 1983).*

Разом із тим Load Sensing не усуває всіх втрат: за різних рівнів навантаження частина енергії розсіюється на компенсаторах і дросельних елементах. Особливо це проявляється у системі «трактор–агрегат», де послідовно взаємодіють регулювальні елементи обох машин *(Tian et al., 2024b).*

Наступний етап пов’язаний з електрогідравлічним керуванням: механічні зв’язки поступово замінюються пропорційними клапанами, сенсорами та електронними блоками керування. Це створило основу для автоматичного регулювання положення, тягового опору, глибини обробітку та буксування *(Sun et al., 2022; Sahu & Mandal, 2025)*.

Отже, еволюцію доцільно характеризувати як перехід від постійного формування потоку до регулювання за потребою, від підтримання постійного тиску до адаптації тиску до навантаження та від механічного керування до цифрово координованих електрогідравлічних систем. Основні етапи узагальнено в таблиці 1 та на рис. 1.

Таблиця 1 – Основні етапи розвитку гідравлічних систем сільськогосподарської техніки

Етап	Основні технічні ознаки	Основна перевага	Характерне обмеження
Open-center	Насос постійної продуктивності, механічний розподільник, постійна циркуляція	Простота конструкції	Непродуктивна циркуляція та втрати потужності
Closed-center	Закритий нейтральний канал, регулювання подачі/тиску	Менші втрати в режимі очікування	Підтримання надлишкового тиску

Етап	Основні технічні ознаки	Основна перевага	Характерне обмеження
Load Sensing	Насос змінної продуктивності, LS-сигнал, компенсація тиску	Узгодження подачі й тиску з навантаженням	Margin pressure та дросельні втрати
Electrohydraulic control	Електрогідравлічні клапани, датчики, ECU	Точність і автоматизація керування	Зростання складності системи
Intelligent hydraulics	Інтегровані сенсори, адаптивні алгоритми, цифровий обмін	Оптимізація системи відповідно до режиму роботи	Висока складність керування та вимоги до сумісності

Примітка. Систематизовано автором за даними Kay (1966), Khatti (1973), Jarboe (1983), Sun et al. (2022), Tian et al. (2024b), Sahu and Mandal (2025).

open-center → closed-center → Load Sensing → електрогідравлічне керування → цифрова інтеграція → інтелектуальні та електрифіковані гідросистеми.

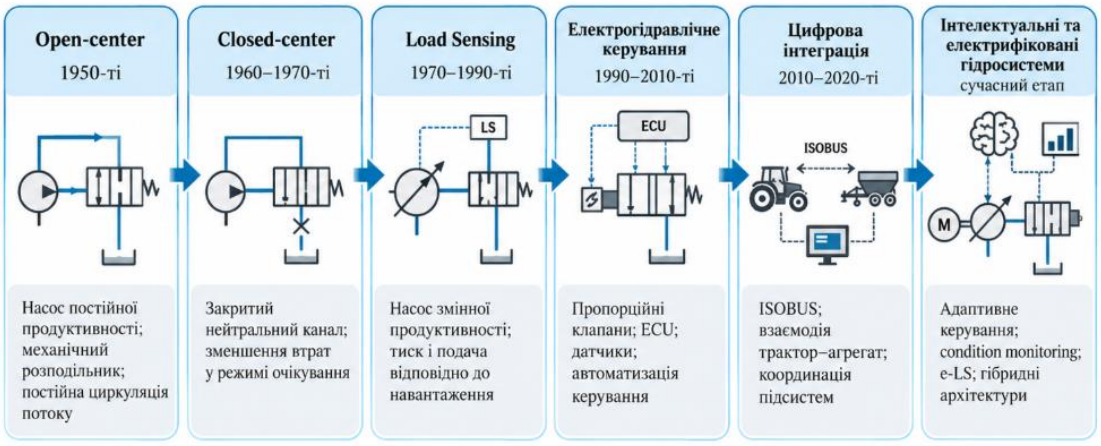


Рис. 1 – Основні етапи розвитку гідравлічних систем сільськогосподарської техніки

Енергоефективність сучасних гідравлічних систем

Енергетична ефективність є одним із ключових критеріїв розвитку мобільної гідравліки. Основні втрати пов'язані з дроселюванням потоку, підтриманням надлишкового тиску, об'ємними й механічними втратами та розсіюванням потенційної або кінетичної енергії виконавчих механізмів у вигляді теплоти *(Bhola & Wrat, 2026)*.

У традиційних системах із насосом постійної продуктивності потік формується незалежно від фактичної потреби споживача. Перехід до насосів змінної продуктивності та Load Sensing дозволив узгоджувати параметри джерела з навантаженням, однак для стабільного дросельного регулювання LS-система все одно підтримує запас тиску відносно найбільш навантаженого споживача.

