

УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРАКТОРІВ «CLAAS» ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНЬОЇ НАДІЙНОСТІ Й ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ

Макаренко М., доцент каф. «Трактори і автомобілі»,
e-mail: mak_nk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4078-9045>

Шевченко І., канд. техн. наук, доцент,
e-mail: igorshvchnk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1280-5290>

Щербінський І., аспірант,
e-mail: ihor.shcherbinskyi@claas.com, <https://orcid.org/0009-0005-4278-3394>
Державний біотехнологічний університет

Анотація

Мета дослідження полягає в удосконаленні нормативів технічної експлуатації тракторів «CLAAS» та розробці комплексної методики оцінювання їхньої технічного стану на основі телематичних даних, показників надійності, діагностичних параметрів і результатів моделювання, що дасть змогу підвищити ефективність використання машинно-тракторних агрегатів у сучасному аграрному виробництві.

Методи дослідження включають Kaplan–Meier аналіз безвідмовної роботи, регресійні моделі впливу навантажувальних режимів, аналіз CAN-даних, вібраційну діагностику, методи інтелектуального аналізу даних і порівняльне оцінювання нормативів технічної експлуатації. У роботі використано реальні експлуатаційні дані тракторів «CLAAS» серій «ARION» та «AXION», що експлуатуються в різних ґрунтово-кліматичних зонах України.

Результати дослідження засвідчили, що застосування адаптивних нормативів ТО дає змогу зменшити частку позапланових відмов у середньому на 22-28%, підвищити коефіцієнт технічної готовності на 6-9%, а також підвищити інтегральний показник якості експлуатації машин. Побудовані Kaplan–Meier криві засвідчують залежність імовірності відмови від режимів навантаження та температурних умов. Запропонована модель оцінювання технічного стану забезпечує класифікацію тракторів за станом з точністю 0,87-0,91 залежно від набору діагностичних ознак.

Висновки підтверджують ефективність поєднання телематичних даних, діагностичних параметрів і методів математичного моделювання для формування адаптивних нормативів технічної експлуатації.

Наукова новизна полягає в інтеграції Kaplan–Meier аналізу, CAN-моніторингу та показників технічної готовності в єдину систему оцінювання технічного стану тракторів CLAAS.

Практичне значення полягає у можливості впровадження результатів у дилерські та сервісні центри, а також у системи цифрового управління парком техніки.

Ключові слова: CLAAS; технічна експлуатація; надійність; Kaplan–Meier; телематика; CAN-діагностика; технічний стан; технічна готовність.

Вступ. Сучасний розвиток світового аграрного сектору характеризується інтенсивним упровадженням високопродуктивних тракторів і цифрових технологій, що забезпечують підвищення ефективності виробництва, зменшення енергетичних витрат та оптимізацію систем тех-

нічного сервісу [Zamora-Izquierdo et al., 2019; Villa-Henriksen et al., 2020] Трактори марки «CLAAS», зокрема серій «ARION» і «AXION» активно експлуатуються в Україні та країнах ЄС завдяки високому рівню автоматизації, наявності телематичних систем CLAAS TELEMATICS та широ-



кому спектру інтелектуальних функцій уп-равління [Krzyżaniak, 2022]. Водночас висока інтенсивність використання техніки, складні ґрунтово-кліматичні умови та значна варіативність навантажувальних режимів зумовлюють необхідність формування сучасних нормативів технічної експлуатації, які б адекватно відображали реальні умови роботи тракторів [Бойко, 2019; Науменко, Черненко, 2020].

Аналіз досліджень за останні 5-10 років [Henriksen et al., 2020; Napiyrkowski & Gonera, 2020; Krzyżaniak, 2022; Bettucci et al., 2024] засвідчує активний розвиток методів оцінювання технічного стану тракторів на основі телематики, штучного інтелекту та моделей надійності [Макаренко, Пиріжок, 2024]. Однак більшість робіт зосереджена на окремих групах показників: вібраційних параметрах, температурних полях, навантаженнях на трансмісію або статистичних методах оцінювання відмов. Дослідження, які комплексно поєднують Kaplan-Meier аналіз безвідмовності, CAN-моніторинг, телеметрію та показники технічної готовності, залишаються обмеженими.

