

Макаренко М. Г.  
ORCID: 0000-0003-4078-9045  
E-mail: mak\_nk@ukr.net,  
Державний біотехнологічний  
університет. м. Харків, Україна

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА РЕТРОФІТНА  
СИСТЕМА ПРЕДИКТИВНОЇ  
ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОННИХ  
СИСТЕМ КЕРУВАННЯ  
ГІДРОПРИВОДОМ І ТРАНСМІСІЄЮ  
ТРАКТОРІВ ТА АВТОМОБІЛІВ**

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.8>

УДК 629.3:62-3:681.5:004.8

*Макаренко М. Г. Інтелектуальна ретрофітна система предиктивної діагностики електронних систем керування гідроприводом і трансмісією тракторів та автомобілів*

**Анотація** У статті розглянуто науково-прикладну проблему підвищення достовірності, своєчасності та прогностичної цінності діагностування електронних систем керування гідроприводом і трансмісією тракторів та автомобілів у реальних умовах експлуатації. На підставі аналізу сучасних досліджень і вітчизняних публікацій встановлено, що штатні засоби бортової діагностики та регламентні форми технічного обслуговування не забезпечують достатньої чутливості до передвідмовних станів у складних електрогідравлічних і трансмісійних підсистемах. Обґрунтовано доцільність застосування інтелектуальної ретрофітної системи, яка інтегрується в наявну електронну архітектуру машини без повної заміни штатних вузлів і поєднує бортовий збір даних, телематичний моніторинг, периферійну та централізовану аналітичну обробку, а також методи машинного навчання. Визначено, що найбільш інформативними для предиктивної оцінки технічного стану є багатоканальні часові ряди, сформовані за сигналами CAN- та ISOBUS-середовища й додаткових сенсорів тиску, температури, струму, вібрації, частоти обертання, акустичних характеристик і положення виконавчих елементів. Доведено, що поєднання телематики, віброакустичного контролю, моделювання перехідних процесів і методів машинного навчання створює підстави для раннього виявлення деградаційних процесів, зменшення аварійних простоїв і переходу від регламентного та реактивного сервісу до прогностно-орієнтованого технічного обслуговування.

**Ключові слова:** предиктивна діагностика, ретрофітна система, електронні системи керування, гідропривід, трансмісія, телематика, машинне навчання, технічний стан, CAN-шина, ISOBUS, вібраційний аналіз, акустичний аналіз.

*Makarenko M.G. Intelligent retrofit system for predictive diagnostics of electronic hydraulic drive and transmission control systems of tractors and automobiles.*

**Abstract.** The article addresses the scientific and applied problem of improving the reliability, timeliness and prognostic value of diagnostics of electronic control systems of hydraulic drive and transmission in tractors and automobiles under real operating conditions. Based on recent studies and Ukrainian publications, it is established that conventional scheduled maintenance and standard onboard diagnostic tools do not provide sufficient sensitivity to pre-failure states in complex electrohydraulic and transmission subsystems. The feasibility of an intelligent retrofit system is substantiated. Such a system is integrated into the existing electronic architecture of a machine without complete replacement of standard units and combines onboard data acquisition, telematics, edge and centralized analytical processing, and machine-learning methods. It is determined that the most informative basis for predictive assessment of technical condition is multichannel time-series data generated from CAN and

*ISOBUS environments and additional sensors of pressure, temperature, current, vibration, rotational speed, acoustic characteristics and actuator position. It is shown that the combination of telematics, vibroacoustic monitoring, transient-process modeling and machine-learning methods provides the basis for early detection of degradation processes, reduction of unplanned downtime and transition from reactive and schedule-based service to prognostics-oriented maintenance.*

**Keywords:** *predictive diagnostics, retrofit system, electronic control systems, hydraulic drive, transmission, telematics, machine learning, technical condition, CAN bus, ISOBUS, vibration analysis, acoustic analysis.*

## Вступ

Сучасні трактори й автомобілі є складними мехатронними системами, у яких ефективність функціонування гідроприводу, трансмісії, виконавчих механізмів і захисних режимів дедалі більшою мірою визначається станом електронних систем керування, бортових мереж обміну даними, сенсорного поля та програмно-алгоритмічних засобів оброблення інформації. Це означає, що технічний стан сучасної машини не може оцінюватися лише через механічні симптоми несправності або шляхом епізодичного сервісного контролю. Стан системи формується як результат взаємодії механічних, гідравлічних, електричних та інформаційних процесів, а тому методи діагностики повинні враховувати цю багатофакторну природу об'єкта [1–4, 15–18].