Tian et al. (2021) показали, що навіть у попередньо компенсованих LS-системах існує резерв зниження втрат без радикальної зміни архітектури. Запропоновані авторами способи керування забезпечили 6,7 % експериментально підтвердженої економії потужності, а для другого рішення розрахункова економія становила 15,6 %.

Для системи «трактор–агрегат» особливо важливим є узгодження керуючих клапанів двох машин. У дослідженні трактора потужністю близько 298 кВт із 16-рядною сівалкою перехід до керування тиском живлення агрегату забезпечив підвищення енергетичної ефективності приблизно на 18 % *(Tian et al., 2024a)*.

Подальше дослідження альтернативних архітектур показало, що перенесення функції дозування потоку до клапанів агрегату або перехід до керування тиском можуть усунути частину надлишкових перепадів. Для розглянутої системи обидві концепції дали понад 38 % підвищення енергетичної ефективності відносно базової комерційної схеми *(Tian et al., 2024b).*

Іншим напрямом є Independent Metering, тобто незалежне керування вхідним і вихідним потоками виконавчого механізму. Такий підхід розширює можливості керування перепадами тиску та вибору енергоефективного режиму залежно від характеру навантаження *(Abuowda et al., 2020)*.

Ще більший потенціал зменшення дросельних втрат мають pump-controlled приводи, у яких необхідна витрата формується зміною робочого об'єму насоса або частоти його обертання. Ці системи можуть поєднуватися з рекуперацією енергії, але потребують складнішого керування та окремого керованого джерела потоку *(Quan et al., 2014)*.

Отже, сучасні рішення спрямовані на зменшення невідповідності між потужністю, яку формує джерело, та реальною потребою виконавчого механізму. Основні способи підвищення ефективності наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Основні технічні рішення для підвищення енергоефективності

Технічне рішення	Основний принцип підвищення ефективності	Основне обмеження
Load Sensing	Узгодження тиску і подачі насоса з навантаженням	LS-margin та втрати за різних навантажень споживачів
Оптимізоване LS-керування	Зниження надлишкових перепадів тиску	Необхідність удосконалення алгоритмів керування
Pressure-based tractor–implement control	Узгодження тиску трактора з реальною потребою агрегату	Потреба в координації трактора й агрегату
Independent Metering	Незалежне керування вхідним і вихідним потоками	Складніша клапанна система та керування
Pump-controlled actuator	Усунення основного дросельного регулювання	Окреме кероване джерело потоку
Energy recovery	Накопичення та повторне використання енергії	Додаткові компоненти та складність системи

Примітка. Систематизовано автором за даними Quan et al. (2014), Abuowda et al. (2020), Tian et al. (2021, 2024a, 2024b), Bhola and Wrat (2026).

Електрогідравлічне керування та автоматизація робочих процесів

Перехід від механічного до електрогідравлічного керування став одним із визначальних етапів розвитку тракторної гідравліки. Команда оператора або автоматичного регулятора перетворюється на електричний сигнал, який електронний блок керування реалізує через електромагнітні чи пропорційні клапани.

Найбільш наочно цей підхід проявляється у триточковій навісній системі. Автоматичне електрогідравлічне керування дає змогу реалізувати позиційне, тягове, комбіноване регулювання та контроль буксування, що впливає на стабільність глибини, тягове навантаження й використання потужності трактора *(Wang et al., 2021).*

Позиційне регулювання підтримує задане положення навісного механізму, тоді як тягове реагує на зміну опору ґрунту. Комбінування цих принципів дозволяє обмежувати надмірні коливання глибини та одночасно реагувати на зміну навантаження *(Sun et al., 2022).*

Додаткове використання сигналу буксування дає змогу коригувати тяговий опір агрегату та зменшувати непродуктивне використання тягової потужності. У результаті сучасна система

переходить від контролю одного параметра до багатопараметричного керування положенням, навантаженням і рухом агрегату *(Sahu & Mandal, 2025)*.

Електронна архітектура дозволяє змінювати закон регулювання програмно без істотної перебудови силової гідравлічної частини. Експериментальні дослідження стендових систем підтверджують можливість високої точності відтворення заданих режимів: Sun et al. (2023) отримали усталені похибки менше 1 % для досліджуваних контурів керування.

Структуру сучасної системи можна подати як замкнений інформаційно-силовий контур «задане значення – електронний блок керування (Electronic Control Unit, ECU) – пропорційний клапан – гідравлічний виконавчий механізм – датчики зворотного зв'язку». Така побудова перетворює гідросистему на складову мехатронної системи, де результат визначається спільною роботою гідравлічних компонентів, сенсорів і програмного забезпечення.

Польові умови ускладнюють регулювання через зміну властивостей ґрунту, швидкості руху та навантаження. Тому перспективними є адаптивні алгоритми та інтеграція інформації від декількох сенсорів *(Wang et al., 2021; Sun et al., 2022; Sahu & Mandal, 2025)*. Основні режими керування узагальнено в таблиці 3, а структурну схему наведено на рис. 2.