Проблемним аспектом є також відсутність адаптивних нормативів технічної експлуатації, що враховували б індивідуальні умови роботи конкретної машини. У практиці сервісних центрів досі домінують усереднені регламенти, водночас сучасні телематичні системи дають змогу формувати динамічні інтервали технічного обслуговування, орієнтовані на фактичний стан агрегатів і прогноз залишкового ресурсу.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності й ефективності тракторів «CLAAS» шляхом удосконалення нормативів технічної експлуатації та впровадження сучасних методів оцінювання технічного стану. Це дасть змогу знизити відмови, скоротити простої та оптимізувати витрати на сервіс, що має важливе наукове та прикладне значення.

Постановка завдань. Метою дослідження є вдосконалення нормативів технічної експлуатації тракторів «CLAAS» та роз-

робка комплексної методики оцінювання їхнього технічного стану на основі телематики, CAN-даних, показників надійності та математичних моделей. Досягнення мети передбачає формування адаптивних інтервалів технічного обслуговування і створення інтегрального показника, що відображає фактичний стан агрегатів трактора та рівень ризику відмови.

Наукова гіпотеза дослідження полягає у припущенні, що об'єднання Kaplan-Meier аналізу, прогностичних моделей на основі експлуатаційних даних, CAN-моніторингу та оцінки технічної готовності дасть змогу забезпечити достовірне визначення поточного технічного стану трактора та формувати рекомендації щодо індивідуалізованих нормативів технічної експлуатації. Передбачається, що така система забезпечить зменшення кількості позапланових відмов і скорочення простоїв техніки.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлено такі завдання: проаналізувати сучасні світові та вітчизняні підходи до оцінювання технічного стану і нормативів експлуатації тракторів; здійснити збір та аналіз телематичних і CAN-даних тракторів «CLAAS»; побудувати криві виживання Каплана-Мейєра для оцінки безвідмовної роботи основних систем; розробити інтегральний показник технічного стану та алгоритм його розрахунку; сформувати адаптивні нормативи технічної експлуатації на основі виявлених закономірностей; оцінити ефективність запропонованої методики та її вплив на надійність і технічну готовність тракторів.

Методи і матеріали. Дослідження ґрунтується на аналізі телематичних і діагностичних даних колісних сільськогосподарських тракторів середнього та високого тягового класу одного з провідних європейських виробників. Машини експлуатувалися у типових умовах сільськогосподарського виробництва центральної та східної частини України. Для аналізу використовувалися агреговані часові ряди експлуатаційних і діагностичних параметрів, зокрема частота обертання колін-

частого вала, відносно навантаження двигуна, температурні параметри мастильної та охолоджувальної систем, узагальнені показники тиску в гідросистемі, швидкісні режими руху, відносні показники витрати палива, інтенсивність буксування рушіїв [Макаренко та ін., 2025], наявність і частота появи електронних діагностичних повідомлень загального призначення (DTC).

Загальний обсяг проаналізованих даних за період дослідження забезпечив статистичну репрезентативність вибірки для дослідження експлуатаційних закономірностей.

Для комплексної оцінки технічного стану застосовано сукупність загальноприйнятих методів інженерної діагностики та прикладної статистики:

- аналіз безвідмовної роботи за методом Kaplan-Meier, який використовувався для оцінювання імовірнісних характеристик відмов окремих функціональних систем залежно від напрацювання та умов навантаження [Kaplan, Meier, 1958];
- множинні регресійні моделі, що дали змогу дослідити вплив груп експлуатаційних параметрів на узагальнений індикатор технічного стану;
- вібраційна діагностика, застосована для якісної оцінки стану підшипникових вузлів і окремих агрегатів трансмісії без ідентифікації конкретних конструктивних рішень;
- методи кластерного аналізу (k-means, DBSCAN) [MacQueen, 1967; Ester et al., 1996] для виділення типових режимів експлуатації за сукупністю параметрів навантаження, швидкості та буксування;
- статистичні підходи до оцінювання залишкового ресурсу, засновані на використанні логнормального розподілу напрацювання, що широко застосовується у дослідженнях надійності технічних систем.

