

Міністерство освіти і науки України
Державний біотехнологічний університет

ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО, ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ

TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE,
FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
SCIENCE JOURNAL

Видається з червня 2014 року
Published since June 2014

Виходить 2 рази на рік
Published 2 times a year

№ 28

Харків
«Право»
2026

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС АГРОПРОМИСЛОВОГО, ЛІСОВОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСІВ»

SCIENCE JOURNAL «TECHNICAL SERVICE OF AGRICULTURE, FORESTRY AND TRANSPORT SYSTEMS»

Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» містить оглядові статті та результати досліджень у відповідності із рубриками:

- Технічний сервіс машин агропромислового комплексу
- Технічний сервіс машин лісового та транспортного комплексів
- Технології та засоби діагностування
- Проблеми використання паливомастильних матеріалів альтернативних видів палив
- Техніка і технології тваринництва
- Проблеми надійності
- Проблеми відновлення деталей машин
- Проблеми енергозабезпечення енергозбереження
- Питання сприяння розвитку науки і техніки
- Інноваційні методи та технології у підготовці фахівців

Науковий журнал призначено для виробничників, науково-педагогічних працівників, наукових співробітників, аспірантів, докторантів і студентів, які спеціалізуються у відповідних або суміжних галузях науки та напрямках виробництва.

Засновник: Державний біотехнологічний університет.

Наказом Міністерства освіти і науки України № 886 від 02.07.2020 науковий журнал включено до реєстру наукових фахових видань України, категорія «Б» зі спеціальності 133 машинобудування».

Мови видання: українська, англійська.

Затверджено до друку рішенням вченої ради Державного біотехнологічного університету (протокол № 15 від 28.04.2026).

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28>

© Державний біотехнологічний університет, 2026

Science Journal "Technical service of agriculture, forestry and transport systems" comprising review articles and research results, researches in accordance with sections:

- Technical service of machines of the agro industrial complex
- Technical service of machines of forest and transport complexes
- Technology and means of diagnostics
- Problems of using fuel-lubricating materials and alternative types of fuels
- Engineering and technology of livestock
- Problems of reliability
- Problems of restoration of parts of machinery
- The problems of energy supply and energy efficiency
- The issue of promoting science and machinery
- Innovative methods and technologies in training of specialists

The Science Journal is designed for manufacturers, scientific and pedagogical workers, research workers, graduate students, doctoral students and students who specialize in relevant or related fields of science and production areas.

Founder: State Biotechnological University.

By order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 886 dated July 2, 2020, the Science Journal is included in the register of scientific and specialized publications of Ukraine, category "B" from specialty 133 "Industrial Mechanical Engineering".

Languages: Ukrainian and English.

Approved for publication decision of the Academic council of State Biotechnological University (report No. 15 from 28.04.2026).

© State Biotechnological University, 2026

Редакційна колегія:

Головний редактор:

Бредихін В. В., д.т.н., проф. (Україна, Харків)

Заступник головного редактора:

Галич І. В., к.т.н. доц. (Україна, Харків)

Технічний редактор:

Кісь-Коркіщенко Л. В., PhD, доц. (Україна, Харків)

Члени редакційної колегії:

Белосєв Х., д.т.н., академік (Болгарія, Русен)

Засєц М. Л., к.т.н., доц. (Україна, Житомир)

Роговський І. Л., д.т.н., проф. (Україна, Київ)

Артьомов М. П., д.т.н., проф. (Україна, Харків)

Любий Є. В., к.т.н., доц. (Україна, Харків)

Кузькин О. Ф., д.т.н., проф. (Запоріжжя, Україна)

Хмельовський В. С., д.т.н., проф. (Україна, Київ)

Антощенко Р. В., д.т.н., проф. (Україна, Харків)

Борак К. В., д.т.н., проф. (Україна, Житомир)

Коціра С., д.т.н., проф. (Польща, Люблін)

Кравцов А. Г., к.т.н., доц. (Україна, Харків)

Прасоленко О. В., к.т.н., доц. (Україна, Львів)

Марчук А., д.т.н., проф. (Польща, Люблін)

Фіндура П., д.т.н., проф. (Словаччина, Нітра)

Келбаса П., д.т.н. проф. (Польща, Краків)

Алфьоров О. І. д.т.н. проф. (Україна, Харків)

Мірослав Приставка, д.т.н. проф. (Словаччина, Нітра)

Адреса редакційної колегії:

Державний біотехнологічний університет,
вулиця Алчевських, 44, місто Харків,
Україна, 61000

Тел.: +380632443126

Сайт: <https://biotechuniv.edu.ua/nauka/naukovi-zhurnaly/>

E-mail: kisliliia1990@gmail.com

Editorial Board:

Chief Editor:

V. Bredykhin, Dr.Sc., Prof., (Ukraine, Kharkiv)

Deputy of Chief Editor:

I. Halych, candidate of technical sciences, Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv)

Technical Editor:

L. Kis-Korkishchenko, Ph.D., Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv).

Members of the Editorial Board:

H. Beloev, Professor, DTSc, Academician (Bulgarian, Rusen)

M. Zayets, candidate of technical sciences, Assoc. of Prof (Ukraine, Zhytomyr)

I. Rogovskii, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kyiv)

M. Artyomov, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv)

Y. Liubyi, PhD in Transport Systems, Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv)

O. Kuzkin, Dr.Sc., Prof., (Ukraine, Zaporizhzhia)

V. Khmelovskyi, Dr.Sc., Prof., (Ukraine, Kyiv)

R. Antoshchenkov, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv)

K. Borak, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Zhytomyr)

S. Kocira, Dr.Sc., Prof. (Poland, Lublin)

A. Kravtsov, candidate of technical sciences, Assoc. of Prof. (Ukraine, Kharkiv)

O. Prasolenko, candidate of technical sciences, Assoc. of Prof. (Ukraine, Lviv)

A. Marczuk, Dr.Sc., Prof. (Poland, Lublin)

P. Findura, Dr.Sc., Prof. (Slovak, Nitra)

P. Kielbasa, Dr.Sc., Prof. (Poland, Krakow)

O. Alforov, Dr.Sc., Prof. (Ukraine, Kharkiv)

Miroslav Pristavka, Dr.Sc., Prof. (Slovak, Nitra)

Address of the Editorial Board:

State Biotechnological University,
44 Alchevskih Street, Kharkiv,
Ukraine, 61000

Phone: +380632443126

Website: <https://biotechuniv.edu.ua/nauka/naukovi-zhurnaly/>

E-mail: kisliliia1990@gmail.com

ЗМІСТ

1. **Макаренко М. Г.**
Інтелектуальна ретрофітна система предиктивної діагностики електронних систем керування гідроприводом і трансмісією тракторів та автомобілів..... 8-15
2. **Артёмов М. П., Макаренко О. М., Пастушенко С. І.**
Цифровий двійник машинно-тракторного агрегату як інструмент оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах 16-29
3. **Никифоров А. О., Антощенко Р. В., Галич І. В.**
Вплив аеродинамічних факторів на ефективність віброфрикційної сепарації дрібнонасінневих матеріалів 30-37
4. **Колєснік І. В., Колєснік Ю. І., Блезнюк О. В., Панкова О. В., Марущак І. Т.**
Методи формалізованого представлення та аналізу параметрів кузовів легкових автомобілів 38-46
5. **Цимбалюк Ю. І., Цимбалюк І. Ю.**
Дослідження залежності параметрів трельовальної системи від характеристики середовища 47-59
6. **Завгородній О. І., Богомолів О. В., Богомолів О. О., Бойко Є. В.**
Моделювання ударного руху частинки по похилій площині з подачею у поперечному напрямку 60-67
7. **Козаченко О. В., Дьяконов С. О., Пахучий А. М., Волковський О. М.**
Математичне моделювання динаміки дискового ґрунтообробного агрегату з адаптивними параметрами жорсткості..... 68-82
8. **Кириченко Р. В., Лубченко Є. В.**
Дослідження сошників для сівби зернових культур за технологією Mini-till... 83-95
9. **Задорожний В. П.**
До дослідження динаміки трансмісії колісного трактора працюючого у складі ґрунтообробного агрегату..... 96-108
10. **Гончаренко О. О., Зачепило С. В., Сівцов Ю. В., Лютий Т. Г.**
Застосування GPS-моніторингу та IoT-сенсорів у системах управління сільськогосподарською технікою 109-118
11. **Макаренко О. В.**
Підвищення ефективності процесу розділення насіння зернових та зернобобових культур шляхом застосування механічних інтенсифікаторів 119-130
12. **Марченко М. М.**
Моделювання деградації та регенерації пористих матеріалів на основі політетрафторетилену у фільтрації трансформаторних олиф 131-138
13. **Свіргун В. П., Свіргун О. А.**
Оптимальне керування краном мостового типу за умов обмеження відхилення вантажу в процесі руху і повне усунення його коливань після зупинки крану в заданій точці..... 139-148
14. **Мітяшкіна Т. Ю., Міленін А. М., Кісь-Коркіщенко Л. В.**
Інноваційні методи та STEM-технології в навчанні студентів інженерних спеціальностей 149-155

15. **Поляшенко С. О., Єсіпов О. В., Манойло В. М.**
Дослідження системи автоматичного регулювання заглиблення робочих органів
коренезбиральної машини в процесі збирання..... 156-165
16. **Мигаль В. Д., Агрун Щ. В., Шевченко І. О.**
Розробка методів підвищення якості проєктування, виготовлення й експлуатації
тракторів..... 166-181
17. **Черепньов І. А., Катунін А. М., Чумаченко С. М., Богомол Д. С., Роянов О. М.**
Дослідження типових причин та умов загорянь сільськогосподарської
техніки 182-190
18. **Сіняєва О. В., Пак А. О., Крекот М. М., Сичова Т. О., Торяник Д. О.,
Бакум М. В., Козій О. Б.**
Фізико-математичне моделювання руху часточки в повітряному потоці між
вібруючими площинами 191-196
19. **Ляшенко С. О., Фесенко А. М., Кісь В. М.**
Визначення критеріїв ефективності безпечного процесу випарювання розчину у
випарній установці цукрового заводу 197-204
20. **Сиромятников Ю. М., Сиромятніков П. С., Півень М. В.**
Роботизовані технології у тваринництві: сучасні системи та перспективи
розвитку 205-244

CONTENTS

1. **Makarenko M. G.**
Intelligent retrofit system for predictive diagnostics of electronic hydraulic drive and transmission control systems of tractors and automobiles 8-15
2. **Artyomov M. P., Makarenko M. G., Pastushenko S. I.**
Digital twin of a machine-tractor unit as a tool for optimizing operating modes in variable field conditions 16-29
3. **Nykyforov A. O., Antoshchenkov R. V., Halych I. V.**
Influence of aerodynamic factors on the performance of vibratory-friction seed separation for small-seeded crops 30-37
4. **Koliesnik I. V., Koliesnik Yu. I., Bleznyuk O. V., Pankova O. V., Marushchak I. T.**
Methods of formalized representation and analysis of passenger car body parameters..... 38-46
5. **Tsybalyuk Yu. I., Tsybaliuk I. Yu.**
Study of the dependence of the parameters of the skidding system on the characteristics of the environment 47-59
6. **Zavgorodniy O. I., Bogomolov O. V., Bogomolov O. O., Boyko E. V.**
Modeling of the impact motion of a particle along an inclined plane with a feed in the transverse direction..... 60-67
7. **Kozachenko O. V., Dyakonov S. O., Pakhuchy A. M., Volkovsky O. M.**
Mathematical modeling of the dynamics of a disk tillage unit with adaptive stiffness parameters..... 68-82
8. **Kyrychenko R. V., Lubchenko E. V.**
Research on openers for sowing grain crops using Mini-till technology 83-95
9. **Zadorozhny V. P.**
To the study of the dynamics of the transmission of a wheeled tractor operating as part of a soil tillage unit 96-108
10. **Honcharenko O. O., Zachepyllo S. V., Sivtsov Y. V., Liutyi T. G.**
Application of GPS monitoring and IoT sensors in agricultural machinery control systems 109-118
11. **Makarenko O. V.**
Improving the efficiency of the separation process of cereal and legume seeds through the use of mechanical intensifiers 119-130
12. **Marchenko M. M.**
Modeling of degradation and regeneration of porous materials based on polytetrafluoroethylene in transformer oil filtration..... 131-138
13. **Svirgun V. P., Svirgun. O. A.**
Optimal control of an overhead crane with a constraint on load deviation during motion and complete suppression of load oscillations after stopping at a prescribed point..... 139-148
14. **Mitiashkina T. Y., Milenin A. M., Kis-Korkishchenko L. V.**
Innovative methods and STEM technologies in advanced engineering students..... 149-155

15. **Polyashenko S. O., Yesipov O. V., Manoilo V. M.**
Research on the system of automatic regulation of the deepening of the working parts of the root harvesting machine during the harvesting process..... 156-165
16. **Mygal V. D., Agrun Shch. V., Shevchenko I. O.**
Development of methods to improve the quality of tractor design, manufacturing and operation 165-181
17. **Cherepnov I. A., Katunin A. M., Chumachenko S. M., Bohomol D. S., Roianov O. M.**
Research into typical causes and conditions of agricultural machinery fires..... 182-190
18. **Siniaieva O., Pak A., Krekot M., Sychova T., Toryanyk D., Bakum M., Kozii O.**
Physical-mathematical modeling of particle motion in air flow between vibrating planes 191-196
19. **Liashenko S., Fesenko A., Kis V.**
Development of efficiency criteria for safe evaporation in multiple-effect evaporator units at sugar plants 197-204
20. **Syromyatnikov Yu. M., Syromiatnikov P. S., Dyakonov S. O., Piven M. V.**
Robotic technologies in livestock farming: modern systems and development prospects 205-244

Макаренко М. Г.
ORCID iD: 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 прогнозовано-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 гідроприводом 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 витoki, 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 прогностичної 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; сформувати 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 прогностичної інтерпретації їх зміни. Саме такий підхід відповідає висновкам систематичних оглядів із прогностичного 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 широкую неоднорідність реалізації інформаційних функцій та агрегованих систем, а для автомобілів — через наявність розвинених електронних мереж, які доцільно доповнювати, а не замінювати [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 перемикання, 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 позиціювання 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 багатовисновкових 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].

Ретрофітний 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 ретрофітної системи предиктивної діагностики електронних систем керування гідروприводом 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 ретрофітний 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.ress.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.

Артюмов М. П.¹
ORCID iD: 0000-0002-2947-2664
E-mail: artiomovprof@ukr.net

Макаренко О. М.¹
ORCID iD: 0009-0002-0476-0624
e-mail: rem_hztz@ukr.net

Пастушенко С. І.²
ORCID iD: 0000-0002-1996-3558
E-mail: 52701hi@gmail.com

¹ Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна
² Відокремлений підрозділ НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут», м. Бережани, Україна

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОЧИХ РЕЖИМІВ У ЗМІННИХ ПОЛЬОВИХ УМОВАХ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.16>

УДК 631.372:631.3.004.18:004.94:004.8

Артюмов М. П., Макаренко О. М., Пастушенко С. І. *Цифровий двійник машинно-тракторного агрегату як інструмент оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах*

Анотація. У статті обґрунтовано науково-технічні засади використання цифрового двійника машинно-тракторного агрегату як інструменту оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах. Показано, що ефективність машинно-тракторного агрегату визначається не лише конструктивними параметрами трактора та сільськогосподарського знаряддя, а й здатністю системи керування оперативно враховувати зміну тягового опору, вологості та щільності ґрунту, буксування рушіїв, рельєфу поля, технологічної глибини обробітку, швидкості руху та енергетичного режиму двигуна. Запропоновано концептуальну архітектуру цифрового двійника МТА, яка включає фізичний рівень агрегату, сенсорний рівень, рівень збору й синхронізації даних, модельний рівень, рівень адаптивного керування, рівень оптимізації та рівень взаємодії з оператором і хмарною інфраструктурою. Обґрунтовано використання підходів Model-Based Systems Engineering, Data Fusion, Edge Computing, IoT, GPS-навігації, предиктивного керування та алгоритмів штучного інтелекту для формування адаптивної системи підтримки прийняття рішень.

Розроблено логіко-математичний опис функціонування цифрового двійника, що враховує тяговий баланс агрегату, енергетичні характеристики двигуна, буксування рушіїв, опір ґрунтообробного знаряддя та агротехнологічні обмеження. Запропоновано багатокритеріальний підхід до оптимізації режимів роботи за критеріями мінімізації питомої витрати палива, зниження буксування, забезпечення стабільної глибини обробітку, підвищення продуктивності та дотримання агротехнічних вимог. Наведено модельний імітаційний сценарій, який демонструє потенційну можливість зниження питомої витрати палива, стабілізації тягового навантаження та підвищення енергетичної ефективності агрегату за рахунок адаптивного вибору швидкісного режиму, передавального числа, положення навісної системи та допустимого діапазону буксування.

Ключові слова: цифровий двійник, машинно-тракторний агрегат, адаптивне керування, тягово-динамічні характеристики, енергетична ефективність, агротехнологічні параметри, точне землеробство, IoT, GPS, Data Fusion, Model Predictive Control.

Artyomov M. P., Makarenko M. G., Pastushenko S. I. **Digital twin of a machine-tractor unit as a tool for optimizing operating modes in variable field conditions.**

Abstract. The article substantiates the scientific and technical principles of using a digital twin of a machine-tractor unit as a tool for optimizing operating modes under variable field conditions. It is shown that the efficiency of a machine-tractor unit is determined not only by the design parameters of the tractor and agricultural implement, but also by the ability of the control system to promptly take into account changes in draft resistance, soil moisture and density, wheel slip, field relief, tillage depth, travel speed and engine energy mode. A conceptual architecture of the digital twin of a machine-tractor unit is proposed, including the physical level of the unit, sensor level, data acquisition and synchronization level, model level, adaptive control level, optimization level, and interaction level with the operator and cloud infrastructure. The application of Model-Based Systems Engineering, Data Fusion, Edge Computing, IoT, GPS navigation, predictive control and artificial intelligence algorithms for creating an adaptive decision-support system is substantiated.

A logical and mathematical description of the digital twin operation is developed, taking into account the traction balance of the unit, engine energy characteristics, wheel slip, tillage implement resistance and agrotechnological constraints. A multi-criteria approach to optimizing operating modes is proposed according to the criteria of minimizing specific fuel consumption, reducing wheel slip, ensuring stable tillage depth, increasing productivity and maintaining agrotechnical requirements. A simulation-based scenario is presented, demonstrating the potential possibility of reducing specific fuel consumption, stabilizing traction load and increasing the energy efficiency of the unit through adaptive selection of travel speed, gear ratio, hitch position and allowable wheel slip range.

Keywords: digital twin, machine-tractor unit, adaptive control, traction-dynamic characteristics, energy efficiency, agrotechnological parameters, precision agriculture, IoT, GPS, Data Fusion, Model Predictive Control.

Вступ

Сучасна механізація сільськогосподарського виробництва перебуває на етапі переходу від традиційного використання машин до інтелектуальних кіберфізичних систем, здатних виконувати моніторинг, прогнозування, самодіагностику та оптимізацію робочих процесів. У межах цієї трансформації машинно-тракторний агрегат перестає розглядатися лише як сукупність трактора, робочого знаряддя та оператора. Він дедалі більше набуває ознак складної динамічної системи, у якій механічні, енергетичні, інформаційні, навігаційні та агротехнологічні процеси взаємопов'язані в режимі реального або квазіреального часу.

Особливість роботи машинно-тракторного агрегату полягає в тому, що його навантажувальні та енергетичні режими формуються не в стабільному середовищі, а в умовах постійної просторово-часової мінливості поля. На відміну від промислових машин, які працюють переважно у контрольованому середовищі, МТА взаємодіє з неоднорідним ґрунтом, змінним рельєфом, різною вологістю, ущільненням, рослинними рештками, локальними перешкодами та агротехнологічними обмеженнями.

У міжнародній науковій літературі цифровий двійник розглядається як цифрове представлення фізичного об'єкта або процесу, що синхронізується з ним через потоки даних і використовується для моніторингу, аналізу, прогнозування та оптимізації. Початково концепція цифрового двійника активно розвивалася у виробництві та управлінні життєвим циклом виробів [1–3]. Надалі вона була адаптована до кіберфізичних систем, промислового Інтернету речей, smart manufacturing та smart farming. У роботах С. Verdouw та співавторів цифровий двійник у smart farming визначається як цифровий еквівалент реального об'єкта, що відображає його стан і

поведінку протягом життєвого циклу та дозволяє керувати операціями на основі майже реального часу [6].

Для аграрного сектору цифрові двійники є особливо перспективними, оскільки дозволяють поєднувати фізичні моделі, сенсорні дані, машинне навчання, прогноз погоди, карти поля та алгоритми оптимізації. Pylaniadis, Osinga та Athanasiadis зазначають, що цифрові двійники в аграрному секторі відкривають можливості для моніторингу, симуляції та підтримки прийняття рішень, а також формують дорожню карту ширшого впровадження таких систем у сільському господарстві [7].

Актуальність дослідження

Актуальність теми зумовлена кількома взаємопов'язаними чинниками.

По-перше, зростає вартість енергоресурсів, а паливна складова залишається однією з найбільш значущих у собівартості механізованих польових робіт. Навіть незначне зниження питомої витрати палива на гектар за масштабного використання тракторного парку може давати суттєвий економічний ефект.

По-друге, у змінних польових умовах часто виникає розрив між номінальними можливостями трактора та фактично реалізованою тяговою ефективністю. Надмірне буксування призводить до втрат енергії, ущільнення ґрунту, зниження продуктивності та збільшення витрат палива. Недостатнє використання тягового потенціалу, навпаки, означає роботу агрегату з неповним завантаженням, що також погіршує економічні показники [13].

По-третє, сучасні трактори оснащуються електронними системами керування, CAN-шинами, телематичними модулями, GPS-приймачами, датчиками швидкості, навантаження, положення навісної системи, витрати палива та параметрів двигуна. Проте наявність великої кількості даних сама по собі не забезпечує оптимізації. Необхідна система, яка перетворює дані на знання, а знання – на керуючі дії або рекомендації оператору.

По-четверте, точне землеробство передбачає перехід від усередненого керування до диференційованого управління технологічними операціями. Це означає, що агрегат повинен адаптувати швидкість, глибину обробітку, тягове навантаження та інші параметри відповідно до карти-завдання, фактичних умов поля й прогнозованих обмежень. Саме цифровий двійник може стати центральним інструментом для такого адаптивного керування.

По-п'яте, існує потреба у формуванні науково обґрунтованих підходів до інтеграції цифрових двійників у системи технічного сервісу, діагностики, прогнозування зношування та оптимізації експлуатації сільськогосподарських машин. Для журналу «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» ця тема є безпосередньо релевантною, оскільки цифровий двійник може використовуватися не лише під час польової роботи, а й для оцінювання технічного стану агрегату, прогнозування несправностей, планування технічного обслуговування та аналізу ефективності використання машинного парку.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій

Концептуальні засади цифрового двійника були сформовані у працях M. Grieves, де цифровий двійник розглядався як віртуальне представлення фізичного виробу, що дає змогу зіставляти спроектований і фактично виготовлений об'єкт [1]. Надалі ця концепція отримала розвиток у промисловому виробництві, де цифрові двійники стали використовуватися для моніторингу, симуляції, оптимізації та підтримки життєвого циклу складних технічних систем. Kritzinger та співавтори запропонували класифікацію цифрових моделей, цифрових тіней і цифрових двійників залежно від характеру обміну даними між фізичним та віртуальним об'єктами [3]. Тао та співавтори систематизували

стан розвитку цифрових двійників у промисловості, наголосивши на ролі даних, моделей, сервісів і зворотного зв'язку [2].

Важливим нормативно-концептуальним орієнтиром є серія ISO 23247, у якій цифровий двійник розглядається в контексті виробничих систем та інтеграції даних, моделей і сервісів [4]. Хоча цей стандарт безпосередньо орієнтований на manufacturing, його логіка може бути адаптована до аграрних машин: фізичний об'єкт, цифрове представлення, канали даних, сервіси аналізу, сценарії використання та інтеграція в ширшу інформаційну систему.

У smart farming цифрові двійники почали активно розглядатися як інструмент переходу від пасивного моніторингу до активного управління. Wolfert та співавтори показали, що Big Data у smart farming впливає не лише на виробничі операції, а й на весь агропродовольчий ланцюг [5]. Verdouw та співавтори запропонували концептуальну рамку цифрових двійників у smart farming, пов'язавши їх із IoT-архітектурою та системним підходом до управління [6]. Pylianidis та співавтори проаналізували застосування цифрових двійників в аграрному секторі та визначили набір прикладних сценаріїв, що включають рослинництво, тваринництво, робототехніку, моніторинг полів і підтримку прийняття рішень [7].

Окремий напрям досліджень стосується цифрових двійників саме тракторів і високопотужних мобільних машин. Zhang запропонував метод побудови цифрового двійника високопотужного трактора та описав механізм його функціонування [11]. У 2025 році також з'являються дослідження, де цифровий двійник поєднується з підкріплювальним навчанням для розроблення стратегії перемикання передач тракторів із powershift-трансмісією в умовах коливання тягового опору [12]. Це підтверджує актуальність переходу від статичних рекомендацій до адаптивних алгоритмів, які враховують зміну навантаження та стану агрегату.

Тягово-енергетична ефективність тракторів традиційно досліджується через показники тягового зусилля, буксування, тягового ККД, витрати палива, потужності на гаку та продуктивності. У роботі Ranjbarian та співавторів для оцінки параметрів трактора із ґрунтообробними знаряддями використовувалися вимірювання тягового опору, фактичної швидкості, витрати палива, глибини обробітку й частоти обертання двигуна, а буксування, потужність на гаку та тяговий ККД розраховувалися за стандартними методиками ASABE [14]. Дослідження автоматичного керування буксуванням електричного трактора показують, що підтримання буксування у доцільному діапазоні може підвищувати тягову ефективність і знижувати енергоспоживання [15].