Для тракторної техніки особливе значення має стандартизований обмін даними в межах ISO 11783, який регламентує інформаційну взаємодію між трактором, датчиками, виконавчими елементами, органами керування та сумісними машинами. Для транспортних засобів автомобільного призначення аналогічне значення мають бортові електронні мережі, датчикові комплекси й телематичні канали, що забезпечують накопичення експлуатаційної інформації. Саме тому цифрове середовище мобільної машини слід розглядати не лише як засіб керування, а і як джерело даних для прогнозного оцінювання технічного стану [1–6].

У міжнародних оглядах із прогнозного технічного обслуговування доведено, що для складних технічних систем найбільш перспективним є перехід від фіксації факту відмови до оцінювання траєкторії зміни параметрів, ознак деградації та ризику відмови. Такий підхід особливо важливий для електронних систем керування гідроприводом і трансмісією, оскільки їхня несправність часто розвивається поступово: від дрейфу сигналу датчика чи нестійкості тискового процесу до стійкого порушення режиму функціонування [1–4, 9–14].

У вітчизняних публікаціях цей висновок знаходить безпосереднє продовження. У матеріалах ХНАДУ показано, що електронні системи керування сучасних автомобілів потребують комплексного діагностування, оскільки функціональна взаємозалежність між електронними блоками, сенсорами й виконавчими елементами ускладнює традиційну сервісну локалізацію несправностей. У роботах ДБТУ доведено, що інформаційні технології та вбудовувані інтелектуальні засоби розширюють функціональні можливості тракторів і створюють методичне підґрунтя для переходу до більш адаптивних систем керування й діагностики [15–17].

Особливої уваги потребують праці, присвячені вібраційному та акустичному аналізу трансмісій. Нове дослідження 2025 року показує, що прогнозування технічного стану автомобільних трансмісій на основі інтегрованого аналізу вібраційних і акустичних характеристик у поєднанні з чисельним моделюванням перехідних процесів та методами штучного інтелекту дає можливість виявляти дефекти на ранніх стадіях розвитку. Це положення має принципове значення, оскільки підтверджує доцільність

включення віброакустичного каналу до складу ретрофітної системи предиктивної діагностики [18].

Таким чином, актуальною є побудова інтелектуальної ретрофітної системи, здатної інтегруватися в наявну електронну архітектуру тракторів і автомобілів, поєднувати телематичний моніторинг, багатоканальний аналіз сигналів, моделювання динамічних процесів і методи машинного навчання для раннього виявлення деградації електронних систем керування гідروприводом і трансмісією [1–18].

### **Постановка проблеми**

Основна проблема полягає в тому, що штатні засоби бортової діагностики, навіть за високого рівня електронізації транспортного засобу, у більшості випадків орієнтовані на виявлення вже сформованого порушення або на фіксацію перевищення наперед заданого порога. Такий підхід не забезпечує достатньої чутливості до ранніх стадій деградації, коли параметри ще не вийшли за допустимі межі, але їхня часова структура вже свідчить про відхилення від нормального функціонування [1–4, 9–14].

Для електронних систем керування гідроприводом і трансмісією це означає, що дрейф сигналів датчиків, зміна швидкості реакції клапанів, внутрішні витоки, порушення форми тискового імпульсу, зростання ковзання, поява атипових вібраційних та акустичних компонентів можуть тривалий час накопичуватися без формування чіткого аварійного індикатора. За таких умов регламентне обслуговування втрачає прогностичну цінність, а сервісне втручання нерідко відбувається вже після відчутного зниження надійності вузла [12–14, 18].

Ситуація ускладнюється тим, що значна частина наявного парку машин не розрахована на вбудовані системи поглибленої прогнозної діагностики. Отже, науково й технічно доцільним є саме ретрофітний підхід, за якого діагностичний та аналітичний контур формується поверх уже існуючої архітектури машини. Це вимагає визначення набору інформативних параметрів, побудови багаторівневої архітектури збору й аналізу даних, розроблення принципів поєднання мережевої, сенсорної, віброакустичної та модельної інформації [5–8, 15–18].