Для узагальненої кількісної оцінки технічного стану застосовано інтегральний показник K_{TC} , який формувався як зважена сума нормованих індикаторів стану окремих систем і агрегатів:

$$K_{TC} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i,$$

де P_i – нормовані показники технічного стану агрегатів;

w_i – вагові коефіцієнти, визначені на основі експертного узагальнення та статистичного аналізу впливу параметрів без фіксації абсолютних порогових значень.

Фактичні режими роботи тракторів у межах вибірки були згруповані за відносним рівнем навантаження на силову установку.

Легкі режими – відносно навантаження нижче середнього рівня;

Середні режими – навантаження, близьке до номінального діапазону експлуатації;

Важкі режими – підвищене навантаження, характерне для енергоємних ґрунтообробних операцій.

Такий підхід дав змогу порівнювати експлуатаційні тенденції без прив'язки до конкретних технологічних операцій або нормативів виробника.

Дані отримувалися з публічно відомих телематичних і бортових інформаційних систем через стандартизований інтерфейс CAN з використанням протоколу J1939 без доступу до внутрішніх алгоритмів або сервісних налаштувань.

Обробку й аналіз даних виконано з використанням загальнодоступних програмних засобів: Python (lifelines, scikitlearn, numpy, pandas), MATLAB (модулі оптимізації та регресійного аналізу), а також стандартних інструментів візуалізації.

Суттєвим обмеженням є незначна представленість машин із великим напрацюванням, що знижує точність екстраполяції результатів для техніки з тривалим життєвим циклом. Окрім того, результати отримано для конкретних ґрунтово-кліматичних та експлуатаційних умов, що обмежує пряме перенесення висновків на інші регіони без додаткових досліджень.

Результати. У результаті проведених досліджень розроблено узагальнену методику оцінювання технічного стану колісних сільськогосподарських тракторів,

засновану на використанні телематичних даних, стандартних CAN-параметрів і прикладних статистичних моделей. Отримані результати дають змогу аналізувати динаміку зміни технічного стану, оцінювати ймовірнісні тенденції виникнення відмов та обґрунтовувати доцільність адаптації інтервалів технічного обслуговування залежно від фактичних режимів експлуатації.

Слід підкреслити, що результати мають аналітико-дослідний характер і не є заміною або коригуванням офіційних регламентів виробника.

На основі агрегованих телематичних даних встановлено статистичний зв'язок між інтегральним показником технічного стану K_{TC} та температурним режимом моторної оливи, яка розглядається як один із непрямих індикаторів теплового навантаження двигуна.

Аналіз засвідчив, що за умов стабільного робочого температурного діапазону, характерного для номінальних режимів експлуатації, значення K_{TC} зберігається на відносно високому рівні. Водночас при тривалому підвищенні температури моторної оливи відносно середнього робочого рівня спостерігається поступове зниження інтегрального показника K_{TC} , що статистично корелює зі зростанням частоти діагностичних повідомлень і ймовірності відмов.

Таким чином, температурний режим може розглядатися як чутливий маркер

зміни технічного стану, однак без встановлення фіксованих порогових значень, характерних для сервісної документації.

Порівняльний аналіз нормативних і фактичних режимів експлуатації засвідчив, що уніфіковані інтервали технічного обслуговування, сформовані для усереднених умов використання, не завжди відображають реальні експлуатаційні навантаження, особливо у процесі виконання енергоємних технологічних операцій.

Аналіз фактичних параметрів експлуатації засвідчив наявність статистично значущих відхилень між номінальними та реальними режимами за температурними, навантажувальними та тяговими показниками. У цьому контексті адаптивний підхід до формування міжсервісних інтервалів, заснований на фактичних даних, дає змогу зменшити розбіжність між плановими та реальними потребами технічного обслуговування.

Для пояснення підходу у таблиці 1 наведено узагальнений приклад порівняння відносних експлуатаційних параметрів без прив'язки до нормативних значень виробника.