Недостатньо досліджено саме інтегрований підхід, у якому цифровий двійник МТА використовується як інструмент одночасної оптимізації тягових, енергетичних та агротехнологічних параметрів у змінних польових умовах. Саме ця наукова прогалина визначає постановку проблеми цієї статті.

У вітчизняній науковій школі проблеми підвищення ефективності тракторів, машинно-тракторних агрегатів і мобільних енергетичних засобів досліджувалися в контексті тягової динаміки, енергетичної раціоналізації, інтелектуалізації систем керування та вдосконалення компоновальних схем. Зокрема, М.П. Артьомов, М.А. Подригало та М.Г. Макаренко розглядали вдосконалення тракторів шляхом використання інтелектуальних автоматизованих систем управління, що безпосередньо пов'язано з ідеєю переходу від традиційного керування до адаптивних цифрових систем [15]. Дослідження М.Г. Макаренка, О.М. Макаренка та О.Г. Григораша щодо підвищення тягових показників блочно-модульних тягово-приводних агрегатів є важливими для обґрунтування тягово-динамічного блоку цифрового двійника МТА [16].

Окреме значення має методологічний напрям, пов'язаний із методом парціальних прискорень у динаміці мобільних машин. Колективна монографія за редакцією М.А. Подригала та М.П. Артьомова узагальнює підходи до аналізу динаміки мобільних машин, що може бути використано як теоретична база для побудови динамічних моделей руху МТА в цифровому двійнику [17]. Також актуальними для теми є сучасні публікації М.Г. Макаренка у співавторстві, присвячені підвищенню ефективності машинно-тракторних агрегатів у точному землеробстві та використанню комп'ютерного моделювання для прогнозування енергоспоживання й оптимізації технологічних процесів [18 – 20].

Постановка проблеми

Польова робота МТА характеризується високою невизначеністю зовнішнього середовища. Навіть у межах одного поля тяговий опір знаряддя може істотно змінюватися через різну щільність, вологість, механічний склад ґрунту, наявність ущільнених зон, схили, колії, пожнивні рештки та неоднорідність попереднього обробітку. У традиційній системі керування оператор реагує на ці зміни переважно постфактум: після збільшення буксування, падіння швидкості, перевантаження двигуна або погіршення якості виконання операції.

Науково-технічна проблема полягає у відсутності достатньо узгодженої системи, яка б у реальному або квазіреальному часі збирала дані про стан МТА та польові умови; оцінювала поточний тягово-енергетичний стан агрегату; прогнозувала розвиток режиму за декілька секунд або метрів руху вперед; порівнювала альтернативні режими роботи; обирала оптимальний режим з урахуванням енергетичних, тягових і агротехнологічних критеріїв; передавала рекомендацію оператору або формувала керуючий вплив на електронні системи трактора.

Цифровий двійник МТА дозволяє розв'язати цю проблему, оскільки поєднує дані фізичного агрегату, математичні моделі, алгоритми адаптації та оптимізаційні процедури в єдину кіберфізичну систему.

Мета дослідження – обґрунтувати концепцію, архітектуру та логіко-математичні засади цифрового двійника машинно-тракторного агрегату як інструменту оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні задачі. Проаналізувати сучасні наукові підходи до створення цифрових двійників у промисловості, smart farming та механізації сільського господарства. Сформувати концептуальну модель цифрового двійника МТА як кіберфізичної системи. Розробити архітектуру цифрового двійника з урахуванням сенсорного забезпечення, моделей, алгоритмів адаптивного керування та каналів обміну даними. Обґрунтувати математичні й логічні моделі, необхідні для оцінювання тягово-динамічних, енергетичних та агротехнологічних параметрів агрегату. Запропонувати багатокритеріальний підхід до оптимізації робочих режимів МТА. Навести модельний імітаційний сценарій застосування цифрового двійника для адаптації агрегату до змінних польових умов.

Результати дослідження

Цифровий двійник МТА доцільно визначити як динамічну цифрову модель фізичного агрегату «трактор - знаряддя - ґрунтове середовище - технологічна операція», яка синхронізується з реальним агрегатом за допомогою сенсорних, навігаційних, телематичних і технологічних даних та використовується для моніторингу, прогнозування, діагностики й оптимізації режимів роботи.

На відміну від звичайної електронної карти машини або системи телеметрії, цифровий двійник має три принципові ознаки. Динамічність – модель змінюється разом

зі станом фізичного агрегату та польових умов. Двосторонній зв'язок – дані надходять від фізичного об'єкта до моделі, а результати моделювання повертаються у вигляді рекомендацій або керуючих дій. Прогностична функція – система оцінює не лише поточний стан, а й можливий розвиток режиму при зміні швидкості, передачі, глибини обробітку, тягового навантаження або параметрів робочого органу.

У межах запропонованої концепції цифровий двійник МТА виконує функції моніторингу фактичних режимів роботи; оцінювання тягового опору та буксування; виявлення енергетично нераціональних режимів; прогнозування перевантаження двигуна або надмірного буксування; адаптивний вибір швидкісного режиму; підтримка стабільної глибини обробітку; оптимізація витрати палива на гектар; формування рекомендацій оператору; накопичення даних для подальшого технічного сервісу й аналітики.

Запропонований цифровий двійник МТА логічно продовжує напрям досліджень, пов'язаний з інтелектуалізацією систем керування тракторами. Якщо в роботі [19] акцент зроблено на використанні інтелектуальних автоматизованих систем управління для вдосконалення тракторів, то в межах цього дослідження такий підхід розширюється до рівня цифрового двійника, який поєднує сенсорні дані, математичні моделі, алгоритми адаптивного керування та оптимізацію робочих режимів у реальному або квазіреальному часі. Запропонована архітектура цифрового двійника включає сім взаємопов'язаних рівнів.

Фізичний рівень охоплює трактор, сільськогосподарське знаряддя, робочі органи, рушії, двигун, трансмісію, гідравлічну систему, навісний механізм і середовище взаємодії – ґрунт. Саме фізичний рівень є джерелом реальних процесів: тягового навантаження, буксування, витрати палива, коливань швидкості, зміни глибини обробітку.

У цифровому двійнику МТА фізичний рівень не можна відокремлювати від агротехнологічної операції. Наприклад, оранка, глибоке рихлення, культивация, сіяння або міжрядний обробіток мають різні допустимі діапазони швидкості, глибини, буксування й нерівномірності обробітку. Тому цифровий двійник має враховувати не лише машину, а й конкретний технологічний процес.

Сенсорний рівень формує первинний потік даних. Для цифрового двійника МТА доцільно використовувати групи датчиків, такі як датчики частоти обертання двигуна; датчики навантаження двигуна; датчики витрати палива; датчики швидкості руху; GPS/GNSS-приймач; датчики буксування або непрямі алгоритми його визначення; датчики положення навісної системи; тензометричні датчики тягового зусилля; датчики тиску в гідросистемі; IMU-модуль для оцінювання ухилу, прискорень і коливань; датчики вологості та температури ґрунту; датчики глибини обробітку; CAN-дані трактора.

Важливою є не лише кількість датчиків, а й якість синхронізації даних. Якщо GPS-дані, CAN-параметри двигуна, тягове зусилля і глибина обробітку мають різні частоти оновлення та часові затримки, цифровий двійник повинен виконувати часову узгодженість потоків.

На рівні збору, синхронізації та попередньої обробки даних виконується фільтрація шумів; видалення аномальних вимірів; часовий ресемплінг; синхронізація GPS і CAN-даних; нормалізація параметрів; розрахунок похідних показників; оцінювання достовірності даних.

Для фільтрації можуть використовуватися ковзні середні, медіанні фільтри, комплементарні фільтри або фільтр Калмана. Наприклад, фактична швидкість агрегату може оцінюватися шляхом поєднання даних GPS, частоти обертання коліс і IMU. Такий

підхід Data Fusion дозволяє зменшити вплив втрати супутникового сигналу, пробуксовування та локальних похибок вимірювання.

Модельний рівень є ядром цифрового двійника. Він включає модель тягового балансу; модель буксування; модель двигуна; модель трансмісії; модель взаємодії рушія з ґрунтом; модель опору знаряддя; модель агротехнологічної якості; модель витрати палива; прогнозну модель зміни умов поля. Він може бути побудований за гібридним принципом – частина залежностей описується фізичними рівняннями, а частина уточнюється за допомогою машинного навчання.

Рівень адаптації відповідає за уточнення параметрів моделей на основі фактичних даних. Наприклад, якщо фактичне буксування за певного тягового зусилля перевищує розрахункове, система може зробити висновок про зниження несучої здатності ґрунту або підвищення вологості. Якщо двигун систематично працює в зоні підвищеної питомої витрати палива, модель може скоригувати рекомендований швидкісний режим або передавальне число.

На рівні оптимізації система розв'язує задачу вибору режиму роботи. Залежно від технічних можливостей трактора цифровий двійник може формувати рекомендації оператору; автоматично змінювати швидкість; пропонувати перемикання передач; коригувати положення навісної системи; змінювати цільову частоту обертання двигуна; обмежувати тягове навантаження; контролювати буксування.

Найбільш перспективним є застосування Model Predictive Control, коли система прогнозує поведінку МТА на короткому горизонті часу та обирає керуючі дії з урахуванням обмежень. У сільськогосподарських умовах такий горизонт може задаватися не лише часом, а й відстанню руху, наприклад 5–20 м вперед за траєкторією агрегату.

Цифровий двійник має бути зрозумілим для оператора. Тому інтерфейс повинен не лише показувати велику кількість параметрів, а й надавати пріоритетні рекомендації, наприклад, «зменшити швидкість на 0,6 км/год»; «перейти на нижчу передачу»; «збільшити глибину недоцільно через перевищення тягового опору»; «буксування перевищує оптимальний діапазон»; «режим двигуна енергетично неефективний»; «попередити зону підвищеного тягового опору».

Хмарна інфраструктура може використовуватися для накопичення історичних даних, побудови карт поля, порівняння агрегатів, аналізу роботи механізаторів, сервісної діагностики та навчання моделей, які будуть в автоматичному режимі керувати агрегатом.

Математичний опис цифрового двійника МТА повинен поєднувати фізичні залежності та логічні правила прийняття рішень.

Базове рівняння тягового балансу можна подати у вигляді:

$$P_{tr} = R_{imp} + R_{roll} + R_{slope} + R_{dyn}, \quad (1)$$

де P_{tr} – реалізоване тягове зусилля трактора;

R_{imp} – тяговий опір знаряддя;

R_{roll} – опір коченню;

R_{slope} – складова опору, зумовлена ухилом;

R_{dyn} – динамічна складова опору під час прискорення або несталого руху.

Тяговий опір знаряддя може бути описаний як функція:

$$R_{imp} = f(b, h, v, \rho, W, C, k_s), \quad (2)$$

де b – ширина захвату;

h – глибина обробітку;

v – швидкість руху;

ρ – щільність ґрунту;
 W – вологість ґрунту;
 C – механічний склад або опір ґрунту;
 k_s – коефіцієнт стану робочих органів.

Буксування рушіїв визначається як:

$$\delta = \frac{v_t - v_f}{v_t} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де v_t – теоретична швидкість за кінематикою трансмісії та коліс;
 v_f – фактична швидкість руху за GPS або інерційно-навігаційною оцінкою.

Потужність на гаку:

$$N_{drawbar} = P_{tr} \cdot v_f \quad (4)$$

Питома витрата палива на одиницю площі:

$$q_A = \frac{Q_f}{B \cdot v_f} \quad (5)$$

де Q_f – годинна витрата палива;
 B – робоча ширина захвату агрегату;
 v_f – фактична швидкість руху.

У загальному вигляді задача оптимізації може бути записана як мінімізація цільової функції:

$$J = w_1 q_A + w_2 \delta + w_3 |h - h_{set}| + w_4 \Delta n_e + w_5 R_{agro} \quad (6)$$

де q_A – питома витрата палива;
 δ – буксування;
 h – фактична глибина;
 h_{set} – задана глибина;
 Δn_e – відхилення частоти обертання двигуна від енергетично доцільної зони;
 R_{agro} – штраф за порушення агротехнологічних вимог;
 $w_1 \dots w_5$ – вагові коефіцієнти.

Обмеження задачі:

$$\begin{aligned} \delta_{min} &\leq \delta \leq \delta_{max} \\ h_{min} &\leq h \leq h_{max} \\ n_{e,min} &\leq n_e \leq n_{e,max} \\ P_{tr} &\leq P_{tr,max} \\ Q_f &\rightarrow \min \end{aligned}$$

У логічному представленні цифровий двійник виконує цикл по отриманню даних з фізичного агрегату; очистити та синхронізувати дані; оцінити поточний стан; уточнити параметри моделей; спрогнозувати поведінку агрегату; порівняти альтернативні режими; обрати оптимальну дію; передати рекомендацію або керуючий вплив; зберегти результат для подальшого навчання.

Для побудови динамічної частини цифрового двійника доцільно використовувати положення теорії руху мобільних машин, зокрема підходи, пов'язані з аналізом прискорень, тягових реакцій, перерозподілу сил і динамічної взаємодії рушіїв з опорною поверхнею. У цьому контексті метод парціальних прискорень може бути використаний

як один із теоретичних інструментів для деталізованого аналізу динамічного стану МТА при зміні тягового опору, швидкісного режиму та умов контакту рушія з ґрунтом [17, 18].

Адаптація цифрового двійника повинна відбуватися на двох рівнях.

Перший рівень – оперативна адаптація, яка виконується під час руху агрегату. Наприклад, якщо система фіксує зростання тягового опору й буксування, вона може зменшити швидкість, рекомендувати зміну передачі або скоригувати положення навісної системи.

Другий рівень – накопичувальна адаптація, яка формується на основі історичних даних. Після кількох проходів агрегату поле може бути представлене у вигляді карти зон тягового опору, буксування, витрати палива та продуктивності. Такі карти можуть використовуватися для планування наступних операцій.

Особливо важливим є зв'язок цифрового двійника з GPS/GNSS-координатами. Кожен вимір тягового опору, буксування, витрати палива й глибини обробітку повинен бути прив'язаний до просторової координати. Це дозволяє формувати цифрову карту енергетичної складності поля. У майбутньому така карта може використовуватися для диференційованого обробітку, оптимізації маршрутів, вибору агрегату та планування технічного сервісу.

Цифровий двійник дозволяє оцінювати тяговий режим не статично, а в динаміці. Для цього він порівнює фактичне тягове зусилля; швидкість руху; буксування; витрату палива; режим двигуна; стан ґрунту; технологічні обмеження [19, 20].

У результаті система може визначати, чи є поточний режим енергетично ефективним, перевантаженим, недовантаженим, агротехнологічно нестабільним, небезпечним для ущільнення ґрунту, нераціональним за витратою палива.

Енергетична ефективність МТА визначається не лише абсолютною витратою палива за годину, а й витратою на одиницю виконаної роботи - гектар, тонну переміщеного ґрунту, метр проходу або умовну одиницю технологічної операції. Саме тому цифровий двійник повинен оцінювати не тільки Q_f а й питомі показники, такі як л/га; кВт·год/га; МДж/га; л/т переміщеного ґрунту; витрати палива на одиницю продуктивності.

Робота двигуна в зоні мінімальної питомої витрати палива не завжди збігається з максимальною продуктивністю. Тому задача оптимізації має бути багатокритеріальною. Для важких ґрунтообробних операцій пріоритетом може бути зниження буксування та стабілізація тягового навантаження. Для сівби – дотримання сталої швидкості та глибини. Для транспортних операцій – мінімізація витрат палива при збереженні продуктивності.

Цифровий двійник повинен враховувати карту питомої витрати палива двигуна, передавальні числа трансмісії, характеристики гідравлічної системи та режим роботи знаряддя. Для тракторів із автоматизованою трансмісією перспективним є використання алгоритмів адаптивного перемикавання передач, зокрема на основі прогнозу тягового опору. Сучасні дослідження цифрових двійників powershift-тракторів із використанням reinforcement learning демонструють актуальність такого напрямку [12].

При цьому агротехнологічна ефективність не може бути принесена в жертву енергетичній економії. Тому цифровий двійник має включати агротехнологічні обмеження такі як допустиме відхилення глибини; допустима нерівномірність обробітку; допустима швидкість для конкретної операції; обмеження за ущільненням ґрунту; вимоги до якості кришення; вимоги до стабільності міжряддя; обмеження щодо буксування.

Для сівби пріоритетними можуть бути рівномірність глибини загортання насіння, сталість швидкості та мінімізація пропусків. Для оранки – стабільність глибини, якість перевертання пласта та допустиме буксування. Для культивування – рівномірність

обробітку й уникнення надмірного перемішування ґрунту. Тому цифровий двійник має бути налаштований не лише на конкретний трактор, а й на конкретну операцію.

Інтеграція GPS/GNSS забезпечує просторову прив'язку параметрів роботи. Це дозволяє створювати карти тягового опору; буксування; витрати палива; продуктивності; глибини обробітку; зон перевантаження; зон енергетичних втрат.

ІоТ-компоненти забезпечують передачу даних між агрегатом, локальним контролером, хмарною платформою та сервісною системою. Edge Computing є важливим тому, що частину рішень необхідно приймати без затримки. Наприклад, реакція на різке зростання буксування або перевантаження двигуна не може залежати лише від хмарної обробки. Тому критичні алгоритми повинні виконуватися на борту трактора.

Штучний інтелект може використовуватися для прогнозування тягового опору; класифікації стану ґрунту; виявлення аномальних режимів; прогнозування витрати палива; розпізнавання зон ризику; уточнення параметрів моделей; формування рекомендацій оператору.

Однак AI-компоненти мають бути інтегровані обережно. Для відповідальних технічних систем доцільно використовувати гібридний підхід, у якому фізичні моделі забезпечують інженерну інтерпретованість, а алгоритми машинного навчання уточнюють параметри та прогнозують складні нелінійні залежності.

В роботі розглядається модельний імітаційний сценарій. Він не претендує на заміну польових випробувань, але дозволяє показати логіку роботи цифрового двійника та потенційні напрями підвищення ефективності.

За задачами дослідження розглядається МТА у складі енергонасиченого трактора та ґрунтообробного знаряддя. Поле умовно поділено на три зони. Зона А – ґрунт середньої щільності, нормальна вологість, стабільний тяговий опір. Зона В – підвищена вологість і знижена несуча здатність ґрунту. Зона С – ущільнений ґрунт, підвищений тяговий опір.

Порівнюються два режими: базовий режим – сталі налаштування швидкості та передачі та адаптивний режим – цифровий двійник коригує швидкість, передачу та положення навісної системи (табл. 1).

Наведені результати мають імітаційний характер і повинні розглядатися як обґрунтований модельний прогноз, а не як дані натурного експерименту. Їхня логіка узгоджується з сучасними дослідженнями, де контроль буксування, активне керування тягою та оптимізація режимів тракторних агрегатів розглядаються як засоби підвищення тягової ефективності та зниження енергоспоживання [14, 15].

Таблиця 1

Узагальнені модельні результати

Показник	Базовий режим	Адаптивний режим із цифровим двійником	Очікуваний ефект
Середнє буксування, %	16–19	10–14	зниження втрат на буксування
Питома витрата палива, л/га	100 %	88–93 %	економія 7–12 %
Нерівномірність глибини	підвищена в зонах В і С	стабілізована	краща якість операції
Перевантаження двигуна	Періодичне	зменшене	стабільніший режим
Продуктивність	Базова	+4–8 %	за рахунок зменшення простоїв і втрат

Наукова новизна статті полягає в наступному

Запропоновано трактувати цифровий двійник МТА не як інформаційну копію машини, а як адаптивну кіберфізичну систему оптимізації тягових, енергетичних та агротехнологічних режимів.

Сформовано архітектуру цифрового двійника, яка поєднує фізичний агрегат, сенсорні потоки, GPS/GNSS-дані, Data Fusion, математичні моделі, Edge Computing, AI-компоненти та алгоритми адаптивного керування.

Обґрунтовано багатокритеріальну цільову функцію оптимізації, що одночасно враховує питому витрату палива, буксування, відхилення глибини обробітку, режим двигуна та агротехнологічні штрафи.

Запропоновано логіку просторово прив'язаної адаптації МТА до змінних польових умов через формування карт тягового опору, буксування та енергетичної складності поля.

Показано можливість використання цифрового двійника як інструменту не лише оперативного керування, а й технічного сервісу, діагностики та прогнозування експлуатаційного стану агрегату.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості його використання для підвищення паливної економічності МТА; зниження буксування рушіїв; стабілізації глибини обробітку; підвищення продуктивності польових робіт; зменшення ущільнення ґрунту; формування карт енергетичної складності поля; підтримки прийняття рішень оператором; оптимізації налаштувань агрегату; прогнозування технічного стану; удосконалення систем технічного сервісу.

Для аграрних підприємств цифровий двійник може стати інструментом порівняльного аналізу ефективності різних тракторів, агрегатів, механізаторів і технологічних схем. Для сервісних служб – засобом віддаленої діагностики, виявлення перевантажень і прогнозування несправностей. Для наукових установ – платформою для дослідження взаємодії трактора, знаряддя та ґрунту в умовах цифрового землеробства.

Висновки

Цифровий двійник машинно-тракторного агрегату є перспективним інструментом оптимізації робочих режимів у змінних польових умовах, оскільки дозволяє поєднати сенсорні дані, математичні моделі, алгоритми адаптивного керування та просторову інформацію про поле.

Ефективність МТА визначається не лише потужністю трактора або конструкцією знаряддя, а й узгодженістю тягового, енергетичного та агротехнологічного режимів. Саме цифровий двійник дає змогу оцінювати цю узгодженість у динаміці.

Запропонована архітектура цифрового двійника включає фізичний, сенсорний, інформаційний, модельний, адаптивний, оптимізаційний та операторський рівні. Така структура відповідає сучасній логіці побудови кіберфізичних систем і може бути адаптована до різних типів польових операцій.

Багатокритеріальна оптимізація режимів МТА повинна враховувати питому витрату палива, буксування, тягове навантаження, режим двигуна, глибину обробітку, продуктивність і агротехнологічні обмеження.

Імітаційний сценарій показує, що використання цифрового двійника потенційно може забезпечити зниження питомої витрати палива, стабілізацію буксування, зменшення перевантажень двигуна та покращення якості виконання технологічної операції.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на проведення натурних польових експериментів, калібрування моделей для різних типів ґрунтів, інтеграцію цифрового

двійника з ISOBUS-сумісними знаряддями, розроблення AI-моделей прогнозування тягового опору та впровадження MPC-алгоритмів у бортові системи керування тракторів.

Список використаних джерел

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White paper. 2014. 7 p.
2. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
3. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
4. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2021.
5. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems. 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: 10.1016/j.agry.2017.01.023.
6. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming. Agricultural Systems. 2021. Vol. 189. Article 103046. DOI: 10.1016/j.agry.2020.103046.
7. Pylaniadis C., Osinga S., Athanasiadis I. N. Introducing digital twins to agriculture. Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 184. Article 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.
8. Nasirahmadi A., Hensel O. Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 2. Article 498. DOI: 10.3390/s22020498.
9. Moghadam P., Lowe T., Edwards E. J. Digital twin for the future of agriculture. Journal of Field Robotics. 2020. Vol. 37, No. 6. P. 973–976. DOI: 10.1002/rob.21943.
10. Subeesh A., Mehta C. R. Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things. Artificial Intelligence in Agriculture. 2021. Vol. 5. P. 278–291. DOI: 10.1016/j.aiia.2021.11.004.
11. Zhang Y. Construction method of high-horsepower tractor digital twin. Digital Twin. 2024. DOI: 10.12688/digitaltwin.17615.2.
12. Chen F. et al. Shifting strategy for power shift tractors based on digital twin and reinforcement learning. Computers and Electronics in Agriculture. 2025.
13. Zoz F. M., Grisso R. D. Traction and Tractor Performance. ASABE Distinguished Lecture Series. St. Joseph : ASABE, 2003.
14. Ranjbarian S., Askari M., Jannatkhan J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2017. Vol. 16, No. 2. P. 154–162. DOI: 10.1016/j.jssas.2015.05.003.
15. Артьомов М. П., Подригало М. А., Макаренко М. Г. Вдосконалення тракторів використанням інтелектуальних автоматизованих систем управління. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2019. Вип. 199: Механізація сільськогосподарського виробництва. С. 160–166.
16. Макаренко М. Г., Макаренко О. М., Григораш О. Г. Підвищення тягових показників блочно-модульних тягово-приводних агрегатів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки*. 2014. Вип. 148. С. 295–304.

17. Метод парціальних прискорень та його застосування в динаміці мобільних машин: колективна монографія / за ред. М. А. Подригала, М. П. Артьомова. Харків: «Естет Прінт», 2025. 231 с. ISBN 978-617-8403-01-0.

18. Макаренко Т. В., Макаренко М. Г., Гармаш Д. О. Інноваційні підходи до підвищення ефективності машинно-тракторних агрегатів у точному землеробстві шляхом впровадження комбінованих машин. *Технічний прогрес в АПК: матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції*, 21–22 травня 2025 р. Харків : ДБТУ, 2025. С. 209–212.

19. 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, 2024. С. 192.

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

References

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White paper. 2014. 7 p.

2. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

3. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

4. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2021.

5. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J. Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems. 2017. Vol. 153. P. 69–80. DOI: 10.1016/j.agry.2017.01.023.

6. Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S. Digital twins in smart farming. Agricultural Systems. 2021. Vol. 189. Article 103046. DOI: 10.1016/j.agry.2020.103046.

7. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I. N. Introducing digital twins to agriculture. Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 184. Article 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.

8. Nasirahmadi A., Hensel O. Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 2. Article 498. DOI: 10.3390/s22020498.

9. Moghadam P., Lowe T., Edwards E. J. Digital twin for the future of agriculture. Journal of Field Robotics. 2020. Vol. 37, No. 6. P. 973–976. DOI: 10.1002/rob.21943.

10. Subeesh A., Mehta C. R. Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and internet of things. Artificial Intelligence in Agriculture. 2021. Vol. 5. P. 278–291. DOI: 10.1016/j.aiia.2021.11.004.