Метою статті є обґрунтування науково-технічних засад побудови інтелектуальної ретрофітної системи предиктивної діагностики електронних систем керування гідроприводом і трансмісією тракторів та автомобілів на основі телематичного моніторингу, інтегрованого аналізу сигналів і методів машинного навчання.

Для досягнення цієї мети необхідно визначити обмеження традиційної діагностики; встановити найбільш інформативні параметри гідроприводу й трансмісії; обґрунтувати роль телематики та віброакустичного контролю; сформулювати архітектурні вимоги до ретрофітної системи; показати місце моделювання перехідних процесів і методів машинного навчання в діагностичному контурі; довести технічну й економічну доцільність ретрофітного впровадження [1–18].

### **Результати дослідження**

Аналіз джерел дає підстави стверджувати, що предиктивна діагностика електронних систем керування гідроприводом і трансмісією має розглядатися як багаторівнева задача, у якій діагностичний висновок не зводиться до одиничного симптому. Він формується як результат узгодженого аналізу часових рядів, режимного контексту, фізичного змісту параметрів і прогнозної інтерпретації їх зміни. Саме такий підхід відповідає висновкам систематичних оглядів із прогнозного технічного обслуговування, у яких доведено необхідність поєднання статистичних, експертних і заснованих на даних методів [1–3].

У прикладному сенсі це означає, що система повинна працювати не тільки з уже сформованими ознаками несправності, а й з тонкими відхиленнями структури сигналів: зміною тривалості перехідного процесу, зміною фронтів тиску, нестабільністю струмового навантаження, зміною спектрального складу вібрацій або появою акустичних маркерів аномального контакту елементів трансмісії. Чим раніше вдається виявити такі зміни, тим вищою є прогностична цінність діагностичної системи [9–14, 18].

Обґрунтовано, що інтелектуальна ретрофітна система повинна містити щонайменше чотири взаємопов'язані рівні. Перший рівень — бортовий, де здійснюється знімання сигналів зі штатних електронних блоків керування, CAN- та ISOBUS-інтерфейсів, а також з додаткових сенсорів. Другий рівень — телематичний, який забезпечує часову синхронізацію, первинну перевірку якості сигналів, фільтрацію та передавання даних. Третій рівень — аналітичний, де формуються діагностичні ознаки, виявляються аномалії, класифікуються режими деградації та оцінюється ризик розвитку відмови. Четвертий рівень — сервісно-інтерпретаційний, призначений для видачі пояснюваних висновків та підтримки рішень щодо технічного обслуговування [1–8].

Ретрофітний характер системи означає, що діагностичні функції не вбудовуються наново в базову архітектуру машини, а інтегруються поверх наявної структури через сумісні інтерфейси доступу до даних. Такий підхід дозволяє уникнути радикального втручання в серійну конструкцію, зменшити вартість модернізації та забезпечити масштабованість рішення для парку машин різного року випуску й різних виробників. Для тракторної техніки це особливо важливо через широку неоднорідність реалізації інформаційних функцій та агрегованих систем, а для автомобілів — через наявність розвинених електронних мереж, які доцільно доповнювати, а не заміщати [5–8, 15–17].

Встановлено, що для електронних систем керування гідроприводом найбільш інформативними є параметри тиску в магістралях, швидкість його наростання та спаду, амплітуда пульсацій, температурний режим робочої рідини, споживаний струм соленоїдів, напруга живлення та часовий лаг між керувальним сигналом і фактичним спрацюванням виконавчого елемента. Для трансмісійних систем додаткового значення набувають швидкості валів, коефіцієнт ковзання, тривалість перемикавання, форма тискового імпульсу, повторюваність режимних циклів та енергетичні параметри перехідних процесів [11–14].

Водночас одного лише електричного або гідравлічного каналу недостатньо. Праці з аналізу стану гідросистем показують, що коректне діагностування потребує багатоканального підходу: різні сенсори відображають різні аспекти дефектоутворення, а інформативність проявляється саме в їх поєднанні. Звідси випливає, що ретрофітна система повинна працювати з багатоканальними часовими рядами, а не з ізольованими одиничними параметрами [9–11, 14].