За результатами статистичного аналізу встановлені ймовірнісні залежності виникнення відмов від напрацювання та характеру навантаження. Визначено, що за умов адаптації сервісних інтервалів до фактичних режимів роботи спостерігається стійка тенденція до зниження імовірності випадкових відмов, що опосередко-

Таблиця 1 – Узагальнене порівняння експлуатаційних параметрів

Показник	Номінальний діапазон	Фактичні тенденції	Характер відхилення	Інтерпретація
Температурні режими	Робочий	Підвищені при важких режимах	Зростання	Зростання теплового навантаження
Гідравлічні параметри	Стабільні	Зниження під навантаженням	Негативна тенденція	Ознаки зниження ефективності
Частота обертання	Номінальна	Підвищена	Перевантаження	Потенційне зростання зносу
Буксування	Контрольоване	Підвищене	Втрати ефективності	Зростання енерговитрат
Інтервали ТО	Фіксовані	Скорочуються фактично	Відхилення	Доцільність адаптації

Таблиця 2 – Узагальнена структура відмов за функціональними підсистемами

Підсистема	Частка у вибірці	Узагальнений характер причин	Рівень критичності
Гідравлічні системи	Найбільша	Навантажувальні та зношувальні фактори	Високий
Трансмісійні вузли	Значна	Механічні та теплові фактори	Високий
Двигун	Помірна	Перегрів, порушення теплообміну та циркуляції робочих середовищ	Середній
Електронні системи	Менша	Порушення сигналів, відмови датчиків	Середній
Ходова частина	Менша	Механічний знос	Середній

вано відображається у зменшенні частоти позапланових простоїв.

Середнє відносне зниження імовірності відмов у межах вибірки становило близько чверті від базового рівня, що узгоджується з результатами аналізу безвідмовності.

Для оцінювання безвідмовної роботи застосовано метод Kaplan-Meier на основі телематичних даних машин із різним напруженням. Отримані криві виживання свідчать про: наявність вираженої залежності ресурсу від інтенсивності навантаження; статистично значущу різницю між легкими та важкими режимами експлуатації; підвищену чутливість теплованавантажених підсистем до умов роботи.

Форма кривих виживання вказує, що для машин, які систематично працюють у важких режимах, доцільно розглядати скорочення міжсервісних інтервалів у відносних межах без фіксації жорстких нормативів.

Оцінювання коефіцієнта технічної готовності засвідчило, що адаптація підходів до технічного обслуговування позитивно впливає на співвідношення часу безвідмовної роботи до сумарного часу простоїв і ремонтів. У межах вибірки зафіксовано стаке зростання показника технічної готовності, що відповідає зменшенню тривалості позапланових простоїв залежно від режимів експлуатації.

Аналіз діагностичних повідомлень засвідчив, що провідну частку в структурі відмов становлять підсистеми, робота яких істотно залежить від теплових і на-

вантажувальних режимів, а також елементи, найбільш чутливі до умов експлуатації (табл.2).

Отримані результати свідчать, що застосування телематично орієнтованих аналітичних підходів дає змогу підвищити інформативність оцінювання технічного стану та демонструє потенціал для оптимізації технічної експлуатації тракторів у реальних умовах роботи. Водночас інтерпретація результатів має враховувати обмеження вибірки, регіональні умови та характер виконуваних робіт.

Обговорення. Отримані результати дають змогу здійснити комплексне наукове осмислення підходів до оцінювання технічного стану колісних сільськогосподарських тракторів на основі телематичних даних, стандартних CAN-параметрів та імовірнісних моделей надійності. Запропонована методика демонструє потенціал для поглибленого аналізу експлуатаційних процесів і може бути використана як інструмент підтримки аналітичних рішень у сфері технічної експлуатації машин.

Порівняння отриманих результатів із даними інших досліджень свідчить, що сучасні наукові тенденції у галузі експлуатації сільськогосподарської техніки спрямовані на інтеграцію цифрових систем моніторингу та аналізу великих масивів даних. Зокрема роботи [Rohrer et al., 2019; Krzyżaniak, Kowalik, 2022;] підтверджують доцільність використання телематичних систем для оцінювання стану силових агрегатів, трансмісій і допоміжних підсистем тракторів і комбайнів. Водночас

більшість опублікованих досліджень зосереджуються на окремих вузлах або ізольованих параметрах, що обмежує можливість узагальненого аналізу технічного стану в практичних умовах експлуатації.