11. Zhang Y. Construction method of high-horsepower tractor digital twin. Digital Twin. 2024. DOI: 10.12688/digitaltwin.17615.2.

12. Chen F. et al. Shifting strategy for power shift tractors based on digital twin and reinforcement learning. Computers and Electronics in Agriculture. 2025.

13. Zoz F. M., Grisso R. D. Traction and Tractor Performance. ASABE Distinguished Lecture Series. St. Joseph : ASABE, 2003.

14. Ranjbarian S., Askari M., Jannatkah J. Performance of tractor and tillage implements in clay soil. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2017. Vol. 16, No. 2. P. 154–162. DOI: 10.1016/j.jssas.2015.05.003.

15. Artiymov M. P., Podryhalo M. A., Makarenko M. H. Vdoskonalennia traktoriv vykorystanniam intelektualnykh avtomatyzovanykh system upravlinnia. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. 2019. Vyp. 199: Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva. S. 160–166.

16. Makarenko M. H., Makarenko O. M., Hryhorash O. H. Pidvyshchennia tiahovykh pokaznykiv blochno-modulnykh tiahovo-pryvodnykh ahrehativ. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Tekhnichni nauky. 2014. Vyp. 148. S. 295–304.

17. Metod partsialnykh pryskoren ta yoho zastosuvannia v dynamitsi mobilnykh mashyn : kolektyvna monohrafiia / za red. M. A. Podryhala, M. P. Artiymova. Kharkiv : «Estet Print», 2025. 231 s. ISBN 978-617-8403-01-0.

18. Makarenko T. V., Makarenko M. H., Harmash D. O. Innovatsiini pidkhody do pidvyshchennia efektyvnosti mashynno-traktornykh ahrehativ u tochnomu zemlerobstvi shliakhom vprovadzhennia kombinovanykh mashyn. Tekhnichniy prohres v APK: materialy KhKh Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 21–22 travnia 2025 r. Kharkiv : DBTU, 2025. S. 209–212.

19. Makarenko M. H., Pyrizhok V. I. Vykorystannia shtuchnoho intelektu u vbudovanykh systemakh silskohospodarskykh traktoriv // Molod i industriia 4.0 v XXI stolitti: materialy KhKh Mizhnar. forumu molodi, 4–5 kvit. 2024 r. Kharkiv: DBTU, 2024. S. 192.

20. Makarenko M. H., Kalashnyk Ye. A. Rol informatsiinykh tekhnolohii u vdoskonalenni funktsionalnykh mozhlyvostei blochno-modulnykh traktoriv // Tekhnichniy prohres v APV: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 21–22 travnia 2024 r. Kharkiv: DBTU, 2024. S. 67–68.

Отримано: 03.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Никифоров А. О.

ORCID iD: 0000-0001-7788-8878

E-mail: toninikiforov89@gmail.com

Антощенко Р. В.

ORCID iD: 0000-0003-0769-7464

E-mail:

roman.antoshchenkov@btu.kharkov.ua

Галич І. В.

ORCID iD: 0000-0002-9137-036X

E-mail: galych.ivan@ukr.net

Державний біотехнологічний університет,
м. Харків, Україна

ВПЛИВ АЕРОДИНАМІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІБРОФРИКЦІЙНОЇ СЕПАРАЦІЇ ДРІБНОНАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.30>

УДК 631.362:62-752

Никифоров А. О., Антощенко Р. В., Галич І. В. Вплив аеродинамічних факторів на ефективність віброфрикційної сепарації дрібнонасіневих матеріалів

Анотація. Дві паралельно розташовані робочі поверхні блока віброфрикційного насінневого сепаратора утворюють плоский повітряний канал, у якому під час роботи формується складний знакозмінний рух повітря. Поле швидкостей у робочій зоні змінюється за періодичним законом, що зумовлює виникнення неоднорідного розподілу тиску та швидкостей у міжплощинному просторі. Встановлено, що знакозмінний повітряний потік суттєво впливає на динаміку переміщення насіння, особливо дрібнонасіневого з вираженими аеродинамічними властивостями. У таких випадках можливе зависання насіння над робочою поверхнею, що призводить до зменшення сили тертя та погіршення якості сепарації внаслідок перемішування фракцій. Отже, підвищення ефективності сепарації дрібнонасіневих матеріалів шляхом урахування аеродинамічних факторів і обґрунтування конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного сепаратора є актуальним науково-прикладним завданням для агропромислового виробництва.

Ключові слова: насіння, віброфрикційний поділ, ефективність, ефективність сепарації, динаміка переміщення, знакозмінний повітряний потік, аеродинамічний екран.

Nykyforov A.O., Antoshchenkov R.V., Halych I.V. Influence of aerodynamic factors on the performance of vibratory-friction seed separation for small-seeded crops

Abstract. Two parallel working surfaces of a vibratory-friction seed separator form a flat air channel in which a complex alternating airflow is generated during operation. The velocity field in the working zone varies periodically, resulting in a non-uniform distribution of pressure and airflow velocities in the interplanar space. It has been established that the alternating airflow significantly affects the motion dynamics of seeds, especially small seeds with pronounced aerodynamic properties. In such cases, seed suspension above the working surface may occur, leading to a reduction in friction forces and deterioration of separation quality due to mixing of fractions. Thus, improving the efficiency of separation of small-seeded materials by considering aerodynamic factors and substantiating the design and operating parameters of the vibratory-friction separator is an актуальний scientific and applied task for agro-industrial production.

Key words: seeds, vibratory-friction separation, efficiency, separation efficiency, motion dynamics, alternating airflow, aerodynamic screen.

Актуальність проблеми

Аналіз наукових досліджень з віброфрикційної сепарації дрібнонасінневих матеріалів свідчить про те, що недостатньо вивчено негативний вплив аеродинамічних сил на процес вібраційної сепарації насінневих матеріалів. У відомих дослідженнях запропоновано аналітичні висловлювання для розрахунку величини впливу аеродинаміки на параметри віброфрикційного руху насіння [1-11]. Однак тут не враховуються бічні аеродинамічні сили та аеродинамічні моменти, що виникають через нерівномірний розподіл тиску поверхні насіння при обтіканні їх потоком повітря.

Важливість урахування аеродинамічного чинника під час обробки насінневого матеріалу підкреслюється в наукових дослідженнях [2]. Однак числові показники для виміру цих характеристик не сформульовані. В іншому дослідженні надається огляд механізму взаємодії робочих органів сепаратора з повітрям [3]. Проте чисельні математичні моделі параметричних досліджень перспективних машин не представлені. Розроблено чисельну модель течії газу та частинок у циклонних сепараторах [4]. Але при цьому за рамками дослідження опинилися процеси взаємодії робочих органів з повітрям за наявності пристроїв зниження негативного впливу аеродинамічного фактора. Також вивчалася взаємодія повітря із ширококутними дифузорами [5]. Однак характер взаємодії повітря з пристроями типу аеродинамічного екрану та ефективність їх використання не розглядалися.

Розроблено математичну модель коливального руху еліпсоїдного насіння на похилій шорсткій поверхні [6]. Однак вплив аеродинамічних сил та моментів не враховується. Крім того, представлення насіння як тіл обертання не дозволяє враховувати їх аеродинамічні властивості. У роботі [7] досліджено процеси взаємодії насіння з робочими поверхнями з урахуванням коливань повітря на основі аналітичних плоских газодинамічних моделей. За результатами дослідження створено моделі розподілу швидкості повітря за висотою міжплощинного простору на заданих перерізах. Проведено оцінювання впливу аеродинамічного чинника на коливальний рух насіння, спричинений їх перенесенням повітряним потоком.

Аналіз способу підвищення ефективності процесу очищення насіння соняшнику від домішок свідчить про можливість вибору параметрів роботи вібраційного насінневого сепаратора за критерієм зниження впливу повітряного впливу [8]. І, як показують результати досліджень, підбір кутів нахилу, амплітуди та частоти коливань робочих поверхонь дозволяє знизити негативну дію повітря при сепарації олійного насіння. Однак для дрібнонасінневих, легких культур цей метод не дає задовільних результатів, оскільки насіння за своїми параметрами та аеродинамічними властивостями не відрізняється від домішок.

Інші автори пропонують метод розрахунку поля швидкості та тиску повітря у міжплощинному просторі блоку сепаратора для тривимірного випадку [9]. В результаті отримані закономірності зміни динаміки повітря за різних фазових положень робочих органів.

Проведено оцінювання впливу аеродинамічного чинника на коливальний рух насіння, спричинений їх перенесенням повітряним потоком [10]. Проте запропонована модель досить трудомістка під час використання її проектування вібраційних машин.

Автори дослідження представили результати побудови чотирифакторних регресійних моделей другого порядку з метою оцінки ефективності поділу сумішей насіння пастернаку, кропу та салату з урахуванням динаміки повітря між робочими поверхнями блоку віброфрикційного сепаратора [11]. Регресії побудовані на основі чисельного моделювання віброфрикційного руху насіння з урахуванням їх взаємодії зі знакозмінним повітряним потоком. Проте точність рівнянь регресії повністю залежить

від рівня відповідності використовуваної математичної моделі. Порівняльна оцінка отриманих результатів із результатами натурного експерименту відсутня.

Таким чином, аналіз інших раніше проведених досліджень дозволяє встановити, що:

- створено чисельні моделі вібропереміщення насіння під час очищення (сортування) насіннєвих сумішей на вібраційних машинах з урахуванням динаміки повітря всередині блоків робочих поверхонь. Ці моделі забезпечують можливість проведення чисельного моделювання робочих процесів вібраційних машин з урахуванням заходів щодо усунення аеродинамічного фактора для легких насіннєвих сумішей;

- порівняльна оцінка ефективності вібраційної сепарації легкого насіння на основі чисельного моделювання процесів віброфрикційної сепарації не проводилася.

У зв'язку з цим виникає проблема обґрунтування чисельного показника ефективності поділу дрібнодисперсних матеріалів на віброфрикційних насіннєвих сепараторах з аеродинамічним екраном.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування кількісного показника, що вимірює зміну якості сепарації залежно від конструкції та параметрів роботи віброфрикційних насіннєвих сепараторів з аеродинамічним екраном.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі окремі завдання:

- побудувати аналітичний вираз для показника якості поділу насіннєвого матеріалу;

- розробити методику розрахунку показника якості поділу на віброфрикційному сепараторі з аеродинамічним екраном при заданих конструктивних та режимних параметрах.

Результати досліджень

1 Аналітичний вираз для оцінки показника якості сепарації насіння

Фізичний зміст показника якості сепарації насіннєвого матеріалу на віброфрикційному сепараторі з аеродинамічним екраном проілюстровано за допомогою (рис. 1). Насіння з різних фракцій рухається вздовж робочої поверхні сепаратора під дією вібраційних імпульсів, сили тяжіння, сили опору та аеродинамічних сил і моментів. Їх можливі траєкторії руху перебувають у межах секторів можливих траєкторій (рис. 1). У порівнянні з насінням, менш чутливим до дії повітряного потоку (рис. 1 а), сектори ймовірних траєкторій легкого насіння, чутливого до дії повітряного потоку, збільшуються і зростає ступінь їх перекриття (рис. 1 б).

Аналітичний вираз для оцінки чисельного значення показника якості сепарації має вигляд:

$$K(X) = \frac{\sum_{i=1}^{N^{\Phi}} (\delta_i^a + \Delta_i^a)}{\sum_{i=1}^{N^{\Phi}} (\delta_i^b + \Delta_i^b)}, \quad (1)$$

$$\Delta_i = \begin{cases} (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}), & \text{якщо } (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}) \geq 0 \\ 0, & \text{якщо } (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}) < 0 \text{ або } i = N^{\Phi} \end{cases}, \quad (2)$$

де Δ_i – кут сектора перекриття сусідніх секторів можливих траєкторій насіння i -ої та $i+1$ -ої фракцій насіннєвого матеріалу;

φ_i – математичне очікування кута відхилення середньої осі віброфрикційного руху насіння i -ої фракції щодо осі Y системи координат, пов'язаної з робочою поверхнею;

δ_i – половинний кут сектора можливих траєкторій насіння i -ої фракції;

N^{ϕ} – кількість фракцій насіннєвого матеріалу, що досліджується;

X – вектор конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного сепаратора з аеродинамічним екраном.

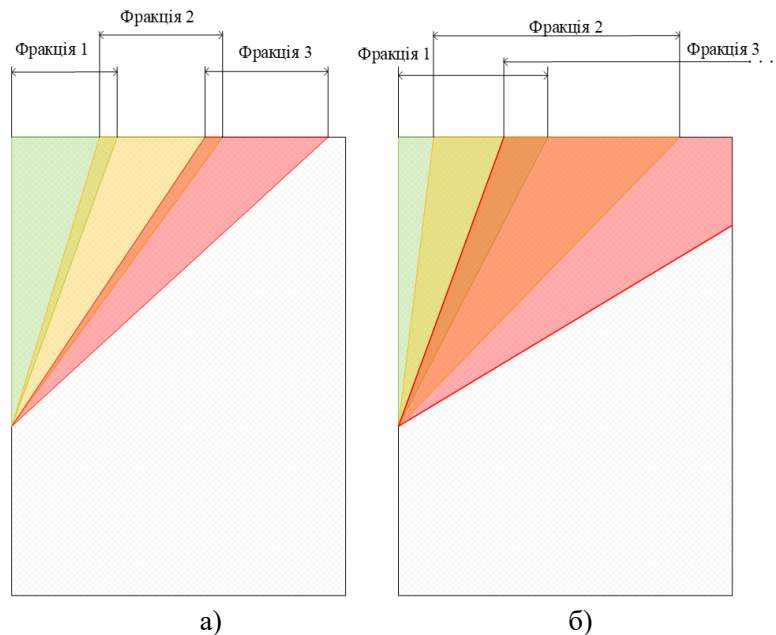


Рис. 1. Ефективність застосування віброфрикційного сепаратора при розподілі насіннєвих матеріалів: а) звичайних; б) чутливих до дії повітряного потоку

Відмітки «б» і «а», які є у виразі, визначають параметри, отримані без урахування та з урахуванням впливу аеродинамічних сил та моментів відповідно.

Тобто, показник (1) показує у скільки разів зростає відносне перекриття секторів ймовірних траєкторій насіння різних фракцій щодо аналогічних секторів, отриманих за відсутності аеродинамічних сил та моментів. У разі, якщо шкідлива дія знакозмінного потоку зведена до нуля, показник (1) дорівнює одиниці. При погіршенні якості сепарації внаслідок перемішування фракцій насіннєвого матеріалу значення показника (1) збільшується і стає більше одиниці.

2 Методика розрахунку показника якості поділу насіння на віброфрикційних насіннєвих сепараторах з аеродинамічним екраном

Методика розрахунку показника якості ґрунтується на статистичній обробці квазивипадкових траєкторій руху насіння щодо робочої поверхні сепаратора. Покрокове інтегрування траєкторій здійснюється з використанням чисельної моделі віброфрикційного руху насіння заданої форми з встановленими фізико-механічними характеристиками при заданих конструктивно-режимних параметрах віброфрикційного сепаратора з екраном.

Алгоритм інтегрування вібраційного руху насіння певної форми із встановленими фізико-механічними характеристиками наведено на (рис. 2).

При вході до алгоритму задаються початкові значення кінематичних параметрів насіння. Далі, для поточної фази коливань робочої поверхні, обчислюється поле швидкостей та тисків повітря у середині області [12].

Для вектора швидкості повітря, що відповідає точці місцезнаходження насіння, з урахуванням його просторового орієнтування, обчислюються аеродинамічні характеристики [13].

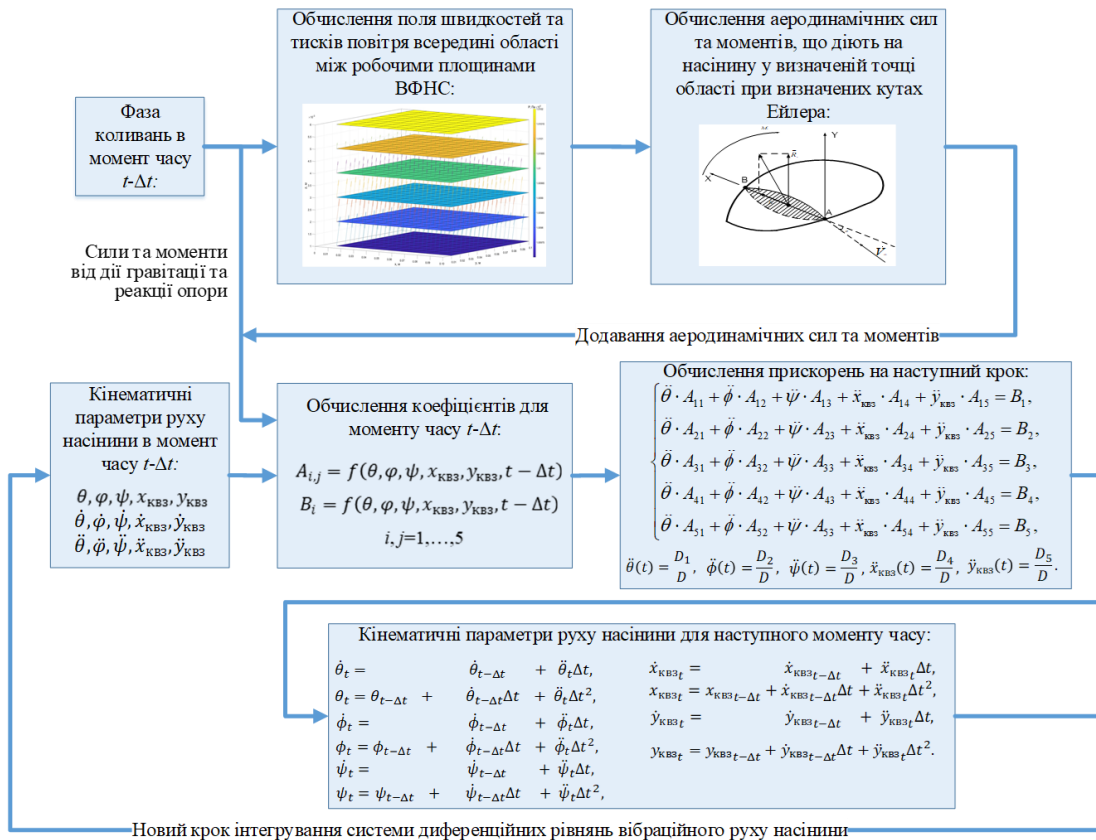


Рис. 2. Алгоритм інтегрування вібраційного руху насіння певної форми із встановленими фізико-механічними характеристиками

Миттєві аеродинамічні сили та моменти, що діють на поверхню насіння, додаються до системи рівнянь вібраційного руху. Як базову використано модель безвідривного руху твердого тіла з перекочуванням і ковзанням по шорсткій похилій поверхні, що здійснює вібраційні коливання [10]. Тіло рухається під дією:

- сили тяжіння;
- реакції опори;
- аеродинамічних сил і моментів, що виникають під час руху повітря.

Створена модель дозволяє враховувати вплив аеродинамічних сил та моментів на кінематичні параметри вібраційного руху насіння залежно від фази коливань віброфрикційного сепаратора та точки місцезнаходження насіння в ділянці між двома робочими поверхнями. Вплив руху повітря проявляється як відхилення апроксимуючої осі вібраційного руху насіння та збільшення сектора можливих траєкторій, що будується щодо цієї осі.

3 Обговорення отриманих результатів

Показник ефективності поділу насіння (1) є відносним. Він показує у скільки разів гірше відбувається сепарування насінневого матеріалу, чутливого до дії повітряного

потоків стосовно деяких еталонних умов сепарації. До таких відноситься умова, коли обробка насіннєвого матеріалу на віброфрикційних насіннєвих сепараторах відбувається за умов вакууму. Насправді такі умови недосяжні. Однак, при використанні математичної моделі, еталонні умови отримують шляхом прирівнювання до нуля аеродинамічних сил та моментів, що діють на насіння, траєкторія якого інтегрується.

Методика розрахунку показника ефективності поділу насіння реалізується шляхом розділення використовуваних математичних моделей. На першому етапі визначається поле швидкостей повітря в робочому просторі за фазами коливань робочих поверхонь, після чого в це поле вводиться насіння, що здійснює вібраційний рух відносно робочої поверхні. Такий підхід спрощує чисельне розв'язання задачі, оскільки не враховується вплив насіннєвого матеріалу на параметри знакозмінного повітряного потоку, що зменшує її розмірність. Водночас результати моделювання містять певну похибку, яка проявляється у завищеній оцінці впливу аеродинамічних ефектів на якість сепарації порівняно з реальними процесами. Це зумовлено нехтуванням в'язкістю повітря та процесами у його прикордонному шарі поблизу робочих поверхонь сепаратора.

Проте розроблена математична модель не спотворює характеру залежності показника якості сепарації дрібнонасіннєвих матеріалів від конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного насіннєвого сепаратора з аеродинамічним екраном. Це дає змогу використовувати її для аналізу та кількісного порівняння альтернативних варіантів конструкції і режимів роботи сепаратора.

Висновки

1. Як показник оцінювання якості сепарації насіннєвого матеріалу використано відношення сум кутів розкриття та перекриття секторів ймовірних траєкторій насіння різних фракцій, отриманих за умов дії та відсутності знакозмінного повітряного потоку. Значення цього показника є чутливим до зміни конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного насіннєвого сепаратора з аеродинамічним екраном, що дає змогу на його основі сформулювати критерій оптимальності для обґрунтування конструктивних і режимних параметрів перспективних сепараторів.

2. Методику розрахунку значень показника якості сепарації насіннєвого матеріалу реалізовано у вигляді алгоритму інтегрування траєкторії безвідривного віброфрикційного руху насіння відносно робочої поверхні сепаратора в умовах дії знакозмінного повітряного потоку. Прийняті в математичних моделях припущення (нехтування впливом в'язкості повітря та градієнтами повітряного потоку в прикордонному шарі) зменшують розмірність обчислювальної задачі, не спотворюючи характеру залежності показника якості сепарації від конструктивно-режимних параметрів.

3. Показано, що запропонований підхід до моделювання процесу віброфрикційної сепарації з урахуванням аеродинамічних ефектів забезпечує можливість кількісної оцінки впливу конструктивно-режимних параметрів на якість розділення дрібнонасіннєвих матеріалів.

Список використаних джерел

1. Алієв Е.Б., Лупко К.О. Морфологічні ознаки та фізико-механічні властивості насіння дрібнонасіннєвих культур. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2020. № 50 С. 27-35. doi:<https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>
2. E. Ramadan, R. Sherif, M. ElAmir, E. Gamal. Aerodynamic properties of some oilseeds crops under different moisture conditions. Mansoura Journal of Soil Sciences and

Agricultural Engineering, 2011. Vol. 2. III. 495-507.
https://www.researchgate.net/publication/259178805_Aerodynamic_properties_of_some_oils_eeds_crops_under_different_moisture_conditions

3. B. Chen, B. Wang, F. Mao, B. Ke, J. Wen, R. Tian, C. Lu, Review on separation mechanism of corrugated plate separator, *Annals of Nuclear Energy*, 2020. Vol. 144. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107548>

4. Cortés, C.; Gil, A. Modeling gas and particle flow inside cyclone separators. *Por. Energy Combust. Sci.*, 2007. 33, III. 409-452. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>

5. Mehta, RD 1977. Аеродинамічне design blower tunnels with wide-angle diffusers. *Progress in Aerospace Sciences*, 18 (1): 59-120. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0376042177900033>

6. Golovanevskiy V.A., Arsenyev V.A., Blekhman I.I., Vasilkov V.B., Azbel Y.I., Yakimova K.S. Vibration-induced phenomena in bulk granular materials. *International Journal of Mineral Processing*. 2011. Vol. 100, No. 3-4. P. 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.001>

7. Bourges, Gastón. Air-seeds flow analysis in a distributor head of "air drill" seeder. *International Society for Horticultural Science*, 2013. PP 259-264. https://www.actahort.org/books/1008/1008_34

8. Aliev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of flower seed separation process efficiency on vibration surface. *Acta Periodica Technologica*, 2019. III. 12-22. https://www.researchgate.net/publication/338154961_Improvement_of_the_sunflower_seed_separation_process_efficiency_on_the_vibrating_surface

9. Antoshchenkov R.V., Nykyforov A.O., Halych I.V., Tolstolutskyi V.V., Antoshchenkova V.V., Diundik S.O. Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 7 (104). P. 67-73. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/198501>

10. Nykyforov A.O., Nykyforova A.O., Antoshchenkov R.V., Antoshchenkova V.V., Diundik S.O., Mazanov V.V. Development of a mathematical model of vibratory non-lift movement of light seeds taking into account aerodynamic forces and moments. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, No. 1 (111). P. 70-78. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/232508>

11. Nykyforov A.O., Antoshchenkov R.V., Halych I.V., Kis V.M., Polyanskyi P.O., Koshulko V.I., Tymchak D.V., Dombrovska A.O., Kilimnik I.V. Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines considering measures to reduce the aerodynamic factor influence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. P. 24-34. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/253657>

12. Antoshchenkov R.V., Nykyforov A.O., Halych I.V., Tolstolutskyi V.V., Antoshchenkova V.V., Diundik S.O. Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 7 (104). P. 67-73.

13. Lukianenko V.M., Nykyforov A.A., Halych I.V. Method for calculating aerodynamic characteristics of volumetric bodies of irregular shape. *Bulletin of KhNTUA named after Petro Vasylenko. Kharkiv*, 2015. Issue 156. P. 459-464.