Таблиця 3 – Основні режими електрогідравлічного керування навісною системою трактора

Спосіб керування	Основний контрольований параметр	Основна перевага	Основне обмеження
Позиційне	Положення навісного механізму	Точне підтримання заданого положення	Не враховує зміну тягового опору
Тягове	Тягове навантаження	Реакція на зміну опору ґрунту	Можливі коливання глибини
Комбіноване position–draft	Положення + тягове навантаження	Компроміс між стабільністю глибини та навантаження	Необхідність узгодження двох контурів
Slip control	Буксування рушіїв	Покращення використання тягової потужності	Потребує достовірного визначення швидкості та буксування
Багатопараметричне	Положення, тяга, буксування та інші параметри	Адаптація до змінних умов роботи	Зростання складності сенсорної та керуючої системи
Адаптивне / інтелектуальне	Сукупність параметрів і стан системи	Автоматична зміна закону керування	Складність алгоритмів, валідації та забезпечення надійності

Примітка. Систематизовано автором за даними Wang et al. (2021), Sun et al. (2022, 2023), Sahu and Mandal (2025).

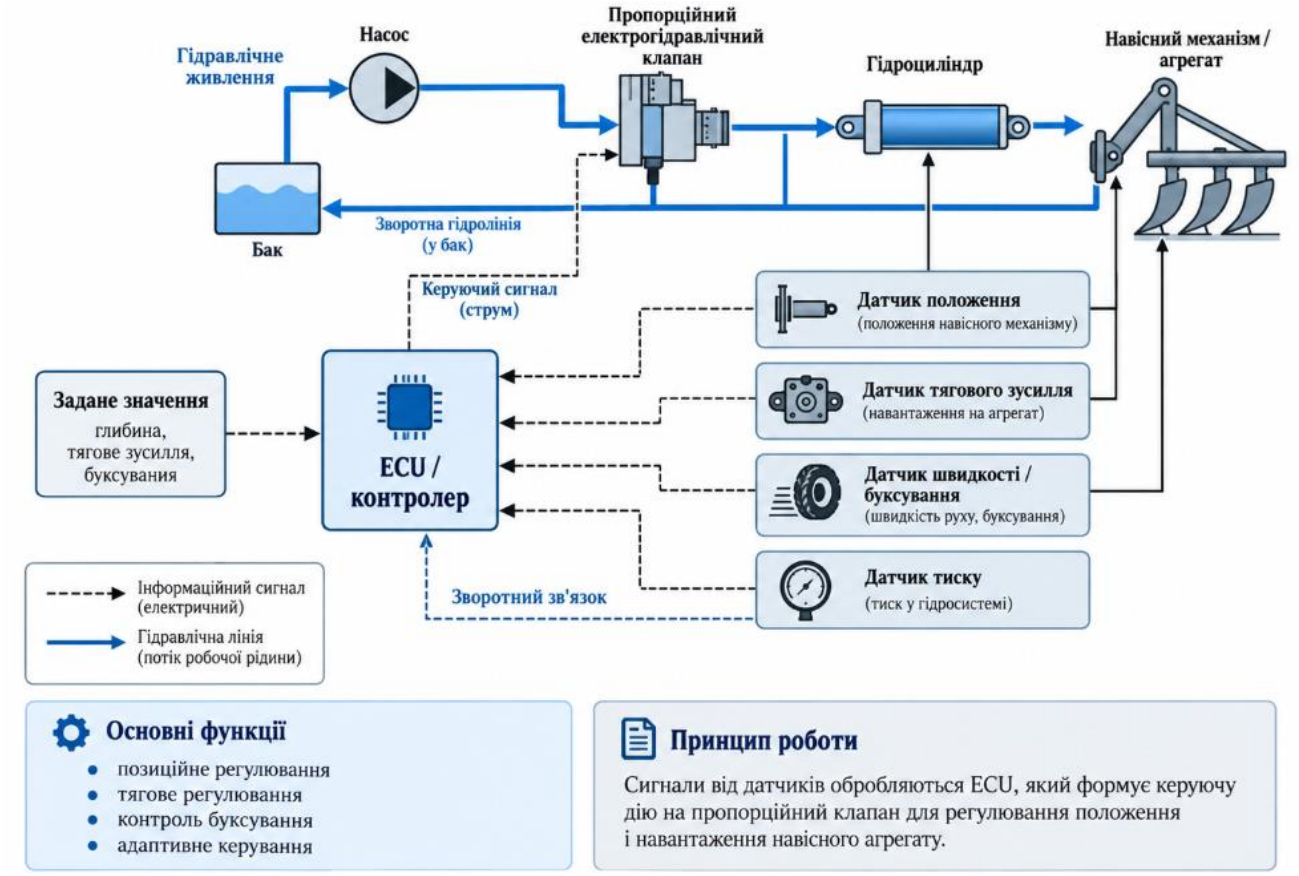


Рис. 2 – Структурна схема сучасної електрогідравлічної системи керування

Інтеграція гідравлічних систем трактора та сільськогосподарської машини

Ефективність машинно-тракторного агрегату визначається не лише характеристиками гідросистеми трактора, а й узгодженням її роботи з гідравлічними та електронними системами агрегатованої машини. Зі збільшенням кількості активних робочих органів традиційного керування лише через дистанційні гідророзподільники стало недостатньо.