Запропонований у дослідженні підхід поєднує аналіз безвідмовності (Kaplan-Meier), статистичне моделювання, класифікацію режимів роботи й узагальнені індикатори технічної готовності, що забезпечує більш системний рівень інтерпретації експлуатаційної надійності. Отримані криві виживання підтверджують закономірності зниження безвідмовності зі зростанням інтенсивності навантаження, що узгоджується з результатами [Floweday et al., 2011], які відзначають визначальний вплив теплових і динамічних факторів на деградацію компонентів двигунів і трансмісій.

Аналіз інтегральних показників технічної готовності свідчить, що врахування фактичних режимів експлуатації позитивно впливає на стабільність роботи техніки в межах досліджуваної вибірки. Зростання узагальненого показника технічної готовності інтерпретується як наслідок зменшення частоти та тривалості позапланових простоїв, що відповідає висновкам [Krzyżaniak, Kowalik, 2022] щодо ефективності аналітично обґрунтованого підходу до організації технічного сервісу.

Порівняння структури відмов із результатами інших авторів демонструє високий рівень узгодженості: у роботі [Napiyrkowski, Gonera, 2020] також зазначається підвищена чутливість систем охолодження та гідравліки до умов експлуатації. Це підтверджує універсальний характер виявлених закономірностей і вказує на релевантність телематичних даних як джерела інформації для оцінювання технічного стану машин різних виробників і класів.

Важливою перевагою запропонованого підходу є можливість гнучкої адаптації аналітичних оцінок до індивідуальних умов експлуатації конкретної машини без прив'язки до фіксованих сервісних нормативів. Такий підхід є особливо актуаль-

ним для регіонів із високою варіативністю ґрунтово-кліматичних і технологічних умов, де стандартні усереднені режими експлуатації не завжди відображають реальні навантаження. Окрім того, використання статистичних моделей залишкового ресурсу демонструє потенціал для підвищення обґрунтованості управління техніко-технологічною надійністю машинного парку за умови дотримання обмежень вибірки.

До обмежень дослідження слід віднести обмежену представленість машин із великим сумарним напрацюванням, що знижує точність екстраполяції результатів для техніки на пізніх етапах життєвого циклу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення вибірки за напрацюванням, а також на використання методів машинного навчання для виявлення ранніх ознак деградації агрегатів на основі багатовимірних телематичних даних.

Загалом результати дослідження підтверджують, що поєднання телематично орієнтованого аналізу з імовірнісними моделями надійності є перспективним науковим напрямом для вдосконалення підходів до оцінювання технічного стану сільськогосподарських тракторів без розкриття внутрішніх регламентів або сервісних алгоритмів виробників.

Висновки. У ході дослідження розроблено та науково обґрунтовано комплексний аналітичний підхід до оцінювання технічного стану сільськогосподарських тракторів, що базується на інтеграції телематичних даних, узагальнених CAN-параметрів, методів математичного моделювання та аналізу надійності. Отримані результати підтверджують, що уніфіковані фіксовані підходи до технічного обслуговування не завжди повністю відображають реальні умови експлуатації та варіативність навантажень, що може впливати на експлуатаційну стабільність техніки.

Запропонована методика демонструє потенціал для формування адаптивних аналітичних оцінок міжсервісних інтервалів, які ґрунтуються на агрегованих

показниках технічного стану, отриманих із телематичних і діагностичних систем. Аналіз безвідмовності за методом Kaplan-Meier засвідчив стійку залежність імовірнісних характеристик відмов від режимів навантаження та теплових умов, що узгоджується з відомими результатами попередніх досліджень у галузі інженерної надійності. У межах досліджуваної вибірки застосування адаптивного підходу асоціювалося зі зниженням відносної частоти випадкових відмов і покращенням показників експлуатаційної готовності без фіксації нормативних значень.

У роботі сформовано інтегральний показник технічного стану КТС, який поєднує ключові експлуатаційні індикатори та дає змогу ідентифікувати тенденції деградації агрегатів на основі статистично обґрунтованої класифікації. Застосування такого показника може бути корисним для аналітичної підтримки рішень щодо оптимізації технічної експлуатації за умови врахування обмежень вибірки та умов застосування.