14. Matalka, R., DeShazo, J.R., & Callahan, C. (2013). Moving towards resiliency: An assessment of the costs and benefits of energy security investments for the San Pedro Bay ports. *UCLA Luskin Center for Innovation*. 58 p. https://innovation.luskin.ucla.edu/wp-content/uploads/2019/03/Moving_Towards_Resiliency.pdf

References

1. Aliev, E.B., & Lupko, K.O. (2020). Morphological features and physicomachanical properties of small-seeded crops. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, 50, 27–35. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>
2. Ramadan, E., Sherif, R., ElAmir, M., & Gamal, E. (2011). Aerodynamic properties of some oilseed crops under different moisture conditions. *Mansoura Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2, 495–507.
3. Chen, B., Wang, B., Mao, F., Ke, B., Wen, J., Tian, R., & Lu, C. (2020). Review on separation mechanism of corrugated plate separator. *Annals of Nuclear Energy*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107548>
4. Cortés, C., & Gil, A. (2007). Modeling gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 409–452. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>
5. Mehta, R.D. (1977). The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers. *Progress in Aerospace Sciences*, 18(1), 59–120.
6. Golovanevskiy, V.A., Arsenyev, V.A., Blekhman, I.I., Vasilkov, V.B., Azbel, Y.I., & Yakimova, K.S. (2011). Vibration-induced phenomena in bulk granular materials. *International Journal of Mineral Processing*, 100(3–4), 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.001>
7. Bourges, G. (2013). Air-seeds flow analysis in a distributor head of an “air drill” seeder. *Acta Horticulturae*, 1008, 259–264. https://www.actahort.org/books/1008/1008_34
8. Aliev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshulko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*, 12–22.
9. Antoshchenkov, R.V., Nykyforov, A.O., Halych, I.V., Tolstolutskyi, V.V., Antoshchenkova, V.V., & Diundik, S.O. (2020). Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(104)), 67–73. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/198501>
10. Nykyforov, A.O., Nykyforova, A.O., Antoshchenkov, R.V., Antoshchenkova, V.V., Diundik, S.O., & Mazanov, V.V. (2021). Development of a mathematical model of vibratory non-lift movement of light seeds taking into account aerodynamic forces and moments. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1(111)), 70–78. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/232508>
11. Nykyforov, A.O., Antoshchenkov, R.V., Halych, I.V., Kis, V.M., Polyanskyi, P.O., Koshulko, V.I., Tymchak, D.V., Dombrovska, A.O., & Kilimnik, I.V. (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines considering measures to reduce aerodynamic influence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 24–34. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/253657>
12. Antoshchenkov, R.V., Nykyforov, A.O., Halych, I.V., Tolstolutskyi, V.V., Antoshchenkova, V.V., & Diundik, S.O. (2020). Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(104)), 67–73.
13. Lukianenko, V.M., Nykyforov, A.A., & Halych, I.V. (2015). Method for calculating aerodynamic characteristics of volumetric bodies of irregular shape. *Bulletin of KhNTUA named after Petro Vasylenko*, 156, 459–464.
14. Matalka, R., DeShazo, J.R., & Callahan, C. (2013). Moving towards resiliency: An assessment of the costs and benefits of energy security investments for the San Pedro Bay ports. UCLA Luskin Center for Innovation. 58 p. https://innovation.luskin.ucla.edu/wp-content/uploads/2019/03/Moving_Towards_Resiliency.pdf.

Отримано: 06.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Колеснік І. В.¹

ORCID iD: 0000-0003-4192-1773

Колеснік Ю. І.¹

ORCID iD: 0000-0002-9915-2455

Блезнюк О. В.²

ORCID iD: 0000-0002-7928-117X

Панкова О. В.³

ORCID iD: 0000-0003-2866-1858

Марущак І. Т.¹

ORCID iD: 0009-0007-9983-0109

¹ Національний університет
біоресурсів і природокористування
України, м. Київ, Україна

² Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

³ Харківський автомобільно-
дорожній університет, м. Харків,
Україна

МЕТОДИ ФОРМАЛІЗОВАНОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ КУЗОВІВ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.38>

УДК 629.33:519.876

Колеснік І.В., Колеснік Ю.І., Блезнюк О.В., Панкова О.В., Марущак І.Т. **Методи формалізованого представлення та аналізу параметрів кузовів легкових автомобілів**

Анотація. Об'єктом дослідження є нормування параметрів і показників автомобільних кузовів та їх вузлів на етапі проектування із застосуванням експериментальних і розрахункових даних.

Метою дослідження є розробка методики формалізованого представлення, систематизації та аналізу результатів експериментальних і чисельно-аналітичних досліджень з метою забезпечення оптимального вибору конструктивних рішень і підвищення довговічності кузова легкового автомобіля.

Предметом дослідження є кількісні залежності між розрахунковим напруженням, експлуатаційним напруженням і конструктивними параметрами кузова, включаючи жорсткість, власну частоту, амплітуду відбиття характерних точок і технологічні показники якості зварних з'єднань.

Особлива увага приділяється встановленню статистично обґрунтованих залежностей між параметрами конструкції та довговічністю, що дозволяє оцінювати вплив окремих факторів на термін служби елементів кузова.

Дослідження базується на комплексному аналізі серійних автомобілів і результатів експериментальних стендових випробувань кузовів після зварювання, що включають оцінку динамічної реакції, реєстрацію появи втомних тріщин і визначення технологічних характеристик зварних швів. Для обробки даних використовуються методи регресійного аналізу, параметричної та багатокритеріальної оптимізації, а також графоаналітична інтерпретація експериментальних результатів. Формування єдиного банку даних забезпечує збереження і систематизацію інформації про розрахункові напруження і експлуатаційні напруження, що дозволяє використовувати накопичені результати на будь-якому етапі проектування і модернізації конструкцій.

Результати дослідження дозволяють встановлювати кількісні взаємозв'язки між конструктивними, технологічними та експлуатаційними показниками, що забезпечує ефективну корекцію та вдосконалення конструкцій автомобільних кузовів. Пропонований підхід сприяє підвищенню точності прогнозування довговічності,

формуванню раціональних конструкторських рішень і створенню формалізованих моделей, придатних для автоматизованого проектування. Використання розробленої методики дозволяє скоротити тимчасові та матеріальні витрати при проектуванні та модернізації кузовів, а також підвищити надійність і безпеку експлуатації легкових автомобілів.

Ключові слова: довговічність, розрахункове напруження, кузов автомобіля, експериментальні дослідження, регресійний аналіз, параметрична оптимізація, графоаналітична інтерпретація.

Koliesnik I.V., Koliesnik Yu.I., Bleznyuk O.V., Pankova O.V., Marushchak I.T. Methods of formalized representation and analysis of passenger car body parameters

Annotation. The object of the study is the normalization of parameters and indicators of automobile bodies and their components at the design stage using experimental and calculated data.

The purpose of the study is to develop a methodology for formalized representation, systematization and analysis of the results of experimental and numerical-analytical studies in order to ensure the optimal choice of design solutions and increase the durability of the passenger car body.

The subject of the study is the quantitative dependence between the design stress, operational life and design parameters of the body, including stiffness, natural frequency, reflection amplitude of characteristic points and technological indicators of the quality of welded joints.

Special attention is paid to establishing statistically substantiated dependencies between design parameters and durability, which allows assessing the influence of individual factors on the service life of body elements.

The study is based on a comprehensive analysis of serial cars and the results of experimental bench tests of bodies after welding, which include an assessment of the dynamic response, registration of the appearance of fatigue cracks and determination of technological characteristics of welds. For data processing, regression analysis methods, parametric and multi-criteria optimization, as well as graph-analytical interpretation of experimental results are used. The formation of a single data bank ensures the preservation and systematization of information on design stresses and operational experience, which allows using the accumulated results at any stage of design and modernization of structures.

The results of the study allow establishing quantitative relationships between structural, technological and operational indicators, which ensures effective correction and improvement of car body structures. The proposed approach contributes to increasing the accuracy of durability prediction, the formation of rational design solutions and the creation of formalized models suitable for automated design. The use of the developed methodology allows you to reduce time and material costs in the design and modernization of bodies, as well as increase the reliability and safety of passenger car operation.

Keywords: durability, design stress, car body, experimental research, regression analysis, parametric optimization, graphoanalytical interpretation.

Вступ. У процесі проектування автомобільних кузовів та їх вузлів одним із ключових завдань є забезпечення необхідної довговічності конструкцій при мінімальних витратах ресурсів і матеріалів. На сучасному етапі проектування виникає проблема відсутності формалізованих і систематизованих методів оцінки впливу конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на довговічність елементів кузова. Традиційний підхід, заснований на орієнтації на серійні зразки та референтні

конструкції, не завжди дозволяє точно прогнозувати поведінку нових або модифікованих конструкцій в реальних умовах експлуатації.

Недостатня кількість експериментальних даних і обмежена репрезентативність вибірки ускладнюють застосування регресійного аналізу та багатокритеріальної оптимізації. Крім того, існує потреба у створенні єдиного банку даних, що дозволяє акумулювати результати експериментальних і чисельно-аналітичних досліджень і забезпечує формалізоване представлення взаємозв'язків між параметрами конструкції і терміном служби кузова.

Вирішення цієї проблеми необхідне для підвищення точності прогнозування довговічності, оптимізації конструктивних рішень і розвитку автоматизованих методів проектування автомобільних кузовів та їх вузлів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження довговічності та довговічності кузовів транспортних засобів зосереджувалися на поєднанні експериментальних методів, числового моделювання та статистичної обробки даних. Shangguan та ін. [1] застосували багатоосьові критерії та теорію кумулятивних пошкоджень для оцінки терміну служби алюмінієвого кузова, підтвердивши ефективність моделей накопичення пошкоджень від втоми. Kuo і Kelkar [2] розробили методологію аналізу структурної довговічності, яка використовується й сьогодні.

Хіе та ін. [3] продемонстрували застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для оцінки довговічності кузовів залізничних транспортних засобів та [4] продемонстрували важливість врахування реальних навантажень. Кіско та ін. [5] поєднали аналітичні та множинні методи для оцінки довговічності конструкцій. Вуруак та ін. [6] використали статистичний аналіз експериментальних даних для встановлення зв'язку між параметрами напруженого стану та терміном служби.

Автори [7] досліджували напружений стан кузовів пасажирських автомобілів за допомогою сучасних числових методів. Рорувч та ін. [8] і Drożdziel та ін. [9] врахували вплив корозії та поверхневих тріщин на довговічність. Рашурін та ін. [10] удосконалили технології випробувань на втому листових матеріалів, що підвищує точність оцінки терміну служби.

Отже, сучасні підходи базуються на поєднанні експерименту, числового моделювання та статистики, що підтверджує доцільність формалізованого представлення даних для проектування та вдосконалення конструкцій кузова, навіть за обмежених експериментальних даних.

Мета дослідження полягає у розробці науково обґрунтованої методики формалізованого уявлення, систематизації та аналізу результатів експериментальних та чисельно-аналітичних досліджень параметрів кузовів легкових автомобілів, що забезпечує встановлення кількісних взаємозв'язків між конструктивними, технологічними та експлуатаційними факторами з метою підвищення точності прогнозування довговічності, оптимізації конструктивних рішень.

Матеріали і методи досліджень. Для досягнення нормованих параметрів та показників проектного автомобіля та його вузлів [1, 2] на етапі проектування застосовується орієнтація на референтні конструкції та цільові значення параметрів, сформовані на основі аналізу серійних автомобілів та результатів їх експлуатаційної та розрахункової оцінки та їх вузлів, які зарекомендували себе в умовах експлуатації. За відсутності прямих аналогів оцінка проводиться з використанням технічно прогресивних та економічно обґрунтованих цільових показників, що формуються на основі сукупності експериментальних та розрахункових даних.

Встановлення таких показників можливе за наявності представницького масиву інформації, що дозволяє застосовувати методи параметричної та багатокритеріальної оптимізації, а також процедури вибору раціональних проектних рішень у рамках чисельно-аналітичного проектування з використанням чисельних моделей та статистичних методів аналізу.

У разі розробки алгоритму автоматизованого проектування кузова [3] норми призначаються з використанням єдиного банку даних, що формується на основі результатів експериментальних та розрахункових досліджень, що визначають зв'язок напруги з терміном служби. Отже, для нормування показників та параметрів для формування якості конструкції на стадії проектування необхідні збір інформації, її систематизація та формалізоване подання.

Такий підхід пов'язаний з вибором розрахунково-статистичної моделі, що забезпечує формалізоване уявлення даних про кількісний вплив конструктивних, технологічних або експлуатаційних факторів на довговічність, причому залежності можуть бути різноманітними на вигляд. Однак відомо, що для багатьох матеріалів, що випробовуються на витривалість, співвідношення довговічності та міцності досить адекватно виражається залежністю $\sigma^m N = c$, яка може бути перетворена на вигляд

$$\sigma^m T = c \quad (1)$$

де σ – питоме навантаження;
 N – число циклів навантаження до відмови;
 T – довговічність;
 m, c – константи.

Залежності такого виду широко використовуються в техніці, зокрема, при плануванні багатофакторних експериментів, визначенні довговічності виробів, апроксимації зміни параметрів технічного стану. Крім того, такі залежності відносно просто доповнюються незалежними параметрами стану і тоді набувають наступного придатного для проектування кузова вигляду:

$$(P_n / P_{0n})^{m_n} \cdot \dots \cdot (P_1 / P_{01})^{m_1} \sigma^m T = c \quad (2)$$

де σ – розрахункова напруга, що діє у небезпечному перерізі елемента кузова [4];
 N – число циклів навантаження до відмови, виражене в годинах роботи, кілометрах пробігу або серед циклів змін напруги до руйнування [4];
 m, c – величини, що визначаються при формуванні кількісного взаємозв'язку розрахункова напруга – напрацювання за результатами випробувань [4];
 $P_{01} \dots P_{0n}$ – вихідні значення величин, потенційно придатних для керування ними при проектуванні;
 $P_1 \dots P_n$ – поточні значення величин, що змінюються або враховуються під час проектування;
 $m_1 \dots m_n$ – показники ступеня, що визначаються розрахунком або формуванням залежності (2) за умови рівності її лівої та правої частин.

При формуванні залежності чисельні значення параметрів P_1, P_n, P_i приймаються в результаті апріорного ранжирування, що використовується в теорії планування експериментів, а показники m_i, m_1, m_n розраховуються для кожного з фіксованих значень факторів, що враховуються. У процесі накопичення даних за розрахунковими

значеннями показників ступеня m_i можна підібрати потрібну функцію, наприклад, методом найменших квадратів. До появи такої можливості для оцінки впливу того чи іншого параметра на величину напруцювання слід використовувати інтерполяційні формули.

Введення поправочних співмножників залежність (2) не відрізняється по суті від відомого прийому введення поправочних коефіцієнтів. Дійсно, кожен множник виду $(P_i / P_{0i})^{m_i}$ має сенс такого коефіцієнта, але на відміну від нього дозволяє підвищити точність розрахунку, якщо його одержують на основі експериментальних досліджень. Очевидно, можна привести залежність (2) до виду

$$(P_n)^{m_n} \cdot \dots \cdot (P_1)^{m_1} \sigma^m T = c \quad (3)$$

Такий вид залежності теорії планування експерименту широко відомий [5, 9]. Звичним і в даний час широко застосовується спосіб її формування є використання апарату регресійного аналізу.

Формування залежності здійснювалося за результатами стендових експериментальних досліджень, що використовуються для верифікації формалізованих розрахункових залежностей кузовів легкового автомобіля при згинанні в умовах резонансного збудження. Випробування проводилися на кузовах після зварювання, прийнятих відділом технічного контролю, у конфігурації без навісних елементів.

У процесі випробувань реєструвалися основні конструктивні та технологічні параметри, а також параметри динамічного відгуку кузова. При досягненні граничного стану фіксувалося поява тріщин втоми в елементах конструкції, після чого випробування тривали з метою накопичення експериментальних даних і аналізу тенденцій зміни довговічності. Підварювання тріщин розглядалося як технологічний прийом, не спрямований на відновлення вихідної міцності елемента, а забезпечує можливість подальшого накопичення експериментальних даних про характер та локалізації ушкоджень.

В результаті застосування методів статистичної обробки та обчислення вибірових характеристик при обмеженому обсязі експериментальної вибірки, характерному для верифікаційних експериментальних досліджень [6] встановлено кількісний взаємозв'язок довговічності кузова з рядом його параметрів, включаючи згинальну жорсткість, власну частоту згину, амплітуду віброзміщення характерної точки та технологічні показники.

Множинний кореляційний зв'язок довговічності кузовів з перерахованими характеристиками, отриманий в результаті статистичної обробки за методикою, викладеною в роботі [6-8]

$$N = 0,0000766 C^{1,4011} f^{2,2194} A^{0,0015} \lambda^{0,411}. \quad (4)$$

Формула (4), що має постійні показники ступеня, очевидно, має такі ж обмеження щодо точності розрахунку, як і вираз (2), що містить поправочні коефіцієнти. Водночас виникає питання про доцільність одночасного введення у формулу (4) пов'язаних між собою величин C, f, A, λ . Подібне у практиці досліджень зустрічається досить часто і потребує подальшого дослідження. У разі формула (4) може лише сенс узагальненого висловлювання даних, поданих у таблиці 1.

Таблиця 1

Узагальнення експериментальних даних

Умовний номер кузова	$\bar{N}_{ik}$ в циклах	f , Гц	A , мм	C , кгс/мм	λ , %
1	826600	35,4	0,19	458,4	0,10
2	477600	34,3	0,32	396,1	2,73
3	566700	32,4	0,14	448,3	4,04
4	748400	35	0,10	497,5	0,36
5	653600	34,4	0,31	480	0,13
6	611300	35	0,20	448,3	0,23
7	334700	34,8	0,37	431,7	3,37
8	655800	34,8	0,24	450,8	0,33
9	544200	35	0,33	519,7	3,37
10	389800	34	0,47	405,9	2,85
11	690400	34,1	0,20	413,3	0,20
12	575200	33,2	0,21	471,7	2,33
13	526200	32,5	0,22	416,4	0,41
14	468000	32,5	0,42	438,1	1,91
$\bar{N}$	576300	34,1	0,27	448,3	16,3
σ	135100	1,04	0,11	35,45	1,5
ν	23	3	40	7	90

Отримана форма узагальнення експериментальних даних мало зручна використання, оскільки безпосередньо відбиває обсягу накопиченої інформації та дозволяє оцінити відхилення від встановлених норм у разі введення у конструкцію будь-яких змін. Крім того, виконання процедур регресійного аналізу та конструювання на їх основі формалізованих моделей для систематизації даних потребують представницької вибірки. Процес накопичення даних зазвичай відбувається протягом тривалого часу, що пов'язано при проектуванні або модернізації конструкцій з певними труднощами.

Таким чином, виникає питання про знаходження способів формалізованого подання одержуваних результатів дослідження, який дозволяв би в міру накопичення матеріалів використовувати для формування наявних конструкцій. Розглянемо такий спосіб з прикладу графоаналітичної інтерпретації експериментальних даних.

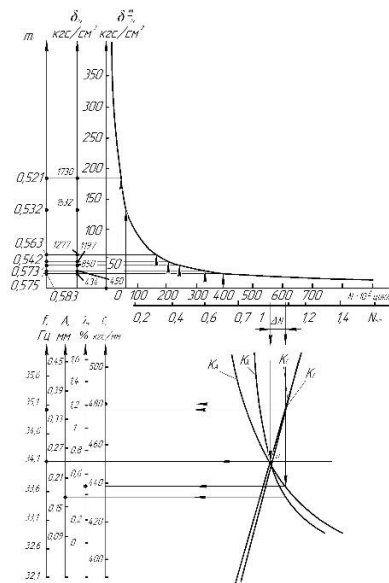


Рис. 1. Діаграма формування кількісного взаємозв'язку розрахункового напруження-довговічність на підставі експериментальних даних

Її побудову почнемо з формування кількісного взаємозв'язку розрахункового напруження – довговічність виходячи з експериментальних даних [4, 10]. Оскільки експериментальних даних замало встановлення математичного очікування довговічності, прийнемо її середньоарифметичне значення досліджених кузовів. З точки $\bar{N}$ опустимо перпендикуляр до перетину з довільною лінією в точці O , яку прийнемо за лінію еталонної структури даної конструкції кузова масового виробництва. Стосовно цієї лінії проведемо формування взаємозв'язку вивчених параметрів C, f, A, λ із довговічністю $\bar{N}$. Зліва від точки O на лінії еталонної структури проведемо перпендикулярні лінії, що характеризують значення параметрів C, f, A, λ . Точки перетину ліній будуть відповідати значенням параметрів щодо середньоарифметичного значення N (математичного очікування за достатньої вибірки).

Для спрощення здійснимо побудову щодо $N_{\text{норм}} = N / \bar{N}$ (N – поточне значення довговічності), а параметри C, f, A, λ виразимо через коефіцієнти K_C, K_A, K_f, K_λ , що характеризує відповідно жорсткість кузова, амплітуду віброзміщення точки порога, власну частоту кузова, відсоток непровару дверних отворів.

При вирішенні питань, пов'язаних з підвищенням довговічності (в даному випадку $\bar{N}$ збільшується до ΔN), забезпечується наочність вибору параметрів чи факторів, що забезпечують досягнення мети.

Розглянутий спосіб формування аналітичного образу постійно накопичуються результатів дослідження у вигляді залежностей (2) і (3), а також їх графічна інтерпретація забезпечують можливість фіксації інформації, передачі її конструктору на будь-якій стадії вивчення конструкції та сприяють формуванню та коригуванню конструкції автомобіля та його вузлів на різних етапах проектування.

Висновки

Для досягнення нормованих параметрів і показників проєктованого автомобіля та його вузлів на етапі проєктування ефективно застосовується орієнтація на референтні конструкції та цільові значення параметрів, сформовані на основі аналізу серійних

автомобілів і результатів їх експлуатаційної та розрахункової оцінки. За відсутності прямих аналогів використовуються технічно прогресивні та економічно обґрунтовані цільові показники, сформовані на основі експериментальних і розрахункових даних.

Формування показників і параметрів конструкції можливе тільки за наявності репрезентативного масиву інформації, що дозволяє застосовувати методи параметричної і багатокритеріальної оптимізації, чисельно-аналітичне проектування і методи аналізу для вибору раціональних проектних рішень.

Використання єдиного банку даних для автоматизованого проектування кузова дозволяє встановлювати зв'язок між напругою і терміном служби елементів конструкції, що забезпечує формалізацію інформації і систематизацію для корекції проектних рішень на будь-якому етапі проектування.

Розроблені кількісні залежності між розрахунковим напруженням, числом циклів до відмови і конструктивними параметрами кузова (жорсткість, власна частота, амплітуда віброзмішування, якість зварних швів) дозволяють прогнозувати довговічність елементів і оцінювати вплив технологічних і експлуатаційних факторів.

Графоаналітична інтерпретація експериментальних даних забезпечує наочність оцінки параметрів, що впливають на довговічність, і дозволяє ефективно формувати та коригувати конструкції автомобільних кузовів на основі накопиченої інформації.

Використання регресійного аналізу та чисельно-аналітичних моделей дозволяє підвищити точність прогнозування довговічності та сприяє розвитку методів автоматизованого проектування автомобільних конструкцій.

Список використаних джерел

1. Shangguan Y., Wang W., Yang C., He A. Fatigue Strength Assessment of an Aluminium Alloy Car Body Using Multiaxial Criteria and Cumulative Fatigue Damage Theory // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 215. – DOI: 10.3390/app13010215.
2. Kuo E., Kelkar S. Vehicle Body Structure Durability Analysis // *SAE Technical Paper* 951096. – 1995. – <https://doi.org/10.4271/951096>.
3. Xie N., Lu Y.-H., Feng Z., Chen T.-L. Fatigue Strength Research on Aluminum Alloy Car Body for Railway Vehicle Based on Finite Element Analysis Method // *Proc. of the 2015 International Conference on Material Science and Applications. – Advances in Physics Research*. – 2015. – P. 885–891. – <https://doi.org/10.2991/icmsa-15.2015.164>.
4. Xin Cai Zhong, Zhen Yu Wu, Kai Song. A Research on the Methods of Fatigue Analysis for Vehicle Body Based on Real Road Conditions // *Applied Mechanics and Materials*. – Vol. 615. – 2014. – P. 93–100. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.615.93>.
5. Kicko M., Frankovský P., Huňady R., Kaňavský A., Kostka J. Determination of the Fatigue Life of the Vehicle Construction Based on Strength Calculations // *American Journal of Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 5, No. 6. – P. 274–279. – <https://doi.org/10.12691/ajme-5-6-8>.
6. Буряк М. В., Розум Р. І., Захарчук О. П., Прогній П. Б., Попович П. В., Шевчук О. С., Галушак Д. О. Оцінкавічності металоконструкцій автотранспортних засобів // *Вісник машинобудування та транспорту*. – 2022. – Вип. 15, вип. 1. – С. 11–16. – <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-11-16>.
7. Мартинов І., Калабухін Ю., Труфанова А., Мартинов С. Аналіз напруженого стану кузовів пасажирських вагонів // *Транспортні системи і технології*. – 2024. – <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-9>.
8. Попович П., Шевчук О., Побережна Л., Цон О., Ляшук О. Дослідження характеристик втомного руйнування металевих конструкцій транспортних засобів, що використовуються для транспортування агресивних матеріалів // *Репозиторій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*.

9. Дроздзель П., Попович П., Вітенко Т., Шевчук О., Золотий Р., Конончук О. Прогнозування довговічності транспортних засобів з урахуванням поширення корозійних поверхневих тріщин у конструктивних елементах // Науковий журнал Сілезького технологічного університету. Серія Транспорт. – 2018. – № 101. – С. 47–57. – <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.101.5>.

10. Пачурін Г., Гончарова Д., Філіппов А., Шевченко С., Мухіна М., Кузьмін Н., Пачурін В., Матвеев Ю., Кутепова Л., Смірнова З. Розробка технології випробувань на втому листових автомобільних матеріалів // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2018. – Т. 5, № 12 (95). – С. 31–37. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144524>.

References

1. Shangguan Y., Wang W., Yang C., He A. Fatigue Strength Assessment of an Aluminium Alloy Car Body Using Multiaxial Criteria and Cumulative Fatigue Damage Theory // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 215. – DOI: 10.3390/app13010215.

2. Kuo E., Kelkar S. Vehicle Body Structure Durability Analysis // *SAE Technical Paper* 951096. – 1995. – <https://doi.org/10.4271/951096>.