У базовій схемі трактор дозує потік через селективні гідророзподільники (SCV). Для складних агрегатів із власними клапанами поширилась схема Power Beyond, яка забезпечує пряме живлення агрегату та може використовувати окрему LS-лінію для передавання сигналу навантаження до насоса трактора *(John Deere, 2005)*.

У такій архітектурі трактор дедалі більше виконує роль джерела гідравлічної потужності, тоді як конкретними виконавчими механізмами керує агрегат. Для повної автоматизованої взаємодії силовий гідравлічний канал доповнюється цифровим інформаційним каналом.

Стандарт ISO 11783 (ISOBUS) сформував стандартизоване середовище обміну даними між електронними блоками, сенсорами та засобами керування трактора й агрегату *(Paraforos et al., 2019)*. Історично його розвиток пов’язаний із переходом від окремих електронних функцій до інтегрованих мехатронних систем *(Oksanen & Auernhammer, 2021)*.

Подальший розвиток двосторонньої взаємодії реалізовано в Tractor Implement Management (TIM), за якого агрегат може автоматично керувати дозволеними функціями трактора, зокрема швидкістю руху або дистанційними гідравлічними клапанами *(Agricultural Industry Electronics Foundation [AEF], n.d)*.

Окремим напрямом є заміна гідравлічного LS-сигналу електронним. Концепція e-LS connect передбачає передавання інформації про необхідний тиск електронно, тоді як силова гідравлічна потужність і надалі подається через Power Beyond *(Fendt, 2025)*. Це відокремлює керуючу інформацію від гідравлічного середовища та створює передумови для ширшої цифрової координації.

Водночас e-LS слід розглядати як нове промислове рішення, а не сформований універсальний міжвиробничий стандарт. На відміну від нього, ISOBUS і TIM мають процедури перевірки сумісності та функціональної безпеки (AEF, n.d.).

Загальну еволюцію можна представити як SCV → Power Beyond → Power Beyond + hydraulic LS → ISOBUS → TIM → electronic Load Sensing. Вона відображає перехід від простого передавання гідравлічної енергії до цифрового узгодження потреб агрегату з режимом роботи трактора. Узагальнення наведено в таблиці 4 та на рис. 3.

Таблиця 4 – Розвиток взаємодії гідравлічних та електронних систем трактора й агрегату

Технологія	Канал взаємодії	Основна функція	Характерна особливість
SCV	Гідравлічний	Керування потоком оператором або системою трактора	Трактор безпосередньо керує гідравлічним споживачем
Power Beyond	Гідравлічний	Безпосереднє живлення власної гідросистеми агрегату	Регулювання може виконуватися агрегатом
Power Beyond + LS	Гідравлічний силовий + гідравлічний керуючий	Узгодження тиску насоса з навантаженням агрегату	Окрема LS-лінія
ISOBUS	Цифровий	Стандартизований обмін командами та даними	Міжвиробнича інформаційна сумісність
TIM	Двосторонній цифровий	Агрегат може керувати дозволеними функціями трактора	Автоматизація комплексу «трактор–агрегат»
Electronic LS	Гідравлічний силовий + електронний керуючий	Електронне передавання потреби у тиску	Усунення гідравлічної LS-лінії та можливість розширеної координації

Примітка. Систематизовано автором за даними Paraforos et al. (2019), Oksanen and Auernhammer (2021), (Agricultural Industry Electronics Foundation [AEF], n.d.), Fendt (2025) та офіційної технічної документації John Deere.

Реалізація сучасних гідравлічних систем у серійній сільськогосподарській техніці

Аналіз сучасних тракторів провідних виробників показує, що Load Sensing, насоси змінної продуктивності та електрогідравлічне керування стали типовими для машин середнього і високого класів потужності. Відмінності дедалі більше визначаються продуктивністю насосів, кількістю незалежних контурів, Power Beyond та рівнем цифрової інтеграції.

John Deere 8RX 340 використовує closed-center pressure/flow compensated Load Sensing систему. Стандартна подача становить 227,1 л/хв, а опційна двонасосна конфігурація – до 318 л/хв; доступні електронно керовані SCV та Power Beyond *(John Deere, 2026)*.

Fendt 700 Vario Gen7 оснащується Load Sensing системою з аксіально-поршневим насосом 165 або 220 л/хв, електрогідравлічними клапанами та Power Beyond. Виробник також орієнтується на забезпечення високої подачі за зниженої частоти обертання двигуна (Fendt, n.d.).