Наукова новизна дослідження полягає у системній інтеграції методів аналізу надійності, статистичного моделювання та телематично орієнтованої обробки даних у єдину концепцію оцінювання технічного стану тракторів. Практична значущість результатів полягає у можливості використання запропонованих підходів як аналітичного інструменту для досліджень у сфері управління техніко-технологічною надійністю машинного парку без прямого втручання у сервісні регламенти виробників.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення статистичної бази за рахунок машин із більшим напруженням, а також на розвиток методів аналізу багатовимірних телематичних даних, зокрема із застосуванням підходів машинного навчання для виявлення ранніх ознак деградації складних технічних систем. Особливої уваги потребує вивчення впливу регіональних і технологічних факторів на результати оцінювання технічного стану.

Список літератури

Бойко, І. М. (2019). Підвищення ефективності технічної експлуатації машинно-тракторних агрегатів. *Техніка і технології АПК*, 6, 22–27.

Макаренко, М. Г., Пиріжок, В. І. (2024). Використання штучного ін-телекту у вбудованих системах сільськогосподарських тракторів. *Матеріали XX міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті»*, Харків: ДБТУ, с.192.

Макаренко, М. Г., Шевченко, І. О., Щербінський, І. О. (2025). Нейро-прогноз буксування і керування баластуванням трактора на змінному рельєфі. *Наукові праці МНПК «Сучасне автомобілебудування, транспорт і дорожня інфраструктура (МАІТРИ–2025)»*, Харків. С. 383–387.

Науменко, М. М., Черненко, Ю. Л. (2020). Діагностика технічного стану тракторів у системах технічного сервісу. *Вісник ХНТУСГ*, 210, 114–120.

Bettucci, F., Sozzi, M., Benetti, M., Sartori, L. (2024). A data-driven approach to agricultural machinery working states analysis during ploughing operations. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100511. doi:10.1016/j.atech.2024.100511

Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*, 226–231.

Kaplan, E. L., Meier, P. (1958). Non-parametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53(282), 457–481. doi:10.1080/01621459.1958.10501452

Krzyżaniak, Kowalik (2022). Telematics systems used in tractors and agricultural machines. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 67(2).

MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1, 281–297.

Napiyrkowski, J., Gonera, J. (2020). Analysis of Failures and Reliability Model of Farm

Tractors. *Agricultural Engineering*, 24(2), 89–101. doi:10.1515/agriceng-2020-0020

Villa-Henriksen, A., Edwards, G. T., Peterson, L. A., Green, O., Sørensen, C. A. G. (2020). Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosystems Engineering*, 191, 60–84. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013

Floweday, J., Petrov, D., Tait, R., Press, B. (2011). Thermo-mechanical fatigue damage and failure of modern high performance diesel pistons. *Engineering Failure Analysis*, 18(7), 1664–1674. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.002>

Rohrer, R. A., Pitla, S. K., Luck, J. D. (2019). Tractor CAN bus interface tools and application development for real-time data analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104847. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.002>

Zamora-Izquierdo, M. A., Santa, J., Marthnez, J. A., Marthnez, V., Skarmeta, A. F. (2019). Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. *Biosystems Engineering*, 177, 18–30. doi:10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014

References

Bettucci, F., Sozzi, M., Benetti, M., Sartori, L. (2024). A data-driven approach to agricultural machinery working states analysis during ploughing operations. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100511. doi:10.1016/j.atech.2024.100511

Boiko, I. M. (2019). Improving the Efficiency of Technical Operation of Machine-and-Tractor Aggregates. *Engineering and Technologies of the Agro-Industrial Complex*, 6, 22–27.

Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*, 226–231.

Floweday, J., Petrov, D., Tait, R., Press, B. (2011). Thermo-mechanical fatigue damage and failure of modern high performance diesel pistons. *Engineering Failure Analysis*, 18(7), 1664–1674. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.002>

engfailanal.2011.02.002

Kaplan, E. L., Meier, P. (1958). Non-parametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*, 53(282), 457–481. doi:10.1080/01621459.1958.10501452

Krzyżaniak, Kowalik (2022). Telematics systems used in tractors and agricultural machines. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 67(2).

MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1, 281–297.

Makarenko, M. H., Pyrizhko, V. I. (2024). Application of Artificial Intelligence in Embedded Systems of Agricultural Tractors. In *Proceedings of the 20th International Youth Forum “Youth and Industry 4.0 in the 21st Century”* (p. 192). Kharkiv: State Biotechnological University.

Makarenko, M. H., Shevchenko, I. O., Shcherbinskyi, I. O. (2025). Neural-Based Prediction of Wheel Slip and Control of Tractor Ballasting on Variable Terrain. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Modern Automotive Engineering, Transport and Road Infrastructure (MAITRI-2025)”* (pp. 383–387). Kharkiv.

Napiyrkowski, J., Gonera, J. (2020). Analysis of Failures and Reliability Model of Farm Tractors. *Agricultural Engineering*, 24(2), 89–101. doi:10.1515/agriceng-2020-0020

Naumenko, M. M., Chernenko, Yu. L. (2020). Diagnostics of the Technical Condition of Tractors in Technical Service Systems. *Bulletin of KhNTUSG*, 210, 114–120.

Rohrer, R. A., Pitla, S. K., Luck, J. D. (2019). Tractor CAN bus interface tools and application development for real-time data analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104847. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.002>

Villa-Henriksen, A., Edwards, G. T., Peterson, L. A., Green, O., Sørensen, C. A. G. (2020). Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential. *Biosystems Engineering*, 191, 60–

84. doi:10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013
Zamora-Izquierdo, M. A., Santa, J.,
Martinez, J. A., Martinez, V., Skarmeta, A.
F. (2019). Smart farming IoT platform based
on edge and cloud computing. *Biosystems
Engineering*, 177, 18–30. doi:10.1016/j.bio-
systemseng.2018.10.014.

Надійшла до редакції 29.09.2025 р.;
переглянуто 27.10.2025 р.;
прийнято до друку 24.11.2025 р.;
опубліковано 29.12.2025 р.

Received September 29, 2025;
revised October 27, 2025;
accepted November 24, 2025;
published December 29, 2025

UDC 631.372:629.114.2:631.3

IMPROVEMENT OF TECHNICAL OPERATION STANDARDS AND METHODS OF ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF CLAAS TRACTORS TO INCREASE THEIR RELIABILITY AND WORKING EFFICIENCY

Makarenko M., Associate Professor,

e-mail: mak_nk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4078-9045>

Shevchenko I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

e-mail: igorshvchnk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1280-5290>

Shcherbinsky I., Postgraduate Student,

e-mail: ihor.shcherbinskyi@claas.com, <https://orcid.org/0009-0005-4278-3394>

State Biotechnological University

Summary

The purpose of this research is to improve the technical operation standards of CLAAS tractors and to develop an integrated methodology for assessing their technical condition using telematics data, reliability indicators, diagnostic parameters and mathematical modelling.

The methods involve Kaplan–Meier survival analysis, regression modelling of load factors, CAN-bus data processing, vibration diagnostics and comparative evaluation of maintenance standards. The study uses real-world operational data from CLAAS ARION and AXION tractors operating under different soil and climate conditions in Ukraine.

The results show that adaptive maintenance intervals reduce unplanned failures by 22–30 %, increase technical availability by 6–10 %, and improve the integral performance index. Kaplan–Meier survival curves reveal clear dependencies of failure probability on engine load and thermal operating conditions. The developed diagnostic model provides a classification accuracy of 0.87–0.91 depending on feature composition.

The conclusions confirm the effectiveness of combining telematics, diagnostic data and reliability analysis. Scientific novelty lies in integrating Kaplan–Meier analytics, CAN-monitoring and technical availability indicators into a unified assessment framework for CLAAS tractors. Practical significance is associated with the possibility of applying the methodology in maintenance planning, service centers and digital fleet management systems.

Keywords: CLAAS; technical operation; reliability; Kaplan–Meier; telematics; CAN-diagnostics; technical condition; technical availability.