3. Xie N., Lu Y.-H., Feng Z., Chen T.-L. Fatigue Strength Research on Aluminum Alloy Car Body for Railway Vehicle Based on Finite Element Analysis Method // *Proc. of the 2015 International Conference on Material Science and Applications*. – Advances in Physics Research. – 2015. – P. 885–891. – <https://doi.org/10.2991/icmsa-15.2015.164>.

4. Xin Cai Zhong, Zhen Yu Wu, Kai Song. A Research on the Methods of Fatigue Analysis for Vehicle Body Based on Real Road Conditions // *Applied Mechanics and Materials*. – Vol. 615. – 2014. – P. 93–100. – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.615.93>.

5. Kicko M., Frankovský P., Huňady R., Kaľavský A., Kostka J. Determination of the Fatigue Life of the Vehicle Construction Based on Strength Calculations // *American Journal of Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 5, No. 6. – P. 274–279. – <https://doi.org/10.12691/ajme-5-6-8>.

6. Buryak M. V., Rozum R. I., Zacharchuk O. P., Progniy P. B., Popovych P. V., Shevchuk O. S., Halushchak D. O. Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів // *Вісник машинобудування та транспорту*. – 2022. – Vol. 15, Iss. 1. – P. 11–16. – <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-11-16>.

7. Martynov I., Kalabukhin Y., Trufanova A., Martynov S. Analysis of Stress State of Passenger Car Bodies // *Transport Systems and Technologies*. – 2024. – <https://doi.org/10.32703/2617-9059-2024-43-9>.

8. Popovych P., Shevchuk O., Poberezhna L., Tson O., Lyashuk O. The Study of Fatigue Failure Performance of Vehicle Metal Structures Used in Transportation of Corrosive Materials // *Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University Repository*.

9. Drożdziel P., Popovych P., Vitenko T., Shevchuk O., Zoloty R., Kononchuk O. Prediction of Transport Vehicles' Durability with Consideration of Corrosive Surface Cracks Propagation in Structural Elements // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. – 2018. – No. 101. – P. 47–57. – <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.101.5>.

10. Pachurin G., Goncharova D., Filippov A., Shevchenko S., Mukhina M., Kuzmin N., Pachurin V., Matveyev Y., Kuteпова L., Smirnova Z. Development of Fatigue Test Technology of Sheet Automobile Materials // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 5, No. 12 (95). – P. 31–37. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144524>.

Отримано: 01.04.2026. Прийнято: 13.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Цимбалюк Ю. І.
ORCID iD: 0000-0003-4839-0944
E-mail: yu.tsymbalyuk@ntu.edu.ua
Цимбалюк І. Ю.
ORCID iD: 0009-0008-8489-473X
E-mail: ihortsymbaliuk@ntu.edu.ua

Національний лісотехнічний
університет України, м. Львів,
Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ТРЕЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВІД ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРЕДОВИЩА

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.47>

УДК 630*375:[514.85+629.3.012]

Цимбалюк Ю. І., Цимбалюк І. Ю. Дослідження залежності параметрів трелювальної системи від характеристики середовища

Анотація. Дослідження присвячене трелюванню деревини під наметом лісового насадження із застосуванням малогабаритних трелювальних засобів. В якості середовища дослідження роботи трелювальної системи, вибрано штучно створене лісове насадження в рівнинних умовах рельєфу. Мета дослідження полягала у встановленні впливу характеристики лісового насадження на параметри трелювальної системи, які забезпечують її вільне переміщення між деревами на площі, що сприятиме зменшенню кількості дерев з механічними пошкодженнями, внаслідок їх контакту із трелювальною системою. Основні параметри трелювальної системи, які приймаються як основні – це її габаритні розміри, зокрема довжина, яку можна змінювати шляхом зміни довжини лісоматеріалів. Не змінними чинниками приймалися відстані між деревами в ряду та ширина міжряддя лісового насадження, а також таксаційні дані насадження.

Для реалізації мети дослідження було використано комп'ютерну модель, яка дозволяє генерувати середовище роботи трелювальної системи тобто, лісове насадження із прийнятою схемою розміщення дерев та заданим діапазоном відхилення від схеми, а також імітувати і візуалізувати переміщення трелювальної системи у згенерованому лісовому насадженні, враховуючи спосіб трелювання та кут напруженого зрізання дерев на площі. За основу вибрано поштучне трелювання круглих лісоматеріалів із використанням «повідкового» міні скідера з відповідним обладнанням та враховано напрям зрізання дерев, що слугуватиме для вибору початкового положення трелювальної системи.

В результаті графо-аналітичної обробки результатів дослідження, вдалося отримати основні рівняння регресії та залежності, що встановлюють взаємозв'язок між характеристикою лісового насадження та параметрами трелювальної системи з умови її безперешкодного переміщення в насадженні в плані уникнення контакту із ростучими деревами на площі, що призводить до їх механічних пошкоджень.

Ключові слова: круглий лісоматеріал, кінематика, трелювальна система, штучно створене лісове насадження, моделювання, малогабаритний механізований трелювальний засіб.

Tsymbalyuk Yu. I., Tsymbaliuk I. Yu. Study of the dependence of the parameters of the skidding system on the characteristics of the environment

Abstract. The study is devoted to skidding wood under the canopy of a forest stand using small-sized skidding tools. An artificially created forest stand in flat relief conditions was chosen as the environment for studying the skidding system. The purpose of the study was to

establish the influence of the characteristics of the forest stand on the parameters of the skidding system, which ensure its free movement between trees in the area, which will contribute to reducing the number of trees with mechanical damage due to their contact with the skidding system. The main parameters of the skidding system, which are taken as basic, are its overall dimensions, in particular the length, which can be changed by changing the length of the timber. The distances between trees in a row and the width of the forest stand, as well as the stand assessment data, were taken as fixed factors.

To achieve the research goal, a computer model was used that allows generating the skidding system operating environment, that is, a forest stand with an adopted tree placement scheme and a given deviation range from the scheme, as well as simulating and visualizing the skidding system movement in the generated forest stand, taking into account the skidding method and the angle of directional cutting of trees in the area. The basis was selected as piecemeal skidding of round timber using a "leash" mini skidder with appropriate equipment and the direction of tree cutting was taken into account, which will serve to select the initial position of the skidding system.

As a result of graphical and analytical processing of the research results, it was possible to obtain the main regression and dependence equations that establish the relationship between the characteristics of the forest stand and the parameters of the skidding system from the condition of its unhindered movement in the stand in terms of avoiding contact with growing trees in the area, which leads to their mechanical damage.

Keywords: round timber, kinematics, skidding system, artificial forest stand, modeling, small-sized mechanized skidding device.

Постановка проблеми

Переміщення трелювальної системи під наметом лісового насадження у вибраному напрямку, супроводжується із необхідністю обминання перешкод на смузі трелювання, основними з яких є ростучі на площі дерева. При цьому, очевидним є і те, що розміри трелювальної системи, яка безперешкодно може переміщуватися між деревами, фізично не контактуючи з ними та відповідно не завдаючи їм механічних пошкоджень, головним чином залежать від характеристики насадження, зокрема таких параметрів, як відстань між деревами та середній діаметр стовбура, а також від певних технологічних чинників виконання основних робіт та маневрових властивостей механізованого трелювального засобу. Встановлення взаємозв'язку між характерними показниками середовища роботи трелювальної системи, яким є лісове насадження, його параметрами і таксаційними даними, а також окремими технологічними чинниками, дозволить формувати рекомендації, щодо організації лісосічних робіт, виконувати розрахунки головних параметрів трелювальної системи для конкретного середовища її використання, які забезпечуватимуть безперешкодний, безпечний рух.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Переміщення деревини в процесі виконання основних лісосічних робіт є однією з найбільш важливих і трудомістких операцій. В процесі її виконання завдається найбільше шкоди лісовому середовищу, що виражається руйнуваннями верхнього шару ґрунту, рослинності, а головне пошкодженнями дерев, які залишаються на площі. Саме тому, екологічність є визначальним чинником ефективності процесу трелювання, що можна прослідкувати в більшості наукових публікацій.

Трелювання деревини супроводжується певною кількістю проїздів механізованих трелювальних засобів в одному вибраному напрямку руху. Оцінці негативних наслідків цього, присвячена наукова публікація [1]. Метою дослідження була оцінка змін ущільнення ґрунту, що відбувалися внаслідок руху механізованих засобів під час

виконання лісозаготівельних робіт. Для дослідження використовувалося плантаційне насадження тополі із вирощуванням трави в міжряддях. Досліджувався вплив колісного транспортного засобу з причепом із різними інтенсивностями його руху міжряддями. Встановлено, що найменша інтенсивність руху, яка відповідала одному проїзду, призводила до зниження врожайності трав'яної рослинності на 40,3%. При цьому, впливу на регенерацію дерев не спостерігалось. Рух транспорту вплинув на смертність пагонів дерев, що становила 51,5% при десятиразовому проїзді.

Дослідження [2] стосується також впливу механізованих засобів трелювання деревини на зміну щільності, зокрема, піщаних лісових ґрунтів. Різні рівні ущільнення ґрунту досягалися зміною кількості циклів трелювання деревини в складі різних систем машин. Зокрема виконувався один прохід харвестера, один прохід харвестера і форвардера, кілька проходів обидвох машин. Об'ємну щільність ґрунту та опір проникненню вимірювалися в непорушеній між колійній зоні та безпосередньо на колії. Збільшення кількості проходів техніки призводило до незначного збільшення об'ємної щільності ґрунту, однак, опір проникності зростав більше. Встановлено, що зв'язок між об'ємною щільністю ґрунту та опором проникненню є нелінійним. При цьому, об'ємна щільність стає нечутливою до зміни опору проникненню, при вищому значенні опору проникненню. На піщаних ґрунтах зафіксоване значне збільшення, як об'ємної щільності так і опору проникненню, але рідко це значення перевищувало допустимі межі росту коренів дерев. Авторами рекомендується в таких умовах, виконувати трелювання деревини по підготовлених трелювальних волоках, щоб мінімізувати негативний вплив на екосистему.

Основними цілями дослідження [3] було встановлення продуктивності, енерговитрат та викидів парникових газів під час трелювання деревини за допомогою колісного міні скідера на гумових шинах. Попередні дослідження показали, що такий трелювальний засіб може ефективно замінити спеціалізовані гусеничні трелювальні трактори або звичайні сільськогосподарські в контексті дрібномасштабного лісового господарства. Такі трелювальні засоби виявилися більш екологічними з точки зору витрат енергії та викидів парникових газів. Підтверджені основні параметри, свідчать про доцільність застосування подібної техніки в невеликих лісових господарствах. Встановлена продуктивність трелювання складає $3,2 \text{ м}^3/\text{год}$, споживання енергії коливається в діапазоні $56,1 \dots 113,4 \text{ МДж/м}^3$ в залежності від умов. Підтверджене суттєво менше значення шкідливих викидів в атмосферу.

Однією з найбільш актуальних проблем трелювання деревини в насадженні є пошкодження дерев. Ця проблема піднімається в роботі [4]. Авторами публікації виконано дослідження на предмет виявлення залишкових пошкоджень дерев, а також руйнування ґрунту, після проведення рубки і трелювання деревини. Виконані дослідження дозволили встановити, що 12-14% дерев, які залишаються на площі після рубки мають механічні пошкодження при традиційній технології рубки для середньоморських лісів. Якщо застосувати гусеничні трелювальні трактори то частка пошкоджених дерев сягає 20%. Застосування суцільної системи рубки призводить до руйнування 58% грантової поверхні лісосіки. Системи рубок, що базуються на поступовому прорідженні насаджень або вибірковому вирубуванні дерев, призводять до загального руйнування ґрунтової поверхні на 42% площі. Застосування гусеничної трелювальної техніки, завдає більших руйнувань в порівнянні із колісними машинами.

Незважаючи на технічний прогрес, зокрема можливість повної механізації лісосічних робіт, в лісі до цього часу широко використовується тягова сила тварин, навіть при тому, що на заміну їй прийшла мала механізація, яка в загальному має аналогічні екологічні переваги для довкілля. Порівнянню екологічних показників застосування цих двох видів транспорту, присвячується дослідження [5]. Зокрема

дослідження виконувалося для двох сценаріїв застосування тваринної тяги та тяги малих механізованих засобів, а саме на трелюванні деревини в лісі та на польових роботах в сільському господарстві. Підсумкові результати виконаного дослідження показали перевагу застосування тваринної тяги, як в лісі так і для виконання польових робіт в плані екологічних показників. Щоб врахувати вплив на довкілля тварин і механізмів протягом всього життєвого циклу, було використано модульний підхід LCA де механізовані знаряддя та тварини подані, як незалежні модулі. Автори підсумовують, що використання тварин у лісовому та сільському господарствах має оцінюватися враховуючи географічний контекст та з умови досягнення балансу між економічними та екологічними результатами. Особливо в місцях, що піддаються ерозійним процесам внаслідок застосування техніки.

Наукова публікація [6], також стосується порівняння застосування тваринної тяги та механізованих засобів в контексті аналізу надзвичайної ситуації з точки зору їхніх потреб у ресурсах. Для двох систем, які продукують тягову силу, були визначені потоки енергії, матеріалів та інших потреб, які можна отримати з навколишнього середовища та економіки. Діяльність людини та екологічна робота, що приймають участь в процесі створення необхідних ресурсів для роботи систем, оцінювалися з використанням аналізу надзвичайних ситуацій. Встановлено, що основна відмінність між даними системами проявляється у їхній енергетичній сигнатурі. Зокрема, 60% тваринних ресурсів є відновними і лише 9% для механізованих засобів. Із розвитком механізації відбувся перехід від технології, яка забезпечувалася локальними відновлювальними джерелами енергії до технології, яка керувалася не локальними процесами та не відновними джерелами енергії. Автори припускають, що зменшення обсягів корисних копалин, може стати причиною для повернення екологічних технологій з використанням тяги тварин.

У статті [7] пропонується нова парадигма сталого розвитку лісового господарства в умовах зміни кліматичних чинників, праці та довкілля. Метою публікації є зміна парадигми у виконанні основних операцій лісосічних робіт, шляхом переосмислення сталого лісового господарства на основі історичної еволюції даної концепції та зусиль, спрямованих на розв'язання проблем з якими стикаються в лісовому господарстві по всьому світу. Матеріал статті стосується трьох основних напрямків: еволюції концепції сталого розвитку лісового господарства з пропозицією нової концепції; глобальне розуміння сталого лісового господарства із розв'язком поточних проблем сталого розвитку; вдосконалення систем і технологій виконання рубок у фокусі вимог розробленої концепції сталого лісового господарства. Удосконалення системи робіт в лісі з погляду лісової біоекономіки має базуватися на балансі екологічного, економічного і соціального добробуту. Не збалансований акцент, може дати короткостроковий позитивний ефект, але з часом стане причиною руйнування основ сталого розвитку.

Дослідженню життєвого циклу ланцюжка постачання круглої деревини в штаті Теннессі, стосується наукова праця [8], з метою кількісної оцінки впливу на довкілля операцій заготівлі і транспортування деревини. Отримані результати засвідчили про суттєве зменшення утворення парникових газів та використання енергії із викопних природних ресурсів на тону заготовленої деревної сировини у випадку реалізації систем машин на базі бензомоторних пил, в порівнянні із системою машин на базі звалювально-пакетувальних машин. Встановлено, що відносно низька продуктивність системи на базі бензомоторної пили, була з надлишком компенсована низькими витратами паливно-мастильних матеріалів. Також було встановлено, що транспортування деревини мало такий же негативний вплив на довкілля, як і лісозаготівельні роботи.

Наукова праця [9], також присвячена трелюванню деревини за різними технологіями, зокрема розглядається трелювання чокерними трелювальними машинами та з грейферно-чокерним обладнанням. Акцент робиться на розробку моделей

прогнозування часу, а мета дослідження полягала в об'єктивній оцінці часу роботи трелювальних машин із встановленням впливу виробничих чинників на витрати часу, під час виконання окремих операцій процесу трелювання. Дослідження показало, що на загальні витрати часу в процесі трелювання деревини та продуктивність зазначених трелювальних машин, мають вплив такі виробничі показники як відстань трелювання, корисне навантаження та кількість лісоматеріалів, що формують корисне навантаження. Встановлено, що вплив окремих виробничих чинників на загальні витрати часу в процесі робочого циклу є різний для різних типів трелювальних машин. Зальний час простою трелювальної техніки склав 24,6% від загальної тривалості робочої зміни, а середня встановлена продуктивність контрольних машин, становила $6,91 \dots 33,3 \text{ м}^3/\text{зм}$.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у встановленні залежності основних параметрів малогабаритної трелювальної системи (геометричних розмірів), від схеми розміщення дерев на площі штучного лісового насадження в рівнинних умовах для безперешкодного трелювання круглих лісоматеріалів в напівзавантаженому стані з використанням міні скідера з виносним важелем керування. Умова безперешкодного руху трелювальної системи, полягає в уникненні її фізичного контакту із ростучими деревами та їх механічними пошкодженнями.

Результати дослідження

Для дослідження були використані математичні моделі лісового насадження та кінематики малогабаритної трелювальної системи і розроблена на їх основі комп'ютерна програма, що дозволяє імітувати процес трелювання [11]. При цьому прийнято, що виконується трелювання одиничного круглого лісоматеріалу в напівзавантаженому стані за допомогою гусеничного міні скідера з виносним важелем керування. В якості середовища, прийнято штучне лісове насадження з розміщенням дерев в ньому рядами із відомими відстанями між рядами дерев та в ряду. Також було враховано середній діаметр дерев при основі та радіус зони безпеки навколо стовбура для запобігання його механічним пошкодженням.

Початкове положення трелювальної системи перед початком її руху, визначалося прийнятим кутом напрямленого зрізання дерев на площі лісосіки [11]. Діапазон можливого відхилення розміщення кожного дерева від заданої схеми висадки, становив 0,5м. Також було враховано габаритні розміри міні скідера, які впливатимуть на маневровість трелювальної системи, зокрема, його ширина.

Суть дослідження зводилася до встановлення максимальної загальної довжини малогабаритної трелювальної системи, яка забезпечує її безперешкодний рух в лісовому насадженні без механічних пошкоджень дерев на площі. За основу приймалися рівнинні умови лісоексплуатації, тобто, припускалося, що загальний ухил місцевості не впливає на характер руху трелювальної системи. Крім того, умовами дослідження прийнято, що діаметр круглого лісоматеріалу є таким, який дозволяє його розглядати, як жорсткий нерозтяжний стержень.

Щоб перевірити гіпотезу про нормальний розподіл вихідної величини і розрахувати кількість дубльованих дослідів для кожної серії досліджень, було виконано окрему серію дослідів, величина вибірки якої становила 52 дубльованих дослідів із значеннями основних чинників: відстань між деревами в ряду $a = 3,0\text{м}$; ширина міжряддя $b = 2,5\text{м}$; кут напрямленого зрізання дерев на площі, що визначає початкове положення трелювальної системи $\beta = 25^\circ$. Для перевірки гіпотези нормального розподілу вихідної величини, використовувався критерій χ^2 Пірсона.

Для прийнятого плану експериментів, була розроблена методична сітка дослідів, де вказано числові значення рівнів основних чинників, інтервал їх зміни, а також позначення натурального і нормалізованого значень чинників (табл.1).

Таблиця 1

Методична сітка дослідів оцінки довжини трелювальної системи

Найменування чинників	Позначення		Значення (рівні) чинників			Інтервал зміни Δ
	натуральне	нормалізоване	нижній (-1)	основний (0)	верхній (+1)	
Відстань між деревами в ряду, м	a	x_1	2,5	3,0	3,5	0,5
Відстань між рядами дерев, м	b	x_2	2,0	2,5	3,0	0,5
Кут напрямку зрізання дерев, град.	β	x_3	20	25	30	5

Встановлена вибірка дослідів, була розділена на інтервали таким чином, щоб покрити всю вісь в діапазоні від $-\infty$ до $+\infty$, при цьому в кожний інтервал попадало не менше, як п'ять значень вихідної величини. Визначення кількості дубльованих дослідів, що відповідає кожній серії експериментів, виконувалося на основі попередньо проведеної серії дубльованих дослідів. На основі виконаних розрахунків було прийнято загальну кількість дубльованих дослідів.

Таблиця 2

Групування результатів експерименту

№ інтервалу	Межі інтервалу	Середина інтервалу, y_i^*	Число спостережень, m_i	Відносна частота, p_i^*
1	5,8-6,8	6,3	6	0,12
2	6,8-7,7	7,25	11	0,21
3	7,7-8,6	8,15	12	0,23
4	8,6-9,6	9,1	12	0,23
5	9,6-11,2	10,4	11	0,21

Статистична обробка результатів експериментальних досліджень, була виконана з використанням та у відповідності з існуючими сучасними методиками.

Застосований в дослідженні В-план другого порядку, дає можливість описувати залежність вихідної величини від кожного чинника експерименту на основі рівняння параболі. Після розрахунку відповідних коефіцієнтів, отримане рівняння регресії досліджуваного процесу, яке в нормалізованих показниках чинників експерименту, має такий запис:

$$y = 8,19 + 0,697 x_1 + 1,744 x_2 - 0,931 x_3 - 0,153 x_1^2 - 0,048 x_2^2 + 0,647 x_3^2 + 0,165 x_1 x_2 - 0,15 x_1 x_3 - 0,258 x_2 x_3 \quad (1)$$

Статистичний аналіз даного рівняння розпочинався із пошуку дисперсій його коефіцієнтів.

За результатами перевірки значущості коефіцієнтів, що входять в отримане рівняння регресії, встановлено, що деякі з них не є значущими. Це означає, що відповідні члени рівняння із зазначеними коефіцієнтами, доцільно вилучити, а значущі коефіцієнти перерахувати. Уточнення значущих коефіцієнтів рівняння регресії, було виконано із застосуванням методу найменших квадратів для багатofакторних експериментів. З цією

метою, було створено матрицю базисних функцій, яка слугувала основою для складання системи нормальних рівнянь. Кількість нормальних рівнянь в системі, відповідає кількості коефіцієнтів у рівнянні регресії:

$$\left. \begin{aligned} B_0 \sum_{j=1}^{14} X_{0j}^2 + B_1 \sum_{j=1}^{14} X_{0j} X_{1j} + B_2 \sum_{j=1}^{14} X_{0j} X_{2j} + B_3 \sum_{j=1}^{14} X_{0j} X_{3j} + B_4 \sum_{j=1}^{14} X_{0j} X_{4j} + B_5 \sum_{j=1}^{14} X_{0j} X_{5j} &= \sum_{j=1}^{14} X_{0j} Y_j \\ B_0 \sum_{j=1}^{14} X_{1j} X_{0j} + B_1 \sum_{j=1}^{14} X_{1j}^2 + B_2 \sum_{j=1}^{14} X_{1j} X_{2j} + B_3 \sum_{j=1}^{14} X_{1j} X_{3j} + B_4 \sum_{j=1}^{14} X_{1j} X_{4j} + B_5 \sum_{j=1}^{14} X_{1j} X_{5j} &= \sum_{j=1}^{14} X_{1j} Y_j \\ B_0 \sum_{j=1}^{14} X_{2j} X_{0j} + B_1 \sum_{j=1}^{14} X_{2j} X_{1j} + B_2 \sum_{j=1}^{14} X_{2j}^2 + B_3 \sum_{j=1}^{14} X_{2j} X_{3j} + B_4 \sum_{j=1}^{14} X_{2j} X_{4j} + B_5 \sum_{j=1}^{14} X_{2j} X_{5j} &= \sum_{j=1}^{14} X_{2j} Y_j \\ B_0 \sum_{j=1}^{14} X_{3j} X_{0j} + B_1 \sum_{j=1}^{14} X_{3j} X_{1j} + B_2 \sum_{j=1}^{14} X_{3j} X_{2j} + B_3 \sum_{j=1}^{14} X_{3j}^2 + B_4 \sum_{j=1}^{14} X_{3j} X_{4j} + B_5 \sum_{j=1}^{14} X_{3j} X_{5j} &= \sum_{j=1}^{14} X_{3j} Y_j \\ B_0 \sum_{j=1}^{14} X_{4j} X_{0j} + B_1 \sum_{j=1}^{14} X_{4j} X_{1j} + B_2 \sum_{j=1}^{14} X_{4j} X_{2j} + B_3 \sum_{j=1}^{14} X_{4j} X_{3j} + B_4 \sum_{j=1}^{14} X_{4j}^2 + B_5 \sum_{j=1}^{14} X_{4j} X_{5j} &= \sum_{j=1}^{14} X_{4j} Y_j \\ B_0 \sum_{j=1}^{14} X_{5j} X_{0j} + B_1 \sum_{j=1}^{14} X_{5j} X_{1j} + B_2 \sum_{j=1}^{14} X_{5j} X_{2j} + B_3 \sum_{j=1}^{14} X_{5j} X_{3j} + B_4 \sum_{j=1}^{14} X_{5j} X_{4j} + B_5 \sum_{j=1}^{14} X_{5j}^2 &= \sum_{j=1}^{14} X_{5j} Y_j \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

На основі розв'язку складеної системи нормальних рівнянь, визначені уточненні значення коефіцієнтів рівняння регресії, що дозволило отримати кінцеве рівняння регресії, яке із нормалізованим позначенням змінних чинників експерименту і уточненими коефіцієнтами, має такий вигляд:

$$y = 8,088 + 0,697 x_1 + 1,744 x_2 - 0,931 x_3 + 0,586 x_3^2 - 0,258 x_2 x_3 \quad (3)$$

Інтервали довіри для кожного значимого коефіцієнта рівняння регресії (3), визначалися за допомогою t – критерію Стюдента.

Адекватність отриманого рівняння регресії (3), перевірялася за критерієм Фішера на основі чого, прийнята гіпотеза про його адекватність для опису досліджуваного процесу. Використовуючи формули, що пов'язують нормалізовані і натуральні значення чинників та виконавши відповідні математичні перетворення, отримано остаточне рівняння регресії з позначенням чинників в натуральному вигляді, яке описує досліджуваний процес:

$$L = 8,0378 + 1,394a + 6,0677b - 63,0266\beta + 76,9427\beta^2 - 5,9127b\beta \quad (4)$$

Дане рівняння регресії (4), пов'язує максимально допустиму довжину трельовальної системи із основними параметрами середовища її застосування.