Для Case IH Magnum залежно від моделі та комплектації доступні гідросистеми продуктивністю до 282 л/хв. Magnum 400 Rowtrac має аксіально-поршневий LS-насос, електричні задні гідровиходи, Power Beyond та ISOBUS (Case IH, n.d.).



Рис. 3 – Еволюція взаємодії трактора та агрегатованої машини в гідравлічних і цифрових системах

New Holland T7.340 HD використовує закриту гідравлічну систему 165 або 220 л/хв і підтримує Tractor Implement Management, що дає змогу сумісному агрегату впливати на окремі функції трактора *(New Holland Agriculture, 2023)*. CLAAS AXION 900 пропонує Load Sensing 150 або 220 л/хв, електронне керування клапанами та Power Beyond (CLAAS, n.d.).

Massey Ferguson MF 8S оснащується closed-centre Load Sensing системою 150 л/хв із варіантами до 205 л/хв, електронними клапанами, Power Beyond та ISOBUS (Massey Ferguson, n.d.). Порівняльні характеристики наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Характеристики гідравлічних систем сучасних серійних тракторів

Виробник / серія	Тип системи	Подача, л/хв	Електронне керування	Power Beyond	Цифрова інтеграція
John Deere 8RX 340	Closed-center LS, pressure/flow compensated	227 / 318 опц.	до 6 задніх SCV	+	ISOBUS; SCV з ECU
Fendt 700 Vario Gen7	LS, variable displacement, electric LS	165 / 220 опц.	до 5 задніх + 2 передніх клапанів	+	керування з ECU
Case IH Magnum	LS, аксіально-поршнева система*	до 282 залежно від моделі	4–6 remote valves	+	ISOBUS; AFS/TIM
New Holland T7.340 HD	Closed circuit	165 / 220 опц.	до 5 задніх + 3 передніх	залежно від комплектації	ISOBUS; TIM
CLAAS AXION 900	Load Sensing	150 / 220	до 6 задніх + 2 передніх	+	клапани з ECU
Massey Ferguson MF 8S	Closed-centre Load Sensing	150 / 205 опц.	до 5 задніх клапанів	+	ISOBUS

Примітка. систематизовано автором за офіційною технічною документацією John Deere, Fendt, Case IH, New Holland, CLAAS та Massey Ferguson.

Порівняння підтверджує три спільні тенденції: широке використання регульованих LS-насосів; збільшення доступної подачі для енергоємних агрегатів; перенесення керування від механічних розподільників до електронно конфігурованих клапанів і цифрової взаємодії.

Максимальна продуктивність розглянутих систем становить приблизно 205–318 л/хв. Висока подача дедалі частіше забезпечується за зниженої частоти обертання двигуна, що дає змогу відокремити потребу гідравлічного агрегату від необхідності роботи ДВЗ на максимальних обертах.

Отже, Load Sensing, електрогідравлічні клапани, Power Beyond та ISOBUS уже є серійними технологіями. Натомість Independent Metering, децентралізовані pump-controlled приводи, масштабна рекуперація та адаптивна оптимізація гідравлічної потужності переважно залишаються сферою досліджень.

Інтелектуальні, адаптивні та електрифіковані гідравлічні системи

Подальший розвиток гідравлічних систем пов'язаний зі зміною загальної архітектури приводу та способу керування енергетичними потоками. Основними напрямами є електрифікація джерела гідравлічної потужності, децентралізація приводів, рекуперація, адаптивне керування та моніторинг технічного стану *(Cheng et al., 2024).*

Електрифікація не обов'язково означає заміну гідроциліндрів електромеханічними приводами. Variable-speed electric pump drive дозволяє незалежно регулювати частоту обертання насоса й узгоджувати подачу з поточною потребою, поєднуючи керованість електроприводу з високою питомою потужністю гідравліки *(Lajunen et al., 2018; Cheng et al., 2024).*

Перспективним є також Electro-Hydraulic Actuator (EHA), у якому локальний електродвигун, насос і виконавчий механізм утворюють автономний модуль. Така децентралізація скорочує силові гідролінії та зменшує дросельні втрати, хоча підвищує вимоги до вартості, теплового режиму та координації декількох приводів.

Qu et al. (2021) експериментально показали можливість високоефективної роботи EHA з рекуперацією: ефективність гідравлічної частини в приводному режимі досягала 84,7 %, а в окремих режимах система повертала до 81,8 % енергії виконавчого механізму.

Паралельно формується напрям condition monitoring. Сенсори тиску, температури, частоти обертання, положення та вібрації можуть використовуватися не лише для регулювання, а й для оцінювання технічного стану компонентів.