Суттєве розширення діагностичних можливостей досягається шляхом включення вібраційних і акустичних характеристик до загального діагностичного контуру. На відміну від параметрів, які фіксують уже наслідок порушення режиму, вібраційні та акустичні сигнали часто відображають початкові зміни в контакті деталей, роботі підшипників, зубчастих зачеплень, муфт і гідромеханічних вузлів. Саме тому вони придатні для раннього виявлення дефектів, коли відхилення в тиску, температурі або струмі ще не досягли виразного рівня [14, 18].

У статті І. О. Шевченка, М. Г. Макаренка, О. В. Блезнюка показано, що інтегрований аналіз вібраційних і акустичних характеристик у поєднанні з моделюванням перехідних процесів дає змогу ідентифікувати дефекти на ранніх стадіях і підвищити точність прогнозування залишкового ресурсу. Для даної теми це має методичне значення, оскільки воно доводить, що ретрофітна система повинна

враховувати не лише мережеві та сенсорні дані низької частоти, а й високочастотні коливальні сигнали, які несуть приховану інформацію про стан трансмісійного вузла [18].

Щільніша аргументація потребує окремого виділення ролі моделювання перехідних процесів. Саме перехідні режими — перемикання, розгін, гальмування, зміна навантаження, короткочасні режими стабілізації тиску — найкраще виявляють відмінність між технічно справним і деградованим вузлом. У цих режимах проявляються зміни тривалості переходу, форми тискового імпульсу, коливальності відгуку, енергетичного розсіювання та часової неузгодженості між керувальною дією і реакцією системи [12, 13, 18].

Моделювання перехідних процесів дозволяє сформувати еталонні траєкторії поведінки системи для різних режимів функціонування. Порівняння реального сигналу з модельно очікуваним створює підстави для формування так званих модельно-залишкових ознак, які мають високу діагностичну цінність. Якщо система демонструє систематичне відхилення від модельного переходу, це можна інтерпретувати як ознаку деградації навіть тоді, коли абсолютні значення параметрів лишаються в допустимих межах [12, 13, 18].

Для предиктивної діагностики недостатньо просто накопичувати сигнали. Важливо встановити, у якому режимі вони отримані. Один і той самий тиск, одна й та сама температура або інтенсивність вібрації можуть бути нормальними або аномальними залежно від навантаження, швидкості, профілю маршруту, типу виконуваної операції та зовнішніх умов. Роботи з телематики сільськогосподарських машин показують, що поєднання даних CAN-шини та супутникового позиціонування дозволяє виділяти робочі стани машини й тим самим суттєво підвищувати коректність інтерпретації діагностичних сигналів [7, 8].

Отже, телематичний модуль слід розглядати не як простий канал передавання інформації, а як механізм контекстуалізації. До його функцій повинні належати часові мітки, сегментація режимів, зіставлення параметрів із фазами робочого циклу та відбір фрагментів даних для поглибленого аналізу. Саме така організація даних забезпечує зменшення кількості хибних спрацювань і дає змогу виявляти слабкі симптоми деградації в прив'язці до конкретного режиму роботи [1–3, 7, 8].

Узагальнення сучасних публікацій дозволяє дійти висновку, що для задач предиктивної діагностики найбільш доцільним є поєднання кількох груп моделей. Перша група — моделі виявлення аномалій, які придатні в умовах неповної розмітки дефектних станів. Друга — моделі класифікації типових несправностей. Третя — прогностичні моделі, орієнтовані на оцінювання ризику відмови та залишкового ресурсу. Саме багатомодельний підхід у сучасній літературі розглядається як найбільш адекватний для складних технічних систем [1–3].

Для гідросистем і трансмісій додатково доведено ефективність багатосенсорних глибоких моделей, здатних одночасно виділяти інформативні ознаки, виконувати відбір значущих каналів і класифікувати стани системи. Це особливо важливо для ретрофітних рішень, де дані надходять із різномірних джерел і мають різну якість. Вітчизняні праці про використання штучного інтелекту у вбудовуваних системах тракторів підтверджують, що інтелектуальні алгоритми можуть розглядатися як реальний елемент архітектури мобільної машини, а не лише як зовнішній експериментальний інструмент [9–11, 14, 16].