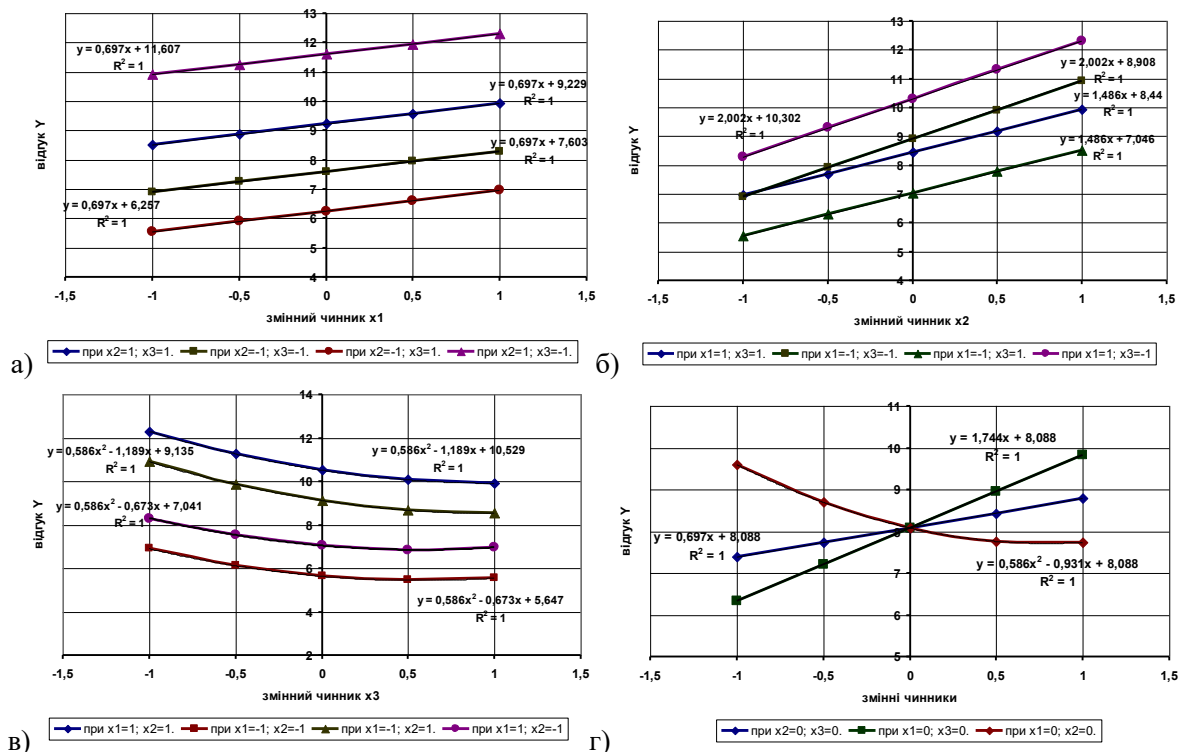
Для аналізу та інтерпретації результатів дослідження, зручніше скористатися рівнянням регресії поданим в нормалізованих показниках (3). Тут слід відмітити, що якщо рівняння є нелінійним, то просте порівняння коефіцієнтів за абсолютною величиною не дозволяє визначати відносний ступінь впливу чинника через присутність квадратичних членів та парної взаємодії.

Відомо, що у квадратичній моделі рівняння, ступінь впливу кожного чинника на відгук є не постійною величиною, а відрізняється в різних точках діапазону варіювання чинника. Якщо присутні парні взаємодії чинників, то і рівнями чинників, що взаємодіють. Встановлений максимальний ступінь впливу кожного із трьох зазначених чинників, буде наступним:

$$x_1: \left| \partial_{x1\max} \right| = 0,697; x_2: \left| \partial_{x2\max} \right| = 2,002; x_3: \left| \partial_{x3\max} \right| = 2,361$$

Для демонстрації та вивчення впливу кожного чинника на відгук, що входить в рівняння регресії, доцільно побудувати графіки залежності $y = f(x_i)$ для кожного змінного чинника, при фіксованих значеннях решти чинників. Для більш повного відображення досліджуваного процесу, змінні чинники досліді доцільно зафіксувати на найбільш характерних рівнях: максимальному +1, мінімальному -1 і основному 0.

Отримані графічні залежності (рис.1) демонструють зміну відгуку під впливом кожного із змінних чинників, при фіксованому значенні на певному рівні двох інших змінних чинників, що входять в рівняння регресії.



а – залежності відгуку від фіксованих значень змінних чинників x_2 ; x_3 ; б – залежності відгуку від фіксованих значень змінних чинників x_1 ; x_3 ; в – залежності відгуку від фіксованих значень змінних чинників x_1 ; x_2 ; г – залежності відгуку від фіксованих значень змінних чинників на нульовому рівні

Рис. 1. Залежності відгуку від значень змінних чинників зафіксованих на найбільш характерних рівнях

Рівняння регресії (4) виражене в натуральних показниках, дозволяє встановлювати залежність максимальної довжини трелювальної системи від конкретної схеми розміщення дерев в лісовому насадженні, їх таксаційних даних та прийнятого кута напрямленого зрізання дерев (рис.2).

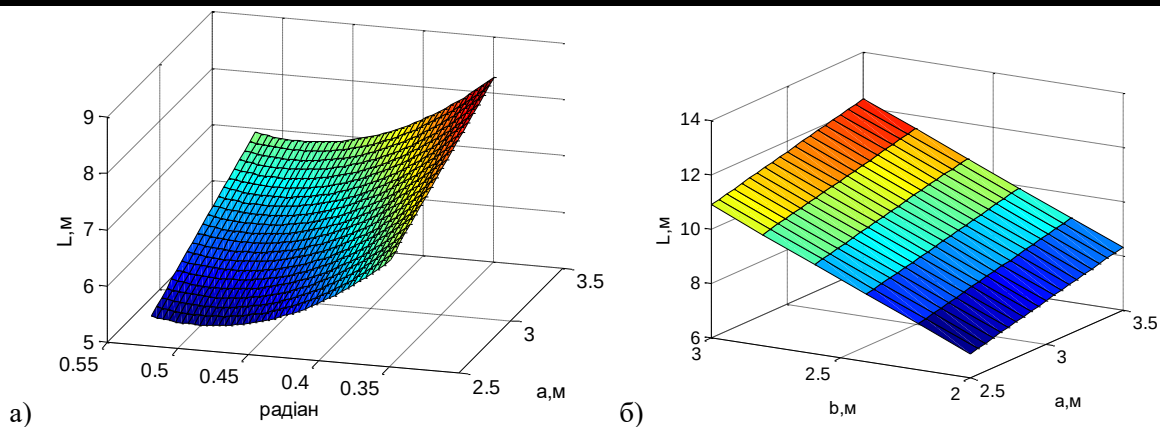


Рис. 2. Залежність довжини трелювальної системи від а) відстані між деревами в ряду та кута напрямленого зрізання дерев при ширині міжряддя 2м та б) від ширини міжряддя та відстані між деревами в ряду, при куті напрямленого зрізання дерев 20^0

Під час виконання даних досліджень враховувався середній діаметр дерев при основі стовбура, а радіус зони безпеки навколо стовбура приймався більшим радіуса основи на 20см.

Обговорення

Сучасні цифрові технології впевнено реалізуються в різних галузях народного господарства та науки. Зокрема, комп'ютерне моделювання технологічного процесу під час наукового дослідження, дозволяє реалізовувати поставлені завдання, отримуючи результати достатньо високої якості, які в окремих випадках, навіть краще можуть відображати процес в порівнянні із натурними дослідженнями. Це стало однією із причин, застосування моделювання в лісогосподарському виробництві, особливо для опису виконання окремих операцій господарських рубок. Зазвичай в наукових дослідженнях, найбільше уваги приділяється операції трелювання деревини, як найбільш трудомісткій і важливій операції всього технологічного процесу лісосічних робіт. Виконання зазначеної операції, пов'язане не тільки із переміщенням деревини, але із екологічними наслідками цього процесу тому, в різних лісоексплуатаційних умовах використовуються різні машини і технології, серед яких домінуючим є трелювання з використанням самохідної техніки.

Під час трелювання деревини по трелювальних волоках, велике значення має їх розміщення на місцевості, що значною мірою впливає на вартість трелювальних робіт та їх екологічність [12]. Авторам вдалося розробити модель, яка дозволяє автоматично проектувати мережу трелювальних волоків із врахуванням економічних та екологічних чинників. Серед екологічних чинників, враховується порушення ґрунту. Дана модель враховує розміщення дерев на площі, виконується оцінка вартості трелювання та вартості відновлення його негативних наслідків, зокрема внаслідок руйнування ґрунту, залежно від типу трелювальних засобів та інших технологічних чинників. Запропонована модель може реалізовувати різні виробничі сценарії, що підтверджує її практичну цінність під час проектування лісосічних робіт.

Запропонована модель стосується класичної технології виконання лісосічних робіт з прокладанням мережі трелювальних шляхів, яка не завжди є доцільною під час поступових чи вибіркового рубок або рубок догляду за лісовими насадженнями. При цьому, автори акцентують увагу головним чином на руйнуванні ґрунту під час трелювання, що є оправдано на промислових рубках головного користування. Під час

виконання рубок догляду, не менш важливим чинником є пошкодження дерев на площі, що неминуче відбувається під час трелювання в насадженні.

Для моделювання процесу трелювання деревини, широко використовується об'єктно-орієнтоване моделювання [13]. Авторами даної наукової публікації, розроблено модель, яка дозволяє генерувати лісове насадження на площі, імітує зрізання дерев бензомоторною пилою чи багатоопераційною машиною з під'їздом наприклад, харвестера до дерева, а також роботу форвардера. В підсумку, можна отримати вартість лісосічних робіт в залежності від їх структури та продуктивності вибраної системи машин. Також модель передбачає можливість відображення інтенсивності переміщення техніки задіяної в процесі, що очевидно буде корисним під час екологічної оцінки.

Зазначена система машин, що розглядається в публікації є типовою в першу чергу для виконання рубок головного користування. Під час виконання рубок догляду або реалізації системи поступових рубок, доцільно застосовувати менш габаритну техніку та освоєння площі широкими пасіками.

Загальна суть лісогосподарських рубок, зводиться до поступового прорідження лісового насадження, яке завершується незадовго до повного вирубування дерев на площі. При цьому вибрані та зрізані і попередньо оброблені дерева, слід трелювати до місця концентрації деревини на площі. Вартість трелювання окремого зрізаного дерева, залежить від його місця розташування на площі, розмірних характеристик [14] та інших чинників, а тому буде різною для кожного окремо вибраного дерева. В зазначеній науковій статті, запропонована модель, яка виконує оцінку вартості трелювання, кожного вибраного в насадженні дерева під час рубки прорідження. Модель дозволяє вибирати оптимальне місце для концентрації деревини, щоб зменшити вартість трелювання вибраних в рубку дерев, а також враховує рельєф місцевості, зокрема середній ухил.

Однак, в зазначеній науковій публікації не фігурує показник пошкодження дерев в насадженні під час трелювання деревини та не має рекомендацій стосовно параметрів трелювальної системи.

Під час трелювання деревини по трелювальних шляхах, загальна площа останніх досягає 10% площі відведеної в рубку [15] і саме трелювальні шляхи в певних умовах, зокрема складного рельєфу є потенційними ділянками розвитку ерозійних процесів. По цій причині, авторами зазначеної наукової публікації, пропонується в умовах із крутими схилами замінювати наземне трелювання деревини на трелювання з використанням канатних систем, які дозволяють уникати руйнування чи порушення ґрунту. Мета дослідження зводилося до порівняння економічних втрат внаслідок руйнування ґрунту під час трелювання деревини різними способами. Підтверджено менші втрати ґрунту під час використання канатних систем і при цьому звертається увага на важливість вибору місць розгалужень трелювальних шляхів.

Наукова робота демонструє порівняльне дослідження трелювання деревини в конкретних лісоексплуатаційних умовах і стосується головним чином промислової рубки. За головний критерій екологічності, вибрано руйнування ґрунту, як потенційний чинник виникнення ерозії.

Висновки

1. Отримано рівняння регресії, яке з достатньою точністю відображає взаємозв'язок між геометричними розмірами трелювальної системи, способом трелювання та характеристикою середовища.

2. Встановлено, що найбільший вплив на максимально допустиму довжину трелювальної системи, серед чинників, які враховувалися, має кут напрямленого зрізання дерев.

3. Встановлено, що ступінь впливу чинника, що враховує кут напрямленого зрізання дерев на відгук складає 2,361, а ступені впливу чинників, які враховують відстань між рядами дерев та відстань між деревами в ряду складають 2,002 і 0,697 відповідно.

4. Показано, що відгук зростатиме за умови збільшення ширини міжряддя та відстані між деревами в ряду, а кут напрямленого зрізання дерев прямуватиме до мінімального. Зокрема, довжина трелювальної системи становитиме 12,304м при ширині міжряддя 3,0м, відстані між деревами в ряду 3,5м і куті напрямленого зрізання дерев 20^0 . Відповідно, якщо ширина міжряддя зменшується до 2,0м, а відстань між деревами в ряду до 2,5м, при куті напрямленого зрізання дерев 30^0 , максимально допустима довжина трелювальної системи становитиме 5,56м.

5. На основі виконаного дослідження, рекомендується напрямлене зрізання дерев в насадженні виконувати під кутом 20^0 , що забезпечить можливість трелювання лісоматеріалів в напівзавантаженому стані максимальної довжини, якщо зазначений кут визначає початкове положення трелювальної системи.

Список використаних джерел

1. R. Balbuena, P. Mac Donagh, J. Marquina, D. Jorajuria, A. Terminiello, J. Claverie. PA-Precision Agriculture: Wheel Traffic Influence on Poplar Regeneration and Grass Yield. *Biosystems Engineering*. Volume 81, Issue 4, April 2002, Pages 379-384. <https://doi.org/10.1006/bioe.2001.0028>
2. E. Ampoorter, R. Goris, W.M. Cornelis, K. Verheyen. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*. Volume 241, Issues 1–3, 30 March 2007, Pages 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.019>
3. Dinko Vusić, Marijan Šušnjar, Enrico Marchi, Raffaello Spina, Željko Zečić, Rodolfo Picchio. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands – Work productivity, energy inputs and emissions. *Ecological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.052>
4. Spinelli, R., Magagnotti, N., & Nati, C. (2010). Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and Management*. Volume 260, Issues 11, 15 November 2010, Pages 1997-2001. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.048>
5. Alessandro K. Cerutti, Angela Calvo, Sander Bruun. Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. *Journal of Cleaner Production*. Volume 64, 1 February 2014, Pages 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.027>
6. Torbjörn Rydberg, Jan Jansén. Comparison of horse and tractor traction using energy analysis. *Ecological Engineering*. Volume 19, Issue 1, July 2002, Pages 13-28. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00015-0)
7. Enrico Marchi, Woodam Chung, Rien Visser, Dalia Abbas, Tomas Nordfjell, Piotr S. Mederski, Andrew McEwan, Michal Brink, Andrea Laschi. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of The Total Environment*. Volume 634, 1 September 2018, Pages 1385-1397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>
8. Dalia Abbas, Robert M. Handler. Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. *Journal of Cleaner Production*. Volume 176, 1 March 2018, Pages 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.238>
9. Orlovský, L., Messingerová, V., & Danihelová, Z. (2020). Analysis of time efficiency of skidding technology based on the skidders. *Cent. Eur. For. J. (Central European Forestry Journal)* 66(2020) 177-187. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0016>

10. Цимбалюк Ю. І. Технологічні особливості освоєння лісосік із застосуванням малогабаритної трелювальної техніки / Ю. І. Цимбалюк// Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2025. – т.35, №4 – С. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.36930/40350404>

11. Цимбалюк Ю.І., Цимбалюк І.Ю. Моделювання процесу трелювання деревини під наметом лісового насадження. Науковий журнал "Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів", №27 - Харків: ДБТУ, 2025 – С.80-92. DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-80>

12. Marco A. Contreras, David L. Parrott, Woodam Chung. Designing Skid-Trail Networks to Reduce Skidding Cost and Soil Disturbance for Ground-Based Timber Harvesting Operations. *Forest Science*, Volume 62, Issue 1, 1 February 2016, Pages 48–58. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-146>

13. Jingxin Wang, Chris B. LeDoux. Estimating and Validating Ground-Based Timber Harvesting Production Through Computer Simulation. *Forest Science*, Volume 49, Issue 1, February 2003, Pages 64–76. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.64>

14. Marco A. Contreras, Woodam Chung, A Modeling Approach to Estimating Skidding Costs of Individual Trees for Thinning Operations. *Western Journal of Applied Forestry*, Volume 26, Issue 3, July 2011, Pages 133–146. <https://doi.org/10.1093/wjaf/26.3.133>

15. William C. Worrell, M. Chad Bolding, Wallace M. Aust. Potential Soil Erosion following Skyline Yarding versus Tracked Skidding on Bladed Skid Trails in the Appalachian Region of Virginia. *Southern Journal of Applied Forestry*, Volume 35, Issue 3, August 2011, Pages 131–135. <https://doi.org/10.1093/sjaf/35.3.131>

References

1. R. Balbuena, P. Mac Donagh, J. Marquina, D. Jorajuria, A. Terminiello, J. Claverie. PA—Precision Agriculture: Wheel Traffic Influence on Poplar Regeneration and Grass Yield. *Biosystems Engineering*. Volume 81, Issue 4, April 2002, Pages 379-384. <https://doi.org/10.1006/bioe.2001.0028>

2. E. Ampoorter, R. Goris, W.M. Cornelis, K. Verheyen. Impact of mechanized logging on compaction status of sandy forest soils. *Forest Ecology and Management*. Volume 241, Issues 1–3, 30 March 2007, Pages 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.019>

3. Dinko Vusić, Marijan Šušnjar, Enrico Marchi, Raffaello Spina, Željko Zečić, Rodolfo Picchio. Skidding operations in thinning and shelterwood cut of mixed stands – Work productivity, energy inputs and emissions. *Ecological Engineering*. Volume 61, Part A, December 2013, Pages 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.052>

4. Spinelli, R., Magagnotti, N., & Nati, C. (2010). Benchmarking the impact of traditional small-scale logging systems used in Mediterranean forestry. *Forest Ecology and Management*. Volume 260, Issues 11, 15 November 2010, Pages 1997-2001. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.048>

5. Alessandro K. Cerutti, Angela Calvo, Sander Bruun. Comparison of the environmental performance of light mechanization and animal traction using a modular LCA approach. *Journal of Cleaner Production*. Volume 64, 1 February 2014, Pages 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.027>

6. Torbjörn Rydberg, Jan Jansén. Comparison of horse and tractor traction using emergy analysis. *Ecological Engineering*. Volume 19, Issue 1, July 2002, Pages 13-28. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00015-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00015-0)

7. Enrico Marchi, Woodam Chung, Rien Visser, Dalia Abbas, Tomas Nordfjell, Piotr S. Mederski, Andrew McEwan, Michal Brink, Andrea Laschi. Sustainable Forest Operations (SFO): A new paradigm in a changing world and climate. *Science of The Total Environment*.

Volume 634, 1 September 2018, Pages 1385-1397.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.084>

8. Dalia Abbas, Robert M. Handler. Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. *Journal of Cleaner Production*. Volume 176, 1 March 2018, Pages 512-520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.238>

9. Orlovský, L., Messingerová, V., & Danihelová, Z. (2020). Analysis of time efficiency of skidding technology based on the skidders. *Cent. Eur. For. J. (Central European Forestry Journal)* 66(2020) 177-187. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0016>

10. Tsymbalyuk, Yu.I. (2025). Technological aspects of the development of felling areas using small-sized skidding equipment. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 36-42. <https://doi.org/10.36930/40350404>

11. Tsymbalyuk Yu.I., Tsymbaliuk I.Yu. Modeling the process of skidding wood under the canopy of a forest plantation. [Text] /Yu. I. Tsymbalyuk// Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: scientific journal. – Kharkiv, 2025, No. 27 – P. 80-92. DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-80>

12. Marco A. Contreras, David L. Parrott, Woodam Chung. Designing Skid-Trail Networks to Reduce Skidding Cost and Soil Disturbance for Ground-Based Timber Harvesting Operations. *Forest Science*, Volume 62, Issue 1, 1 February 2016, Pages 48–58. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-146>

13. Jingxin Wang, Chris B. LeDoux. Estimating and Validating Ground-Based Timber Harvesting Production Through Computer Simulation. *Forest Science*, Volume 49, Issue 1, February 2003, Pages 64–76. <https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.64>

14. Marco A. Contreras, Woodam Chung, A Modeling Approach to Estimating Skidding Costs of Individual Trees for Thinning Operations. *Western Journal of Applied Forestry*, Volume 26, Issue 3, July 2011, Pages 133–146. <https://doi.org/10.1093/wjaf/26.3.133>

15. William C. Worrell, M. Chad Bolding, Wallace M. Aust. Potential Soil Erosion following Skyline Yarding versus Tracked Skidding on Bladed Skid Trails in the Appalachian Region of Virginia. *Southern Journal of Applied Forestry*, Volume 35, Issue 3, August 2011, Pages 131–135. <https://doi.org/10.1093/sjaf/35.3.131>

Отримано: 06.04.2026. Прийнято: 16.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Завгородній О. І.
ORCID iD: 0000-0003-2510-9160
Богомолів О. В.
ORCID iD: 0009 0004 8070 6157
Богомолів О. О.
ORCID iD: 0009-0006-4137-0181
Бойко Є. В.
ORCID iD: 0009-0009-4340-165X

Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНОГО РУХУ ЧАСТИНКИ ПО ПОХИЛІЙ ПЛОЩИНІ З ПОДАЧЕЮ У ПОПЕРЕЧНОМУ НАПРЯМКУ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.60>

УДК 631.362

Завгородній О. І., Богомолів О. В., Богомолів О. О., Бойко Є. В. Моделювання ударного руху частинки по похилій площині з подачею у поперечному напрямку

Анотація. Проаналізовано методи сепарації сипких матеріалів, за ознаками подільності, які на даний час застосовуються в відомих сепараторах. Показано, що вибір ознаки подільності є особливо важливим при підготовці посівного матеріалу, тому що з усієї маси насіння отриманого при збиранні необхідно вибрати насіннєвий матеріал, який має найбільший біологічний потенціал закладений в ньому генетично. Ця задача, як правило, вирішується із застосуванням комплексу ознак подільності, що приводить до зниження продуктивності сепарації збільшенню енергії витрат та травмованості зерна, тому правильний вибір та обґрунтування ознаки подільності, яка є найбільш ефективною розглядається в даній роботі. Розглянуто гравітаційний рух пружної округлої частинки по похилій площині. На основі диференціальних рівнянь з використанням теорії удару побудовані циклічні траєкторії польоту частинки у відносній системі координат, зв'язаній з площиною. Показано, що за ознаку гравітаційного розподілу зернових сумішей на похилій площині доцільно прийняти момент інерції частинок відносно їх центра мас.

Ключові слова: сепарація, моделювання, ударний рух, похила площина, траєкторії руху, момент інерції.

Zavgorodniy O. I., Bogomolov O. V., Bogomolov O. O., Boyko E. V. Modeling of the impact motion of a particle along an inclined plane with a feed in the transverse direction

Abstract. The methods of separation of loose materials, according to the signs of divisibility, which are currently used in known separators, are analyzed. It is shown that the choice of the sign of divisibility is especially important in the preparation of seed material, because from the entire mass of seeds obtained during harvesting, it is necessary to select the seed material that has the greatest biological potential genetically inherent in it. This problem is usually solved using a complex of signs of divisibility, which leads to a decrease in separation productivity, an increase in energy consumption and grain injury, therefore the correct choice and justification of the sign of divisibility, which is the most effective, is considered in this work. The gravitational motion of an elastic round particle along an inclined plane is considered. Based on differential equations using the theory of impact, cyclic trajectories of the particle's flight in a relative coordinate system related to the plane are constructed. It is shown that it is advisable to take the moment of inertia of particles relative to their center of mass as a sign of the gravitational distribution of grain mixtures on an inclined plane.

Keywords: separation, modeling, impact motion, inclined plane, motion trajectories, moment of inertia.

Постановка проблеми. Результат розподілу сипких матеріалів на фракції залежить від обраної ознаки розподілу. Якщо, наприклад, основна фракція і домішки відрізняються за розмірами, то ознакою розподілу може бути товщина, ширина або довжина частинок. В цьому разі застосовують решітні очисні машини чи трієри. На решетах з довгастими отворами суміші розділяють по найменшому розмірі (товщині), на решетах з круглими отворами – по середньому розмірі (ширині), а для розподілу по найбільшому розміру (довжині) застосовують трієри. Якщо фракції суміші за розмірами майже не відрізняються, то для їх розподілу застосовують інші ознаки: шорсткість, волохатість поверхні, форма, питома вага, колір, коефіцієнт парусності тощо. Особливо важливим є вибір ознаки розподілу для підготовки посівного матеріалу. Необхідно з усієї маси насіння, отриманого при збиранні, відібрати насіннєвий матеріал, що має найбільшу біологічну цінність. Сюди повинне увійти насіння, яке після висіву реалізує біологічний потенціал, закладений в ньому генетично. Але вказана задача в повній мірі вирішується не завжди просто. Інколи вона змушує застосовувати по черзі кілька ознак розподілу підряд, що знижує продуктивність і може привести до збільшення пошкоджень зерна. В цих умовах на першому плані стоїть правильний вибір чи обґрунтування нової ознаки розподілу, яка є найбільш ефективною. На наш погляд ефективною ознакою розподілу може бути момент інерції частинок відносно їх центра мас. Момент інерції залежить від розподілу мас всередині цієї насінини і саме цей розподіл виділяє зріле виповнене зерно серед інших насінин. Тому видається доцільним розділяти деякі зернові суміші саме за моментом інерції. Останнім часом велика увага надається енергоощадним технологіям, основою яких є гравітація. Як правило, робота гравітаційних сепараторів базується на відмінностях фракцій по шорсткості та пружності але на сьогодні можливість застосування момента інерції частинок, як ознаки розподілу на цих сепараторах, вивчена не достатньо і потребує подальшого розгляду.