Дослідження аксіально-поршневого насоса на мобільній машині показало потенціал машинного навчання для діагностики, але також виявило суттєве зниження точності під час переходу від контрольованого до реального робочого циклу *(Keller et al., 2023).* Це підкреслює необхідність репрезентативних польових даних для predictive maintenance сільськогосподарської техніки.

Адаптивне та model predictive control можуть змінювати параметри регулювання відповідно до навантаження, температури та стану системи. Для сільськогосподарських машин перспективною є багатокритеріальна оптимізація, яка одночасно враховує якість технологічного процесу та енергоспоживання.

Сучасні дослідження поєднують Independent Metering, EHA, електричний привод насосів, сенсорний моніторинг і рекуперацію в єдину концепцію smart hydraulics *(Abuowda et al., 2020; Ding et al., 2025; Bhola & Wrat, 2026).* При цьому рівень технологічної зрілості різниться: electronic Load Sensing та цифрова взаємодія вже переходять у серійні рішення, тоді як розподілені EHA та прогнозне керування переважно залишаються дослідними.

У найближчій перспективі найбільш імовірне подальше поширення electronic Load Sensing, Power Beyond, ISOBUS/TIM та насосів із високою подачею за зниженої частоти обертання. Середньостроково очікується ширше застосування variable-speed electric pumps, Independent Metering і condition monitoring; довгостроково – розподілених EHA та координованих кіберфізичних систем.

Отже, електрифікація не усуває гідравліку, а змінює спосіб формування, розподілу та керування гідравлічною енергією. Перспективною є гібридна архітектура, у якій централізована гідросистема зберігається для груп традиційних споживачів, а локальні електрогідравлічні модулі використовуються там, де їх енергетичні або функціональні переваги є найбільшими. Основні напрями та рівень їх впровадження наведено в таблиці 6, а узагальнену архітектурну тенденцію – на рис. 4.

Таблиця 6 – Перспективні напрями розвитку гідравлічних та електрифікованих систем

Напрям	Рівень впровадження	Очікуваний ефект	Основні обмеження / перспектива
Electronic Load Sensing	Початкове промислове впровадження	Цифрове узгодження потреби в тиску; усунення окремої гідравлічної LS-лінії	Потреба у стандартизації та міжвиробничій сумісності
Independent Metering	Дослідні та спеціалізовані системи	Зменшення дросельних втрат; незалежне керування потоками	Складніша клапанна система й алгоритми керування
Variable-speed electric pump drive	Дослідні та окремі промислові рішення	Подача on-demand; незалежність від частоти обертання ДВЗ	Силова електроніка, тепловий режим, вартість
EHA / distributed hydraulics	Переважно дослідні системи	Локальна оптимізація, скорочення силових магістралей	Маса, вартість, координація декількох модулів
Energy regeneration	Спеціалізовані та дослідні системи	Повторне використання потенційної та кінетичної енергії	Ефект залежить від робочого циклу; потрібні накопичувачі
Condition monitoring / predictive maintenance	Частково серійне; ML переважно дослідний	Раннє виявлення деградації та обслуговування за станом	Необхідні репрезентативні польові дані та надійні сенсори
Adaptive / predictive control	Переважно дослідний рівень	Оптимізація якості процесу й енергоспоживання	Складність моделей, валідації та функціональної безпеки

Примітка. Систематизовано автором за даними Abuowda et al. (2020), Lajunen et al. (2018), Qu et al. (2021), Keller et al. (2023), Cheng et al. (2024), Ding et al. (2025), Bhola and Wrat (2026), а також технічних матеріалів AEF і Fendt.