Водночас для сервісної практики принципово важливо, щоб моделі машинного навчання були пов'язані з фізичним змістом параметрів. Практична користь системи виникає лише тоді, коли інженер отримує не абстрактний результат класифікації, а інтерпретований висновок про ймовірне джерело деградації: нестабільність тискового

фронту, збільшення часу реакції клапана, атипову спектральну складову вібрації, акустичну ознаку порушення роботи зубчастого зачеплення тощо [4, 14, 18].

Для машин, що працюють у полі або на маршруті, критичним є поєднання низької затримки та стійкості обміну даними. На цій підставі найбільш доцільною є гібридна архітектура, у якій частина операцій виконується на периферійному рівні, а частина — у централізованому середовищі. На борту або на периферійному вузлі доцільно здійснювати первинну фільтрацію, формування агрегованих ознак, виявлення грубих аномалій і формування попереджень. У центральному середовищі доцільно виконувати донавчання моделей, довгостроковий аналіз історії та міжмашинне порівняння [10].

Якщо система включає віброакустичний канал, значення периферійної обробки додатково зростає, оскільки високочастотні сигнали істотно збільшують обсяг даних. Тому раціонально передавати не повний необроблений потік, а вже виділені ознаки: спектральні індикатори, енергетичні коефіцієнти, часові характеристики перехідних процесів і показники відхилення від модельного режиму. Це дозволяє поєднати високу інформативність із прийнятними вимогами до каналу зв'язку та обчислювальних ресурсів [10, 18].

Ретрофiтний підхід є технічно та економічно виправданим насамперед для машин із достатнім залишковим ресурсом, для яких повна модернізація електронної архітектури є надто дорогою або конструктивно складною. Додавання телематичного шлюзу, розширення сенсорного поля в критичних точках та впровадження інтелектуального аналітичного контуру дозволяють значно підвищити діагностичні можливості без радикальної зміни серійної конструкції [7, 8, 15–17].

Практична значущість такого підходу полягає в переході від регламентного обслуговування за напрацюванням до сервісу за фактичним і прогнозованим станом. Для аграрної техніки це означає зменшення ризику простою в сезон пікових навантажень. Для автомобілів — скорочення непродуктивних простоїв і підвищення точності технічних рішень щодо ремонту. Для сервісних організацій — накопичення уніфікованих масивів даних, які можна використовувати для підвищення точності моделей на рівні всього парку машин [1–4, 7, 8, 18].

## **Висновки**

У статті обґрунтовано доцільність побудови інтелектуальної ретрофiтної системи предиктивної діагностики електронних систем керування гідроприводом і трансмісією тракторів та автомобілів на основі телематичного моніторингу, віброакустичного контролю, моделювання перехідних процесів і методів машинного навчання. Установлено, що традиційні засоби штатної діагностики та регламентного сервісу не забезпечують достатньої чутливості до передвідмовних станів у складних електрогідравлічних і трансмісійних підсистемах.

Доведено, що найбільш інформативною основою для предиктивної оцінки технічного стану є багатоканальні часові ряди, сформовані за сигналами штатних мережевих інтерфейсів, додаткових сенсорів, а також вібраційних і акустичних каналів та синхронізовані з експлуатаційним контекстом. Обґрунтовано, що саме поєднання мережевих, гідравлічних, електричних, коливальних і модельно-залишкових ознак дає змогу підвищити чутливість системи до ранніх стадій деградації.

Обґрунтовано, що ретрофiтний підхід є технічно й економічно виправданим для машин із достатнім залишковим ресурсом, оскільки забезпечує розширення функціоналу діагностики без радикального втручання в базову конструкцію. Визначено, що найбільш раціональною є багаторівнева архітектура, яка поєднує бортовий збір даних, телематичний контур, периферійну та централізовану аналітичну обробку, моделі виявлення аномалій, класифікації дефектів і прогностичні модулі.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у зменшенні аварійних простоїв, підвищенні точності сервісних рішень і створенні передумов для переходу до прогнозно-орієнтованого технічного обслуговування. Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення пояснюваних діагностичних моделей, адаптивних алгоритмів оцінювання залишкового ресурсу та методик галузевого впровадження для парків машин різного призначення.