Аналіз існуючих досліджень. Гравітаційний рух частинки по гравітаційній поверхні розглянуто в роботі [1]. В цій роботі вивчалася кочення частинки при переміщенні сепаруючою поверхнею у поперечному напрямку відносно її нахилу. Співударення частинки з поверхнею не розглядалося. Роботи [2-5] присвячені дослідженню періодичних режимів руху кулястої частинки у повітряному потоці між двома площинами. Розглянуто як періодичні симетричні режими – для вертикально розміщених площин [4], так і асиметричні – для похилих площин [5]. Для підтримки вказаних режимів обов'язкове коливання площин. Найбільш близькою за змістом до цієї статті є робота [6]. Вона присвячена дослідженню неперіодичних режимів руху частинки у повітряному потоці між двома площинами, що коливаються. При деяких обмеженнях на параметри системи взаємодія частинки з верхньою площиною припиниться і вона буде рухатися в ударному режимі по нижній площині.

Як бачимо, взаємодія частинок матеріалу з робочою поверхнею гравітаційних сепараторів відбувається за допомогою удару [9-12]. При великих швидкостях удару, більших, ніж 4 м/с, слід враховувати пластичні деформації, що виникають в зоні контакту [8-10]. При цьому ефективною є Пуассонівська модель удару, де враховуються фази стискання та відновлення частинок. Але гравітаційні технології підтримують переважно режими руху при швидкостях, значно менших 4 м/с. В цьому випадку допустимою є теорія удару, яка оснований на відомій гіпотезі Ньютона або уточнена теорія удару Плявнієкса В.Ю., яка прийнята в цій роботі. Розрахунки та графічні ілюстрації виконані в середовищі Mathcad [13].

Метою роботи є виявлення особливостей ударного руху частинок суміші на основі аналізу траєкторій вказаного руху та обґрунтування можливості використання момента інерції частинок відносно їх центра мас, як ознаки розподілу сипких матеріалів на фракції.

Основні результати роботи. Розглянемо рух окремої частинки сипкого матеріалу по робочій поверхні у вигляді похилої площини (рис.1). Значна частина сипких матеріалів включає частинки кулястої форми. Наприклад, кулясту форму має насіння ріпаку, гороху, проса, маку, капусти та багатьох інших рослин. Отже, прийнемо далі, що частинки оброблюваного матеріалу мають кулясту форму. Відмітимо також, що результати досліджень для кулястої форми можуть бути перенесені і на частинки інших форм, якщо треба оцінити процеси руху не кількісно, а лише якісно. Крім того, в гравітаційних сепараторах заради зменшення травмування зерна при співударяннях з робочими поверхнями встановлюються малі швидкості зіткнення. В цих умовах опором повітря при дослідженнях руху частинок доцільно знехтувати.

Розрахункова схема руху кульки зображена на рис.1. Нехай α – кут нахилу робочої поверхні; ψ – кут поперечної подачі частинки відносно горизонталі. Забезпечити необхідну швидкість завантаження $\vec{U}$ можна, наприклад, за рахунок скочування частинки з деякої висоти h по прямолінійній напрямній, яка встановлена під тим же кутом ψ відносно горизонталі. Вважаючи, що частинки скочуються по напрямній без проковзування, одержано вирази для лінійної ($\vec{U}$) і кутової ($\vec{\omega}$) швидкостей до удару в проекціях на вісі відносної системи координат $x y z$ (рис.1):

$$U = \sqrt{2gh}, \quad U_x = U \cos \psi, \quad U_y = -U \sin \psi \sin \alpha; \quad U_z = U \sin \psi \cos \alpha; \quad (1)$$

$$\omega = U/r, \quad \omega_x = 0, \quad \omega_y = -\omega \cos \alpha, \quad \omega_z = -\omega \sin \alpha. \quad (2)$$

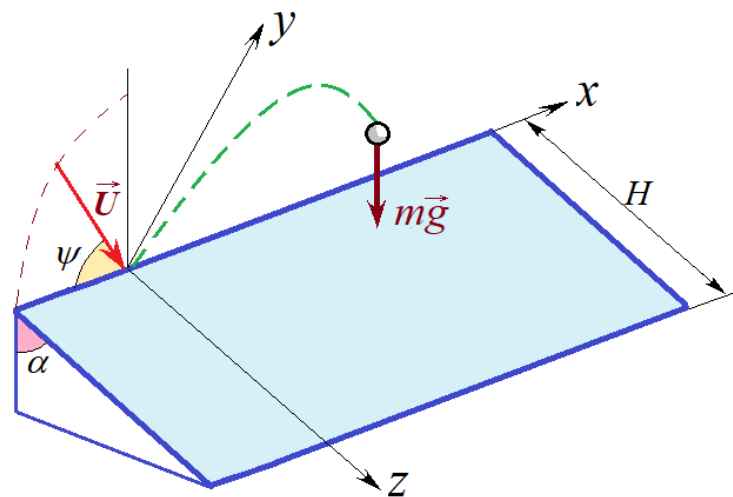


Рис. 1. Схема моделювання руху частинки після удару об похилу площину з подачею в поперечному напрямку

Для знаходження кінематичних параметрів руху частинки після удару застосовувалося рівняння косоного удару об перешкоду Плявнієкса В.Ю. [11]. Наведемо ці рівняння, модифіковані в роботі [12], для частинок кулястої форми:

$$V_x = U_x - \frac{\mu(U_x + \omega_z r)}{1 + \mu}, \quad V_y = -R U_y, \quad V_z = U_z - \frac{\mu(U_z - \omega_x r)}{1 + \mu}, \quad (3)$$

$$\Omega_x = \omega_x + \frac{U_z - \omega_x r}{r(1 + \mu)}, \quad \Omega_y = \omega_y, \quad \Omega_z = \omega_z - \frac{U_x + \omega_z r}{r(1 + \mu)}, \quad (4)$$

де: $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)$, $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ – швидкість центра мас кульки, відповідно, до та після удару;

$\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$, $\vec{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ – кутова швидкість руху кульки, відповідно, до та після удару;

R – коефіцієнт відновлення швидкості при ударі;

$\mu = (\rho/r)^2$; r , ρ – відповідно, радіус кульки і радіус інерції кульки, при цьому $0 < \mu < 2/3$ [14].

Диференціальні рівняння польоту частинки між співударяннями мають вигляд:

$$\ddot{x} = 0; \quad \ddot{y} = -g \sin \alpha; \quad \ddot{z} = g \cos \alpha. \quad (5)$$

Розв'язок цих рівнянь при початкових умовах (6)

$$x = x_0, \quad y = y_0, \quad z = z_0, \quad \dot{x} = V_{x0}, \quad \dot{y} = V_{y0}, \quad \dot{z} = V_{z0} \quad \text{при} \quad t = t_0 \quad (6)$$

одержано у наступному вигляді:

$$\dot{x} = V_{x0}, \quad \dot{y} = V_{y0} - g(t - t_0) \sin \alpha, \quad \dot{z} = V_{z0} + g(t - t_0) \cos \alpha; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x &= x_0 + V_{x0} (t - t_0), & y &= y_0 + V_{y0} (t - t_0) - \frac{1}{2} g (t - t_0)^2 \sin \alpha, \\ z &= z_0 + V_{z0} (t - t_0) + \frac{1}{2} g (t - t_0)^2 \cos \alpha. \end{aligned} \quad (8)$$

Кінематичні параметри пружної частинки в момент завантаження на площину (до першого зіткнення) визначалися за співвідношеннями (1)-(2), а початкові умови після відриву від площини – за рівняннями удару (3)-(4). Далі застосовувався метод припасовування інтервалів, коли кінцеві параметри кожного попереднього інтервалу вважалися початковими параметрами для кожного наступного. Інтервалом вважається політ частинки між двома сусідніми ударами об площину. Параметри польоту визначалися рівняннями (7), (8). Розрахунок руху частинки продовжувався до моменту оминання нею нижньої кромки робочої поверхні. Цей момент настає, коли координата z при польоті частинки досягає ширини H робочого органу (рис.1). Отже, останній інтервал, як правило, є скороченим, а його тривалість знаходиться з останнього із рівнянь (8) при умові $z = H$ (з двох коренів приймається додатний):

$$t = t_0 - \frac{V_{z0}}{g \cos \alpha} + \sqrt{\left(\frac{V_{z0}}{g \cos \alpha}\right)^2 + \frac{2(H - z_0)}{g \cos \alpha}}. \quad (9)$$

Для побудови просторової траєкторії руху частинки використовувалась влаштована функція Mathcad: $\text{CreateSpace}(F, t_0, t_k, tgrig, fmap)$. В ній: F – трьох-елементна векторна функція однієї змінної (t); t_0, t_k – проміжок для змінної t ; $tgrig$ – число точок кривої; $fmap$ – необов'язковий параметр, який вказує на вид координат для побудови графіка (при відсутності параметра $fmap$ координати вважаються декартовими). В нашому випадку $F = (x(t) \ y(t) \ z(t))^T$, де "T" – символ

транспонування вектора. Результати розрахунків проілюстровані графіками нижче. Для більшої наглядності масштабний коефіцієнт висоти підскоку частинок по осі Oy збільшено до $\kappa = 3$.

Критерієм розподілу сумішей в гравітаційному сепараторі може бути “дальність стрибків” частинок при відбиванні від робочої поверхні або “дальність транспортування” (значення координати x сходу частинок з робочої поверхні – рис.1).

На рис.2 (а) зображені траєкторії руху частинок, які відрізняються шорсткістю ($f = 0,1$ – крива червоного кольору, $f = 0,9$ – синього). Як бачимо, коефіцієнт тертя майже не впливає на траєкторію руху частинок. Це означає, що навіть у тому разі якщо коефіцієнти тертя частинок суміші мають великі розбіжності їх сепарація на фрикційних поверхнях з ударом недоцільна і в цьому випадку слід здійснювати пошук іншого способу сепарації, наприклад на віброфрикційних поверхнях або горках з рухомою поверхнею.

На рис. 2 (б) – траєкторії руху частинок, які відрізняються пружністю ($R = 0,25$ для кривої зеленого кольору, $R = 0,65$ – для кривої рожевого кольору). Перший критерій (дальність стрибків) успішно використовується, що не суперечить одержаним кривим. Але за другим критерієм (дальність транспортування) розділити суміші на фракції різної пружності неможливо.

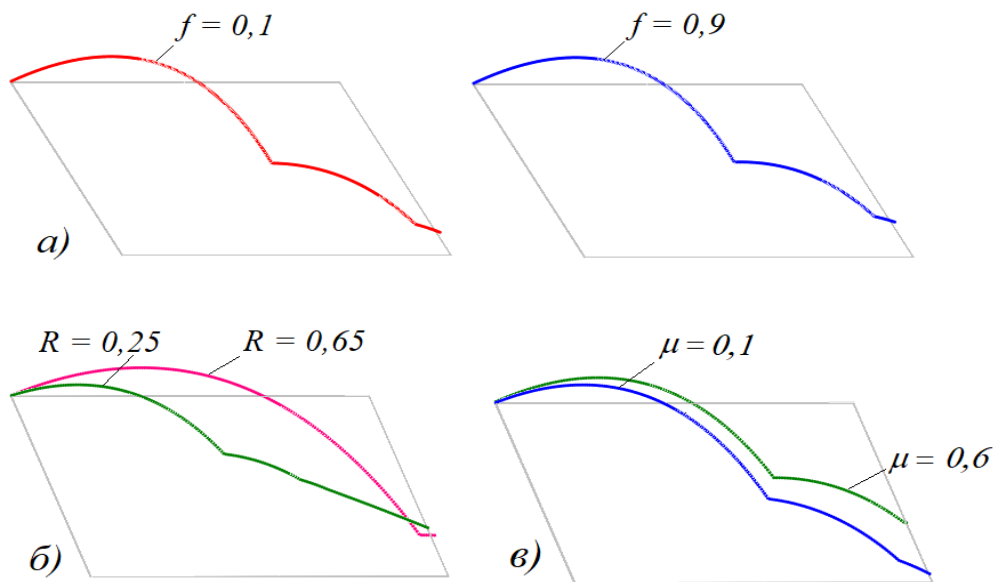


Рис. 2. Просторове зображення траєкторій руху частинок при: $\alpha = 45^\circ$; $\psi = 60^\circ$; $H = 0,4 \text{ м}$; а) $R = 0,5$, $\mu = 0,4$; б) $f = 0,4$, $\mu = 0,4$; в) $R = 0,45$, $f = 0,4$.

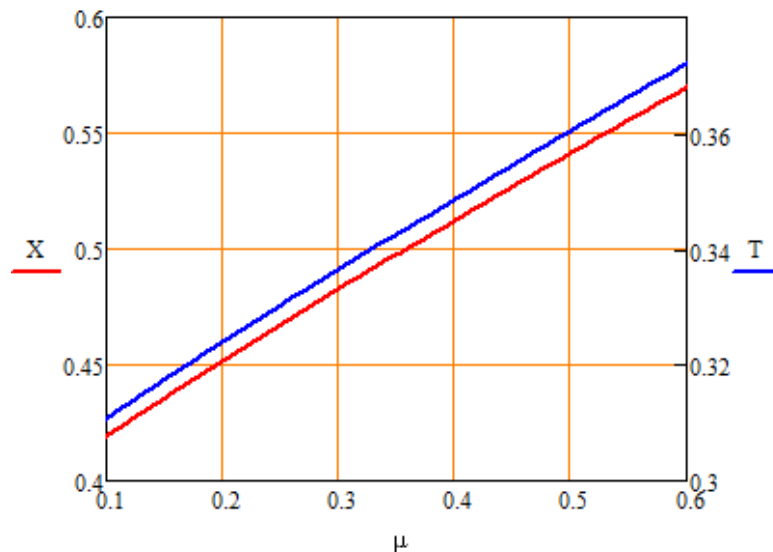


Рис. 3. Залежності дальності і часу транспортування частинок вздовж осі Ox від показника μ при: $h_0 = 0,3\text{ м}$; $H = 0,4\text{ м}$; $r = 0,006\text{ м}$; $\alpha = 60^\circ$; $\psi = 45^\circ$; $f = 0,6$; $R = 0,5$.

Можна також відзначити, що траєкторії руху частинок у цьому випадку відрізняються по висоті. Це наводить на думку про пошук нових способів сепарації за цією ознакою. Наприклад, на багатоярусних ударних сепараторах частинки, що мають більшу висоту траєкторій, можуть співударятись з верхніми сепаруючими поверхнями, а значить траєкторії частинок пружної фракції будуть іншими.

На рис.2(в) маємо траєкторії руху частинок в залежності від показника μ , який прямо пропорційний моменту інерції ($J = m\mu r^2$). Ці траєкторії (синього та зеленого кольору) суттєво відрізняються між собою за дальністю транспортування при майже однаковій дальності стрибків. Це вказує на можливість розподілу сумішей на фракції, частинки яких відрізняються моментом інерції. Більш детально ця особливість показана на рис.3 (червоний колір). З нього випливає, що дальність транспортування лінійно залежить від показника μ на відповідному відрізку $[0,1; 0,6]$. Аналогічна залежність має місце для часу транспортування (синій колір). За вказаною ознакою можлива як сепарація, так і сортування насіння.

Висновки. Проведено теоретичні дослідження руху частинок кулястої форми по гравітаційній поверхні. Показана доцільність проведення розрахунків і побудови просторових траєкторій руху частинок у середовищі Mathcad. З'ясовано, що дальність транспортування фракцій сипкої суміші, які відрізняються між собою пружністю або шорсткістю практично однакова, тому сепарація сумішей за цим критерієм недоцільна. Поряд з цим, частинки суміші з більшою пружністю мають в процесі руху більшу дальність стрибків, що вже успішно використовується, але різниця у висоті підскоку частинок різної пружності, як критерій розподілу, практично не реалізується. На нашу думку цей критерій може бути корисним для багатоярусних гравітаційних сепараторів, де пружні частинки можуть взаємодіяти з верхніми робочими органами, в результаті чого їх траєкторія буде вигідно відрізнятися порівняно з траєкторіями інших частинок. Момент інерції частинок відносно їх центра мас, як критерій розподілу, до цього часу вивчений не достатньо. Як відомо, він залежить від розподілу мас всередині цієї насінини і саме цей розподіл виділяє зріле виповнене зерно серед інших насінин. Виконані дослідження показали, що траєкторії руху частинок з різними моментами

інерції мають достатньо різну дальність транспортування. Це свідчить про доцільність розподілу сипких сумішей на гравітаційних сепараторах за цим критерієм.

Список використаних джерел

1. Богомолів А.В. Сепарація труднорозделимых сыпучих смесей. Монографія: – Х.: ХНТУСХ ім. П. Василенко. 2013. – 308 с.
2. Патент на корисну модель 75152 від 26.11.2012. Вібродарний сепаратор для очищення сипучих сумішей / Сіняєва О.В., Завгородній О.І.: Україна, Український інститут промислової власності.
3. Патент на корисну модель 76324 від 25.12.2012. Вібросепаратор вертикального типу з повітряним потоком для розділення сипучих сумішей / Сіняєва О.В., Завгородній О.І.: Україна, Український інститут промислової власності.
4. Завгородній А.И. Движения шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями / Завгородній А.И., Сіняєва О.В. // “Вібрації в техніці та технологіях”: Всеукраїнський науково-технічний журнал, №3(67).– Вінниця: ВНАУ, 2012.– С.20-27.
5. Завгородній А.И. Асимметричный режим движения шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями / Завгородній А.И., Сіняєва О.В. // “Процеси та апарати харчових виробництв”: Наукові праці національного університету харчових технологій, Вип..47.– Київ, НУХТ, 2012.– С.61-67.
6. Завгородній О.І., Сіняєва О.В. Траєкторії руху кулі в повітряному потоці між похилими площинами, що коливаються // “Механізація сільськогосподарського виробництва”: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, Вип.148.– Харків, ХНТУСГ, 2014.– С.362-370.
7. Шелест А.Г. Сепарування зернових мас із використанням сил гравітації / А.Г. Шелест, Т.П. Чернишук, В.С. Кошулько // Ж. Хранение и переработка зерна, 2017. – №11.– С.47–49.
8. Бредихін В.В., Богомолів О.В., Сліпченко М.В. та ін. Наукові основи ощадної підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом. Монографія. – Харків, Діса+: – 2023. – 408 с.
9. Ольшанський В.П. Про взаємодію важкого твердого тіла з пружним півпростором / В.П. Ольшанський, О.В. Богомолів, О.О. Богомолів //Сучасні напрями технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. – Х.: 2018. – Вип. № 194.– С. 38–46.
10. Ольшанський В.П. Про удар в'язкопружного тіла по нерухомому півпростору/ В.П. Ольшанський //Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин, 2018, №38 (1314), с.37-41.
11. Oscillations with positional friction under mechanical shock / Vasyl Olshansky, Oleksii Bogomolov, Oleksii Bogomolov, Viktor Irkliencko, Lilia Kys-Korkyshenko // Тека. A QUARTERL JORNAL OF AGRI-FOOD INDUSTRY. – 2019, Vol. 19, № 1, P. 49–58.
12. Завгородній О.І. Просторовий удар сферичного тіла об перешкоду / О. І. Завгородній, О. В. Сіняєва // Вісник Харків. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. - Харків : КП "Міська друкарня", 2014. - Вип. 152: Сучас. напрями технології та механізації процесів перероб. і харч. вир-в. - С. 42-51.
13. Паранчук Я. С., Мороз В. І. Обчислювання та програмування в Mathcad: підручник. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. — 364 с.
14. Завгородній А.И., Обыхвост А.В. К исследованию движения частиц округлой формы по рабочим поверхностям машин // Динаміка та міцність машин, будівель і споруд: 36. наук. пр. ПНТУ ім. Ю. Кондратюка – Полтава, 2009.– С.119-125.

References

1. Bogomolov A.V. Separation of difficult-to-separate bulk mixtures. Monograph: – Kh.: KhNTUSKh im. P. Vasylenko. 2013. – 308 p.
2. Patent for utility model 75152 dated 11/26/2012. Vibro-impact separator for cleaning bulk mixtures / Sinyaeva O.V., Zavgorodny O.I.: Ukraine, Ukrainian Institute of Industrial Property.
3. Patent for utility model 76324 dated 12/25/2012. Vertical-type vibrating separator with air flow for separating bulk mixtures / Sinyaeva O.V., Zavgorodny O.I.: Ukraine, Ukrainian Institute of Industrial Property.
4. Zavgorodny A.I. Ball motion in the air flow between vibrating planes / Zavgorodny A.I., Sinyaeva O.V. // “Vibrations in engineering and technologies”: All-Ukrainian scientific and technical journal, No. 3(67).– Vinnytsia: VNAU, 2012.– P.20-27.
5. Zavgorodny A.I. Asymmetric mode of ball motion in the air flow between vibrating planes / Zavgorodny A.I., Sinyaeva O.V. // “Processes and apparatuses of food production”: Scientific works of the National University of Food Technologies, Vol. 47.– Kyiv, NUHT, 2012.– P.61-67.
6. Zavgorodny O.I., Sinyaeva O.V. Trajectories of the ball in the air flow between oscillating inclined planes // “Mechanization of agricultural production”: Bulletin of the Petro Vasylenko KhNTUSG, Issue 148.– Kharkiv, KhNTUSG, 2014.– P.362-370.
7. Shelest A.G. Separation of grain masses using gravitational forces / A.G. Shelest, T.P. Chernyshuk, V.S. Koshulko // Journal of Grain Storage and Processing, 2017. №11.– P.47–49.
8. Bredykhin V.V., Bogomolov O.V., Slipchenko M.V. et al. Scientific foundations of economical seed preparation with improved biological potential. Monograph. – Kharkiv, Disa+: – 2023. – 408 p.
9. Olshanskyi V.P. On the interaction of a heavy solid body with an elastic half-space / V.P. Olshansky, O.V. Bogomolov, O.O. Bogomolov //Modern trends in technology and mechanization of processing and food production processes: Bulletin of KhNTUSG. – Kh.: 2018. – Issue No. 194.– P. 38–46.
10. Olshansky V.P. On the impact of a viscoelastic body on a stationary half-space / V.P. Olshansky // Bulletin of NTU "XPI". Series: Dynamics and strength of machines, 2018, No. 38 (1314), p.37-41.
11. Oscillations with positional friction under mechanical shock / Vasyl Olshansky, Oleksii Bogomolov, Oleksii Bogomolov, Viktor Irkliencko, Lilia Kys-Korkyshenko // Teka. A QUARTERL JORNAL OF AGRI-FOOD INDUSTRY. – 2019, Vol. 19, No. 1, P. 49–58.
12. Zavgorodny O.I. Spatial impact of a spherical body on an obstacle / O. I. Zavgorodny, O. V. Siniaeva // Visnyk Kharkiv. nat. tekhn. un-tu syl. hosp-va im. P. Vasylenko. - Kharkiv: KP "Miska drukharnia", 2014. - Issue 152: Modern. directions of technology and mechanization of processes of processing. and food production. - P. 42-51.
13. Paranchuk Ya. S., Moroz V. I. Computation and programming in Mathcad: a textbook. — Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic, 2013. — 364 p.
14. Zavgorodny A.I., Obykhvost A.V. To the study of the motion of round-shaped particles on the working surfaces of machines // Dynamics and strength of machines, buildings and structures: Collection of scientific works of the Yu. Kondratyuk Polytechnic University - Poltava, 2009.– P.119-125.

Отримано: 07.04.2026. Прийнято: 16.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Козаченко О. В.
ORCID iD: 0000-0003-1326-4307
E-mail: o.v.kozachenko21@gmail.com

Дьяконов С. О.
ORCID iD: 0000-0002-2451-5610

Пахучий А. М.
ORCID 0000-0002-7371-5264

Волковський О. М.
ORCID iD: 0009-0006-5516-0601

Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ДИСКОВОГО ГРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ З АДАПТИВНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЖОРСТКОСТІ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.68>

УДК 631.316

Козаченко О. В., Дьяконов С. О., Пахучий А. М., Волковський О. М. **Математичне моделювання динаміки дискового ґрунтообробного агрегату з адаптивними параметрами жорсткості**

Анотація. У статті представлено результати дослідження динамічної стійкості ґрунтообробного агрегату типу дискатор. Метою роботи є розробка та верифікація математичної моделі, що описує функціонування системи «трактор–дискатор» як просторової механічної структури для підвищення якості технологічного процесу поверхневого обробітку ґрунту. У ході дослідження, на основі положень класичної механіки, було сформовано систему диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду. Особливу увагу приділено взаємодії робочих органів на пружних стояках із регулятором жорсткості та опорно-прикочувального котка з неоднорідним ґрунтовим середовищем. Модель враховує випадковий характер збурень, спричинених мікрорельєфом поля, які провокують вібрації рами та зміну тягового опору ґрунтообробного агрегату. Для перевірки теоретичних положень проведено чисельне моделювання в середовищі SOLIDWORKS Simulation. Встановлено, що за використання пружного кріплення з регулятором жорсткості кутові відхилення робочих органів ґрунтообробного знаряддя в експлуатаційних режимах є мінімальними ($\varphi = 2,34^\circ$, $\psi = 0,85^\circ$). Доведено, що незначна деформація пружних стояків забезпечує стабільність глибини проникнення дисків та високу рівномірність обробітку по всій ширині захвату. Практична значущість результатів дослідження полягає в підтвердженні ефективності запропонованої конструктивної схеми, що дозволяє мінімізувати резонансні явища, знизити енергетичні витрати та покращити агротехнічні показники стану поверхні поля. Отримані дані можуть бути використані при проектуванні нових типів енергоефективних ґрунтообробних машин.