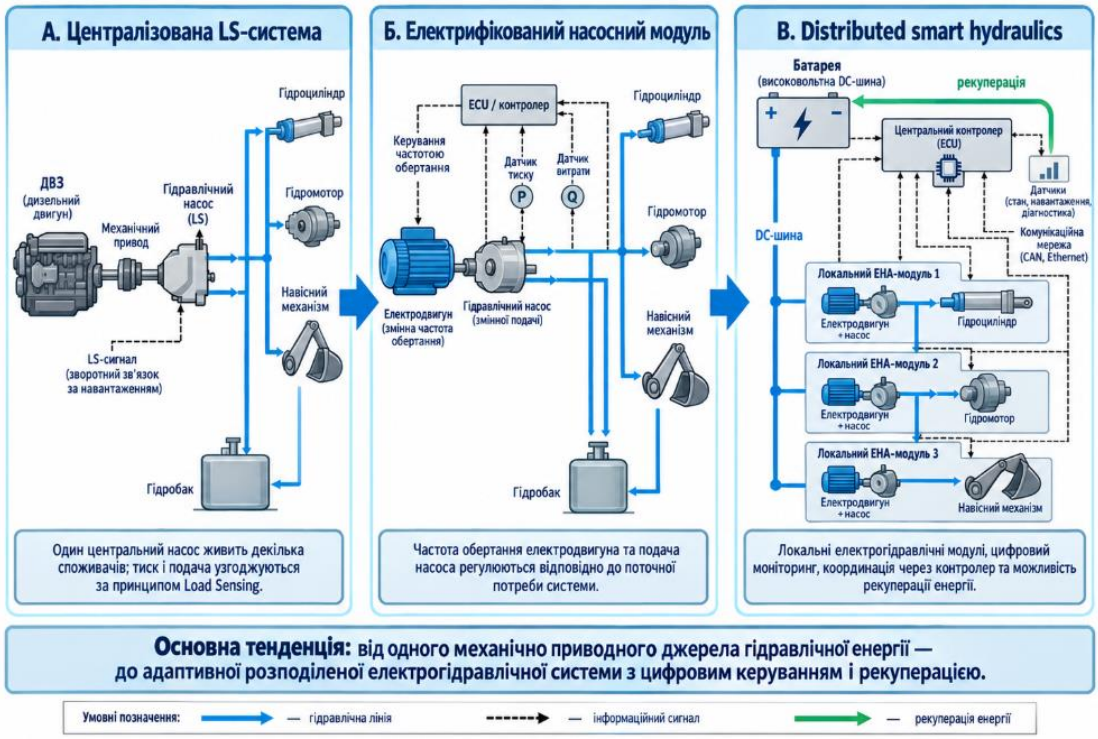


Рис. 4 – Перехід від централізованої Load Sensing системи до distributed smart hydraulics

ВИСНОВКИ

1. Розвиток гідравлічних систем сільськогосподарської техніки має послідовний характер: open-center → closed-center → Load Sensing → електрогідравлічне керування → цифрова інтеграція → електрифіковані та інтелектуальні системи. Основною тенденцією є перехід від постійного формування потоку до керованого забезпечення фактичної потреби споживача.

2. Load Sensing суттєво підвищив ефективність тракторної гідравліки, однак не усунув дросельні втрати та втрати, зумовлені різними рівнями навантаження споживачів. Подальший резерв пов'язаний з електронною координацією тиску і потоку в системі «трактор–агрегат».

3. Електрогідравлічні клапани, сенсори та ECU забезпечили перехід до позиційного, тягового, комбінованого і багатопараметричного керування та створили основу для адаптивної автоматизації робочих процесів.

4. Power Beyond, ISOBUS і Tractor Implement Management змінили взаємодію трактора та агрегату від простого передавання гідравлічної енергії до цифрового обміну командами й параметрами. Electronic Load Sensing є логічним наступним етапом цієї інтеграції.

5. Аналіз серійних тракторів John Deere, Fendt, Case IH, New Holland, CLAAS і Massey Ferguson підтвердив широке використання Load Sensing, електрогідравлічних SCV, Power Beyond та цифрових засобів взаємодії; максимальна подача розглянутих гідросистем становить близько 205–318 л/хв.

6. Перспективними способами подальшого зменшення втрат є Independent Metering, variable-speed electric pump drives, pump-controlled приводи, локальні EHA та рекуперація енергії. Їх доцільність визначатиметься робочим циклом, енергетичним ефектом і складністю системи.

7. Найбільш імовірним напрямом є формування гібридних кіберфізичних електрогідравлічних систем, у яких гідравлічні виконавчі механізми поєднуються з електричними джерелами енергії, сенсорним моніторингом, цифровою комунікацією та адаптивним керуванням.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Abuowda, K., Okhotnikov, I., Noroozi, S., Godfrey, P., & Dupac, M. (2020). A review of electrohydraulic independent metering technology. ISA Transactions, 98, 364–381. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.057

Agricultural Industry Electronics Foundation [AEF], n.d.. Tractor Implement Management (TIM). https://www.aef-online.org/aef-tim/

Bhola, M., & Wrat, G. (2026). Energy-efficient hydraulics in heavy machinery: Technologies, challenges, and future directions. Sustainability, 18(1), 302. https://doi.org/10.3390/su18010302

Case IH. (n.d.). Magnum series tractors. https://www.caseih.com/en/africamiddleeast/products/tractors/magnum-series

Cheng, M., He, J., Mu, H., Yan, X., Yang, J., Ou, J., Ding, R., Zhang, J., & Xu, B. (2024). Opportunities and challenges of electrohydraulic control systems in the electrification era of non-road mobile machinery. Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology, 4(2), 2024001. https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024001

CLAAS. (n.d.). AXION 900: Hydraulics. https://www.claas.com/uk-ua/sil-skohospodarski-mashyny/traktory/axion-900-lrc

Ding, R., Sun, G., Zhang, J., Peng, L., Cheng, M., Xu, B., & Yang, H. (2025). A review of independent metering control system for mobile machinery. International Journal of Hydromechatronics, 8(5), 1–39. https://doi.org/10.1504/IJHM.2025.144958