#### **Список використаних джерел**

1. Theissler A., Pérez-Velázquez J., Kettelgerdes M., Elger G. Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 215. Art. 107864. DOI: 10.1016/j.res.2021.107864.
2. Arena F., Collotta M., Luca L., Ruggieri M., Termine F. G. Predictive Maintenance in the Automotive Sector: A Literature Review // *Mathematical and Computational Applications*. 2022. Vol. 27, no. 1. Art. 2. DOI: 10.3390/mca27010002.
3. Montero Jimenez J. J., Schwartz S., Vingerhoeds R., Grabot B., Salaün M. Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics // *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 56. P. 539–557. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.07.008.
4. Hossain M. N., Rahman M. M., Ramasamy D. Artificial Intelligence-Driven Vehicle Fault Diagnosis to Revolutionize Automotive Maintenance: A Review // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2024. Vol. 141, no. 2. DOI: 10.32604/cmcs.2024.056022.
5. ISO 11783-1:2017. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network — Part 1: General standard for mobile data communication. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
6. ISO 11783-12:2019. Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network — Part 12: Diagnostics services. Geneva: International Organization for Standardization, 2019.
7. Lajunen A., Hovio H. Development of a low-cost telematics system for smart farming operations // 2024 ASABE Annual International Meeting, Anaheim, California, July 28–31, 2024. Paper No. 2401057. DOI: 10.13031/aim.202401057.
8. Bettucci F., Sozzi M., Benetti M., Sartori L. A data-driven approach to agricultural machinery working states analysis during ploughing operations // *Smart Agricultural Technology*. 2024. Vol. 8. Art. 100511. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100511.
9. König C., Helmi A. M. Sensitivity Analysis of Sensors in a Hydraulic Condition Monitoring System Using CNN Models // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 11. Art. 3307. DOI: 10.3390/s20113307.
10. Fawwaz D. Z., Chung S.-H. Real-Time and Robust Hydraulic System Fault Detection via Edge Computing // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 17. Art. 5933. DOI: 10.3390/app10175933.
11. Tao H., Jia P., Wang X., Wang L. Real-Time Fault Diagnosis for Hydraulic System Based on Multi-Sensor Convolutional Neural Network // *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 2. Art. 353. DOI: 10.3390/s24020353.
12. Xue L., Jiang H., Zhao Y., Wang J., Wang G., Xiao M. Fault diagnosis of wet clutch control system of tractor hydrostatic power split continuously variable transmission // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 194. Art. 106778. DOI: 10.1016/j.compag.2022.106778.
13. Wang G., Xue L., Zhu Y., Zhao Y., Jiang H., Wang J. Fault diagnosis of power-shift system in continuously variable transmission tractors based on improved echo state network // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 126. Art. 106852. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106852.

14. Yang Y., Ding L., Xiao J., Fang G., Li J. Current Status and Applications for Hydraulic Pump Fault Diagnosis: A Review // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 24. Art. 9714. DOI: 10.3390/s22249714.

15. Макаренко М. Г., Шевченко І. О., Хейло В. О., Пиріжок В. І. Електронні системи керування та діагностики сучасних автомобілів: проблеми і рішення // Збірник тез та доповідей міжнародної конференції «Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії». 11–12 березня 2024 року. Харків: ХНАДУ, 2024. С. 274–278.

16. Макаренко М. Г., Пиріжок В. І. Використання штучного інтелекту у вбудованих системах сільськогосподарських тракторів // Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XX Міжнар. форуму молоді, 4–5 квіт. 2024 р. Харків: ДБТУ, 2024. С. 192.

17. Макаренко М. Г., Калашник Є. А. Роль інформаційних технологій у вдосконаленні функціональних можливостей блочно-модульних тракторів // Технічний прогрес в АПВ: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 21–22 травня 2024 р. Харків: ДБТУ, 2024. С. 67–68.

18. Шевченко І. О., Макаренко М. Г., Блезнюк О. В. Прогнозування технічного стану автомобільних трансмісій на основі інтегрованого аналізу вібраційних і акустичних характеристик із застосуванням передових методів штучного інтелекту та моделювання перехідних процесів // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. 2025. № 26. С. 149–162.

Отримано: 01.04.2026. Прийнято: 07.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.