Fendt. (2025). "e-LS connect" simplifies communication of the oil pressure between tractor and implement. https://www.fendt.com/int/e-ls-connect-simplifies-communication-of-the-oil-pressure-between-tractor-and-implement

Fendt. (n.d.). Fendt 700 Vario Gen7: Technical data. https://www.fendt.com/ua/traktori/700-vario-gen7

Jarboe, H. R. (1983). Agricultural load-sensing hydraulic systems. ASAE Distinguished Lecture No. 9, 1–15. https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=20428

John Deere. (2005). Using load-sensing hydraulic system (Power Beyond). https://manuals.deere.com/omview/OMAR232106_19/OU1092A_000005C_19_12DEC05_1.htm

John Deere. (2026). 8RX 340 four-track tractor: Specifications. https://www.deere.com/en/tractors/row-crop-tractors/row-crop-8-family/8rx-340-tractor/

Kay, R. E. (1966). Closed-center systems – 1966. SAE Technical Paper 660607. https://doi.org/10.4271/660607

Keller, N., Sciancalepore, A., & Vacca, A. (2023). Condition monitoring of an axial piston pump on a mini excavator. International Journal of Fluid Power, 24(2), 171–206. https://doi.org/10.13052/ijfp1439-9776.2422

Khatti, R. (1973). Load-sensitive hydraulic system for Allis-Chalmers Models 7030 and 7050 agricultural tractors. SAE Technical Paper 730860. https://doi.org/10.4271/730860

Lajunen, A., Sainio, P., Laurila, L., Pippuri-Mäkeläinen, J., & Tammi, K. (2018). Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery. Energies, 11(5), 1184. https://doi.org/10.3390/en11051184

Massey Ferguson. (n.d.). MF 8S Xtra tractors. https://www.masseyferguson.com/uk_ua/product/tractors/mf-8S-Xtra.html

New Holland Agriculture. (2023). New Holland introduces the new T7.340 HD with PLM Intelligence. https://agriculture.newholland.com/uk-ua/ukraine/svit-new-holland/novini/2023/new-holland-prjedstavljae-novij-t7-340-hd-iz-pidtrimkoju-sistjem-plmi

Oksanen, T., & Auernhammer, H. (2021). ISOBUS—The open hard-wired network standard for tractor-implement communication, 1987–2020. ASABE Distinguished Lecture No. 42. https://doi.org/10.13031/913C0121

Paraforos, D. S., Sharipov, G. M., & Griepentrog, H. W. (2019). ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 163, 104863. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104863

Qu, S., Fassbender, D., Vacca, A., & Busquets, E. (2021). A high-efficient solution for electro-hydraulic actuators with energy regeneration capability. Energy, 216, 119291. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119291

Quan, Z., Quan, L., & Zhang, J. (2014). Review of energy efficient direct pump controlled cylinder electro-hydraulic technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 35, 336–346. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.036

Sahu, R. K., & Mandal, S. (2025). Electrohydraulic control system in agricultural tractor – A brief review. Journal of Agricultural Engineering, 62(3), 608–623. https://doi.org/10.52151/jae2025623.1940

Scarlett, A. J. (2001). Integrated control of agricultural tractors and implements: A review of potential opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery. Computers and Electronics in Agriculture, 30(1–3), 167–191. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00163-0

Sun, X., Lu, Z., Song, Y., Cheng, Z., Jiang, C., Qian, J., & Lu, Y. (2022). Development status and research progress of a tractor electro-hydraulic hitch system. Agriculture, 12(10), 1547. https://doi.org/10.3390/agriculture12101547

Sun, X., Song, Y., Wang, Y., Qian, J., Lu, Z., & Wang, T. (2023). Design and test of a tractor electro-hydraulic-suspension tillage-depth and loading-control system test bench. Agriculture, 13(10), 1884. https://doi.org/10.3390/agriculture13101884

Tian, X., Stump, P., Vacca, A., Fiorati, S., & Pintore, F. (2021). Power-saving solutions for pre-compensated load-sensing systems on mobile machines. Transactions of the ASABE, 64(5), 1435–1448. https://doi.org/10.13031/trans.14376

Tian, X., Guo, X., Stump, P., Vacca, A., Fiorati, S., & Pintore, F. (2024a). A pressure control method for increasing the energy efficiency of the hydraulic system powering agricultural implements. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 238(6), 1067–1088. https://doi.org/10.1177/09596518241227250

Tian, X., Guo, X., Stump, P., Dessy, G., Vacca, A., Fiorati, S., & Pintore, F. (2024b). New hydraulic control technologies for improving the energy efficiency of the hydraulic system of agricultural tractors and their implements. International Journal of Fluid Power, 25(2), 203–224. https://doi.org/10.13052/ijfp1439-9776.2525

Wang, L., Wang, Y., Dai, D., Wang, X., & Wang, S. (2021). Review of electro-hydraulic hitch system control method of automated tractors. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 14(3), 1–11. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211403.6175