Ключові слова: дискатор, математична модель, рівняння Лагранжа, динамічна стійкість, пружна стійка, чисельне моделювання, якість обробітку ґрунту.

Kozachenko O.V., Dyakonov S.O., Pakhuchy A.M., Volkovsky O.M. **Mathematical modeling of the dynamics of a disk tillage unit with adaptive stiffness parameters**

Abstract. The article presents the results of a study of the dynamic stability of a soil tillage unit of the disc harrow type. The aim of the work is to develop and verify a mathematical model that describes the functioning of the “tractor-disc harrow” system as a spatial mechanical structure to improve the quality of the technological process of surface tillage. In the course of the study, based on the provisions of classical mechanics, a system of Lagrange

differential equations of the second kind was formed. Special attention is paid to the interaction of working bodies on elastic struts with a stiffness regulator and a support and compaction roller with a heterogeneous soil environment. The model takes into account the random nature of disturbances caused by the microrelief of the field, which provoke frame vibrations and changes in the traction resistance of the tillage unit. To verify the theoretical provisions, numerical modeling was carried out in the SOLIDWORKS Simulation environment. It was established that when using an elastic mount with a stiffness regulator, the angular deviations of the working bodies of the tillage tool in operational modes are minimal ($\varphi = 2.34^\circ$, $\psi = 0.85^\circ$). It is proved that a slight deformation of the elastic struts ensures the stability of the depth of penetration of the disks and high uniformity of cultivation across the entire width of the grip. The practical significance of the research results lies in confirming the effectiveness of the proposed design scheme, which allows minimizing resonance phenomena, reducing energy consumption and improving the agrotechnical indicators of the field surface. The obtained data can be used in the design of new types of energy-efficient tillage machines.

Keywords: diskator, mathematical model, Lagrange equation, dynamic stability, elastic strut, numerical modeling, quality of tillage.

Постановка проблеми

Сучасні системи обробітку ґрунту передбачають широке використання ґрунтообробних агрегатів з дисковими робочими органами. При їх застосуванні передбачається одержання верхнього посівного шару дрібнокомкової структури, у відповідності до встановлених агротехнічних вимог, яка є найбільш бажаною для розвитку кореневої системи рослин. Проблемними аспектами при роботі дискаторів залишається здатність зберігати стабільну глибину та траєкторію руху дискових робочих органів на пружному кріпленні під час вібрацій та ударних навантажень на швидкості, зазвичай, 12-15 км/год. Важливим аспектом при створенні ефективних засобів поверхневого обробітку ґрунту з дисковими робочими органами також є спрямування на енергозбереження для заданих умов роботи, що напряму залежить від технічного рівня машин та забезпечення їх динамічної стійкості. Тому подальше вивчення процесу функціонування системи «трактор-дискатор» як просторової механічної структури може вважатися важливим науково-прикладним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження стійкості ґрунтообробних знарядь з дисковими робочими органами, які входять до складу машинно-тракторного агрегату, є визначальним резервом підвищення ефективності поверхневого обробітку ґрунту щодо відповідності встановленим агротехнічним нормам, спрямування на енергозбереження, підвищення показників надійності сільськогосподарської техніки. Розв'язанню цієї актуальної проблеми присвячені роботи багатьох науковців із оригінальними методичними підходами до вирішення проблеми для різних типів машин за функціональним призначенням [1, 2, 3]. Розглядаючи процес взаємодії сошникової групи сівалки, в [1] авторами теоретично обґрунтовано раціональні конструктивні і технологічні параметри, що дозволяють мінімізувати коливний рух сошника при виконанні технологічного процесу сівби та підвищити рівномірність зароблення насіння у сформовану борозенку. Встановлено, що одним з ключових завдань залишають питання дослідження динаміки руху машинно-тракторних агрегатів з урахуванням впливу профілю опорної поверхні, авторами роботи [4] реалізовано теоретичні розрахунки для просторового руху агрегату. Такі наукові підходи до вирішення поставленої проблеми дозволяють більш досконало вирішувати питання раціонального формування складу агрегатів щодо характеристик

енергетичного засобу та конкретної сільськогосподарської машини для забезпечення ефективного виконання технологічного процесу обробітку ґрунту.

Особливу увагу сучасні дослідники [5, 6] приділяють ґрунтообробним знаряддям на основі дискових робочих органів, зокрема, дискаторів з кріпленням сферичних дисків на пружних стояках. Для забезпечення функціональної стабільності, коли виконання технологічного процесу поверхневого обробітку дисковими робочими органами пов'язано із змінними характеристиками ґрунту по довжині гону, вирішуються конструктивні питання жорсткості підвіски із врахуванням рядності та режимів роботи. Авторами побудовано математичну модель взаємодії робочого органу з ґрунтом для випадку відмінності за показниками жорсткості пружних стояків в рядах знаряддя, що визначається діючим навантаженням при виконанні технологічного процесу. Математичне моделювання експлуатаційної стійкості механічних систем сівалок присвячена робота [7]. Використовуючи методичні підходи Ляпунова щодо визначення ступені асимптотичної стійкості системи авторами отримано теоретичні вирази для розрахунку конструктивних параметрів при проектуванні машин. Як результат в [8] виконана оптимізація конструктивних параметрів дискового знаряддя для зниження тягового опору та підвищення довговічності робочих органів при забезпечення якісних показників виконання технологічного процесу обробітку. В [9] автором досліджено стійкість механічної системи та обґрунтовані раціональні параметри дискатора із адаптацію змінних характеристик ґрунтового середовища із спрямуванням зменшення витрат енергії на виконання роботи. Науковий інтерес складають дослідження [10, 11], що передбачають вивчення процесів взаємодії робочих органів з ґрунтовым середовищем застосуванням сучасних прикладних програм. Авторами проведена симуляція процесу взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтом в Simcenter STAR-CCM+.

Формулювання мети досліджень. Метою роботи є побудова математичних моделей, що описують стійкість функціонування механічної системи ґрунтообробного агрегату типу дискатора.

Результати досліджень

Під час математичного моделювання функціональної стійкості дискового агрегату для поверхневого обробітку ґрунту за вихідні умови прийнято його рівномірний прямолінійний рух по горизонтальній поверхні поля. Використання стандартного напірного пристрою трактора обумовлює можливість вертикальних коливань знаряддя, яке в моделі представлено як система твердих тіл із відповідними ступенями вільності. Це враховано як вагомий чинник впливу на загальну динаміку руху агрегату [1]. На рис. 1 представлено 3D-модель знаряддя з основними виконавчими елементами: дисковими робочими органами на пружних стояках та прутковим котком, що закріплені на рамі. Взаємне розташування центрів мас робочих органів та точок прикладання рівнодійних сил опору ґрунту (рис. 2) дає повне уявлення про динамічну взаємодію між компонентами конструкції та середовищем. Такий підхід дозволяє коректно врахувати зовнішні навантаження на функціональну стійкість системи при розв'язанні поставленої задачі

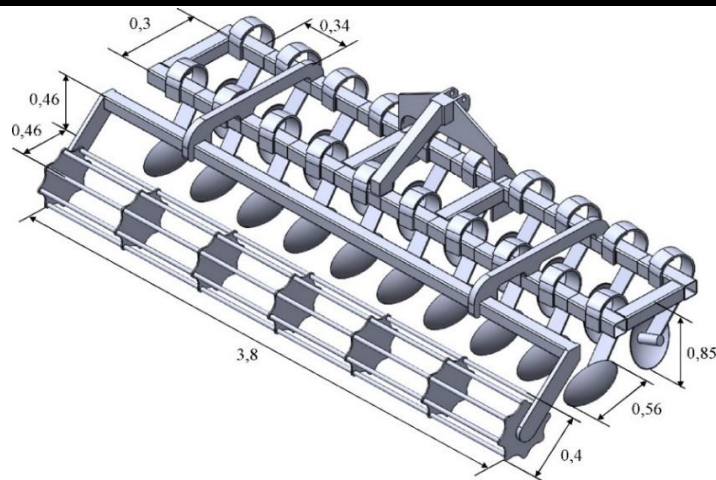


Рис.1. 3D-модель розробленого ґрунтообробного знаряддя

Просторове положення та рух робочих органів дискатора досліджуються у нерухомій декартовій системі координат XYZ. Вісь Ox збігається з напрямком руху агрегату, вісь Oy розташована у горизонтальній площині перпендикулярно до напрямку руху, а вісь Oz орієнтована вертикально вгору. Для спрощення аналізу динаміки запропоновано використання допоміжної рухомої системи координат ($x'y'z'$), початок якої суміщено з центром мас окремого дискового робочого органу або секції знаряддя. Такий підхід забезпечує жорстку прив'язку до об'єкта дослідження, дозволяючи розглядати його складний рух як поєднання поступального переміщення разом із центром мас та обертання навколо власних осей. Відносне положення рухомої системи координат щодо нерухомої визначається трьома лінійними координатами (x, y, z). Це дає змогу фіксувати положення робочого органу в просторі та враховувати його відхилення від номінальної траєкторії під дією зовнішніх чинників: неоднорідності опору ґрунтового середовища, мікрорельєфу поверхні поля та інших динамічних збурень

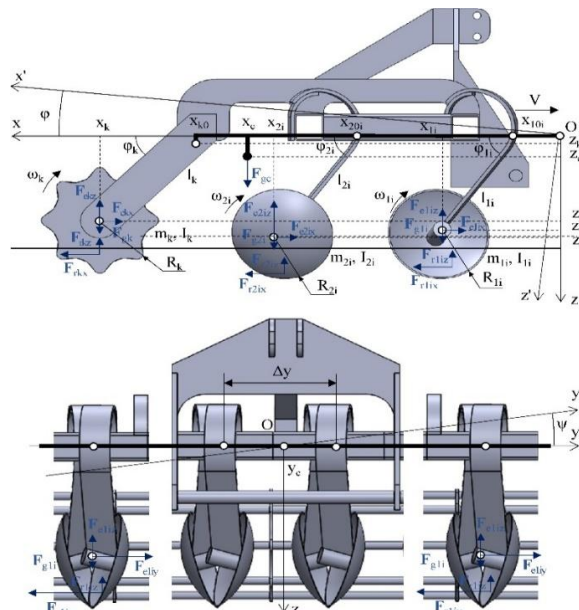


Рис. 2. Еквівалентна модель розробленого дискового знаряддя

При складанні диференціальних рівнянь, що описують динаміку взаємодії сферичних дисків ґрунтообробного знаряддя з ґрунтом необхідною умовою слід вважати урахування усіх діючих сил у просторі, а саме: сили тяжіння, реакції ґрунтового

середовища, сил інерції, сил обертового та коливального характеру складових елементів дискатора. При цьому приймаємо, що енергетичний засіб, що входить до складу ґрунтообробного агрегату, при виконанні технологічного процесу поверхневого обробітку ґрунту виконує прямолінійний рух з постійною швидкістю по горизонтальній поверхні, коли $V_x = V = \text{const}$, $V_z = 0$, $V_y = 0$, а прискорення відсутнє. Таким чином, сформульовані припущення щодо характеру руху ґрунтообробного агрегату з дисковими робочими органами на пружних стояках, розглянута механічна система буде мати $2 + 4N$ ступенів вільності, що також співвідноситься з такою ж самою кількістю узагальнених координат, до яких відносяться такі: кути відхилення першого і другого рядів пружних стояків в площині xOz $\varphi_{11}, \dots, \varphi_{1N}$, $\varphi_{21}, \dots, \varphi_{2N}$ і в площині yOz $\psi_{11}, \dots, \psi_{1N}$, $\psi_{21}, \dots, \psi_{2N}$, а також кути повороту опорної рами дискатора φ і ψ навколо поздовжньої і поперечної осей з'єднання дискатора з енергетичним засобом агрегату.

На основі визначених умов функціонування та прийнятих припущень щодо динамічної стійкості агрегату, рівняння руху досліджуваної системи в узагальнених координатах представлені у формі рівнянь Лагранжа другого роду. Вибір цього методу зумовлений наявністю великої кількості геометричних зв'язків у конструкції дискатора. Застосування формалізму Лагранжа дозволяє виключити з розгляду реакції ідеальних зв'язків, що суттєво спрощує математичний опис просторової моделі та подальші чисельні розрахунки. Рівняння руху системи мають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = Q, & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} = Q, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{11}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_{11}} = Q, & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}_{11}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi_{11}} = Q, \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{1N_1}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_{1N_1}} = Q, & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}_{1N_1}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi_{1N_1}} = Q, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{21}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_{21}} = Q, & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}_{21}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi_{21}} = Q, \\ \dots\dots\dots & \dots\dots\dots \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_{2N_2}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_{2N_2}} = Q, & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}_{2N_2}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi_{2N_2}} = Q, \end{array} \right. \quad (1)$$

де L – функція Лагранжа, Дж;

$$L = T - U, \quad (2)$$

де T – кінетична енергія системи твердих тіл, Дж; U – потенціальна енергія твердих тіл, Дж; Q – узагальнена нефункціональна сила або момент сили, Н·м; φ, ψ – узагальнені координати (куту повороту), рад; $\dot{\varphi}, \dot{\psi}$ – похідні узагальнених координат за часом рад/с; t – час, с.

Для розрахунку кінетичної енергії дискових робочих органів ґрунтообробного знаряддя використовуємо формулу:

$$T = T_c + T_1 + T_2 + T_k, \quad (3)$$

де T_c – кінетична енергія, що відповідає поступальному руху центра мас рами ґрунтообробного знаряддя, Дж:

$$T_c = \frac{1}{2} M_c (\dot{x}'^2_c + \dot{y}'^2_c + \dot{z}'^2_c), \quad (4)$$

M_c – маса рами знаряддя, кг; $\dot{x}'_c, \dot{y}'_c, \dot{z}'_c$ – складові швидкості центра мас рами у напрямках осей x', y' і z' у системі координат $x'y'z'$, м/с; T_1, T_2 – кінетична енергія дискових робочих органів дискатора першого і другого рядів дискатора, відповідно, Дж:

$$T_1 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} m_{1i} (\dot{x}'^2_{1i} + \dot{y}'^2_{1i} + \dot{z}'^2_{1i}) + \frac{1}{2} I_{1i} \omega_{1i}^2 \right), \quad (5)$$

$$T_2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} m_{2i} (\dot{x}'^2_{2i} + \dot{y}'^2_{2i} + \dot{z}'^2_{2i}) + \frac{1}{2} I_{2i} \omega_{2i}^2 \right), \quad (6)$$

де m_{1i}, m_{2i} – маса i -го сферичного диска 1-го та 2-го ряду знаряддя, відповідно, кг; $(\dot{x}'_{1i}, \dot{y}'_{1i}, \dot{z}'_{1i}), (\dot{x}'_{2i}, \dot{y}'_{2i}, \dot{z}'_{2i})$ – проєкції швидкості поступального руху i -го диска 1-го і 2-го рядів на осі координатної системи, м/с; I_{1i}, I_{2i} – моменти інерції i -го диска 1-го і 2-го рядів відносно осі обертання, кг·м²; ω_{1i}, ω_{2i} – кутові швидкості i -го диска 1-го і 2-го рядів, рад/с; i – номер сферичного диска у певному ряду; N – кількість сферичних дисків у 1-му ряду; T_k – кінетична енергія пруткового котка, Дж:

$$T_k = \frac{1}{2} m_k (\dot{x}'^2_k + \dot{y}'^2_k + \dot{z}'^2_k) + \frac{1}{2} I_k \omega_k^2, \quad (7)$$

де m_k – маса пруткового котка, кг; $(\dot{x}'_k, \dot{y}'_k, \dot{z}'_k)$ – відповідно, швидкість поступального руху котка в напрямках осей, м/с; I_k – момент інерції котка відносно осі обертання, кг·м²; ω_k – кутова швидкість пруткового котка знаряддя, рад/с.

Здійснюючи загально прийняті способи переходу від координатної системи $x'y'z'$ до глобальної системи xuz , одержимо такі наступні вирази (8-19):

$$x'_c = x_c \cos \varphi - z_c \sin \varphi - Vt, \quad (8)$$

$$y'_c = y_c \cos \psi - (x_c \sin \varphi + z_c \cos \varphi) \sin \psi, \quad (9)$$

$$z'_c = y_c \sin \psi + (x_c \sin \varphi + z_c \cos \varphi) \cos \psi, \quad (10)$$

$$x'_{1i} = (l_{1i} \cos \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} + x_{10i}) \cos \varphi - l_{1i} \sin \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} \sin \varphi - Vt, \quad (11)$$

$$y'_{1i} = (l_{1i} \cos \psi_{1i} + (|i-5|+0,5) \Delta y_{10}) \cos \psi - \\ - ((l_{1i} \cos \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} + x_{10i}) \sin \varphi + l_{1i} \sin \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} \cos \varphi) \sin \psi, \quad (12)$$

$$z'_{1i} = (l_{1i} \cos \psi_{1i} + (|i-5|+0,5) \Delta y_{10}) \sin \psi + \\ + ((l_{1i} \cos \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} + x_{10}) \sin \varphi + l_{1i} \sin \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} \cos \varphi) \cos \psi, \quad (13)$$

$$x'_{2i} = (l_{2i} \cos \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} + x_{20i}) \cos \varphi - l_{2i} \sin \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} \sin \varphi - Vt, \quad (14)$$

$$y'_{2i} = (l_{2i} \cos \psi_{2i} + (|i-5|+0,5) \Delta y_{20}) \cos \psi - \\ - ((l_{2i} \cos \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} + x_{20}) \sin \varphi + l_{2i} \sin \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} \cos \varphi) \sin \psi, \quad (15)$$

$$z'_{2i} = (l_{2i} \cos \psi_{2i} + (|i-5|+0,5) \Delta y_{20}) \sin \psi + \\ + ((l_{2i} \cos \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} + x_{20}) \sin \varphi + l_{2i} \sin \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} \cos \varphi) \cos \psi, \quad (16)$$

$$x'_k = (l_k \cos \varphi_k \cos \psi_k + x_{k0}) \cos \varphi - l_k \sin \varphi_k \cos \psi_k \sin \varphi - Vt, \quad (17)$$

$$y'_k = l_k \cos \psi_k \cos \psi - ((l_k \cos \varphi_k \cos \psi_k + x_{k0}) \sin \varphi + l_k \sin \varphi_k \cos \psi_k \cos \varphi) \sin \psi, \quad (18)$$

$$z'_k = l_k \cos \psi_k \sin \psi + ((l_k \cos \varphi_k \cos \psi_k + x_{k0}) \sin \varphi + l_k \sin \varphi_k \cos \psi_k \cos \varphi) \cos \psi, \quad (19)$$

де x, y, z – координати в нерухомій системі, м; x', y', z' – координати в рухомій системі, м; V – лінійна швидкість руху дискового ґрунтообробного агрегату, м/с; l – відстань між точкою кріплення пружного стояка і центром мас робочого органу знаряддя, м.

Шляхом проведення диференціювання одержаних рівнянь (1)–(19) за часом, одержано відповідні аналітичні залежності для швидкостей руху досліджуваного ґрунтообробного знаряддя з дисковими робочими органами на пружних стояках:

$$\dot{x}'_c = -x_c \dot{\varphi} \sin \varphi - z_c \dot{\varphi} \cos \varphi - V, \quad (20)$$

$$\dot{y}'_c = -y_c \dot{\psi} \sin \psi - (x_c \dot{\varphi} \cos \varphi + z_c \dot{\varphi} \sin \varphi) \sin \psi - (x_c \sin \varphi + z_c \cos \varphi) \dot{\psi} \cos \psi, \quad (21)$$

$$z'_c = y_c \dot{\psi} \cos \psi + (x_c \dot{\varphi} \cos \varphi - z_c \dot{\varphi} \sin \varphi) \cos \psi - (x_c \sin \varphi + z_c \cos \varphi) \dot{\psi} \sin \psi, \quad (22)$$

$$x'_{1i} = (-l_{1i} \dot{\varphi}_{1i} \sin \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} - l_{1i} \cos \varphi_{1i} \dot{\psi}_{1i} \sin \psi_{1i}) \cos \varphi - \\ - (l_{1i} \cos \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} + x_{10i}) \dot{\varphi} \sin \varphi - \\ - l_{1i} \sin \varphi_{1i} \cos \psi_{1i} \sin \varphi \left(\frac{\dot{\varphi}_{1i} \cos \varphi_{1i}}{\sin \varphi_{1i}} - \frac{\dot{\psi}_{1i} \sin \psi_{1i}}{\cos \psi_{1i}} + \frac{\dot{\varphi} \cos \varphi}{\sin \varphi} \right) - V, \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}'_{1i} = & -l_{1i}\dot{\psi}_{1i}\sin\psi_{1i}\cos\psi - \left(l_{1i}\cos\psi_{1i} + (|i-5|+0,5)\Delta y_{10}\right)\dot{\psi}\sin\psi\cos\psi - \\ & - (l_{1i}\cos\varphi_{1i}\cos\psi_{1i} + x_{10})\sin\varphi\sin\psi \left(\frac{-l_{1i}\dot{\varphi}_{1i}\sin\varphi_{1i}\cos\psi_{1i} - l_{1i}\cos\varphi_{1i}\dot{\psi}_{1i}\sin\psi_{1i}}{l_{1i}\cos\varphi_{1i}\cos\psi_{1i} + x_{10}} + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{\varphi}\cos\varphi}{\sin\varphi} + \frac{\dot{\psi}\sin\psi}{\sin\psi} \right) - l_{1i}\sin\varphi_{1i}\cos\psi_{1i}\cos\varphi\sin\psi \times \\ & \times \left(\frac{\dot{\varphi}_{1i}\cos\varphi_{1i}}{\sin\varphi_{1i}} - \frac{\dot{\psi}_{1i}\sin\psi_{1i}}{\cos\psi_{1i}} - \frac{\dot{\varphi}\sin\varphi}{\cos\varphi} + \frac{\dot{\psi}\cos\psi}{\sin\psi} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} z'_{1i} = & -l_{1i}\dot{\psi}_{1i}\sin\psi_{1i}\sin\psi + \left(l_{1i}\cos\psi_{1i} + (|i-5|+0,5)\Delta y_{10}\right)\dot{\psi}\cos\psi + \\ & + (l_{1i}\cos\varphi_{1i}\cos\psi_{1i} + x_{10})\sin\varphi\cos\psi \left(-\frac{l_{1i}\dot{\varphi}_{1i}\sin\varphi_{1i}\cos\psi_{1i} + l_{1i}\cos\varphi_{1i}\dot{\psi}_{1i}\sin\psi_{1i}}{l_{1i}\cos\varphi_{1i}\cos\psi_{1i} + x_{10}} + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{\varphi}\cos\varphi}{\sin\varphi} - \frac{\dot{\psi}\sin\psi}{\cos\psi} \right) + l_{1i}\sin\varphi_{1i}\cos\psi_{1i}\cos\varphi\cos\psi \times \\ & \times \left(\frac{\dot{\varphi}_{1i}\cos\varphi_{1i}}{\sin\varphi_{1i}} - \frac{\dot{\psi}_{1i}\sin\psi_{1i}}{\cos\psi_{1i}} - \frac{\dot{\varphi}\sin\varphi}{\cos\varphi} - \frac{\dot{\psi}\sin\psi}{\cos\psi} \right), \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} x'_{2i} = & (-l_{2i}\dot{\varphi}_{2i}\sin\varphi_{2i}\cos\psi_{2i} - l_{2i}\cos\varphi_{2i}\dot{\psi}_{2i}\sin\psi_{2i})\cos\varphi - \\ & - (l_{2i}\cos\varphi_{2i}\cos\psi_{2i} + x_{20i})\dot{\varphi}\sin\varphi - \\ & - l_{2i}\sin\varphi_{2i}\cos\psi_{2i}\sin\varphi \left(\frac{\dot{\varphi}_{2i}\cos\varphi_{2i}}{\sin\varphi_{2i}} - \frac{\dot{\psi}_{2i}\sin\psi_{2i}}{\cos\psi_{2i}} + \frac{\dot{\varphi}\cos\varphi}{\sin\varphi} \right) - V, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}'_{2i} = & -l_{2i}\dot{\psi}_{2i}\sin\psi_{2i}\cos\psi - \left(l_{2i}\cos\psi_{2i} + (|i-5|+0,5)\Delta y_{20}\right)\dot{\psi}\sin\psi\cos\psi - \\ & - (l_{2i}\cos\varphi_{2i}\cos\psi_{2i} + x_{20})\sin\varphi\sin\psi \left(\frac{-l_{2i}\dot{\varphi}_{2i}\sin\varphi_{2i}\cos\psi_{2i} - l_{2i}\cos\varphi_{2i}\dot{\psi}_{2i}\sin\psi_{2i}}{l_{2i}\cos\varphi_{2i}\cos\psi_{2i} + x_{20}} + \right. \\ & \left. + \frac{\dot{\varphi}\cos\varphi}{\sin\varphi} + \frac{\dot{\psi}\sin\psi}{\sin\psi} \right) - l_{2i}\sin\varphi_{2i}\cos\psi_{2i}\cos\varphi\sin\psi \times \\ & \times \left(\frac{\dot{\varphi}_{2i}\cos\varphi_{2i}}{\sin\varphi_{2i}} - \frac{\dot{\psi}_{2i}\sin\psi_{2i}}{\cos\psi_{2i}} - \frac{\dot{\varphi}\sin\varphi}{\cos\varphi} + \frac{\dot{\psi}\cos\psi}{\sin\psi} \right), \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
 z'_{2i} = & -l_{2i}\dot{\psi}_{2i} \sin \psi_{2i} \sin \psi + (l_{2i} \cos \psi_{2i} + (|i-5|+0,5)\Delta y_{10})\dot{\psi} \cos \psi + \\
 & + (l_{2i} \cos \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} + x_{20}) \sin \varphi \cos \psi \left(-\frac{l_{2i}\dot{\varphi}_{2i} \sin \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} + l_{2i} \cos \varphi_{2i} \dot{\psi}_{2i} \sin \psi_{2i}}{l_{2i} \cos \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} + x_{20}} + \right. \\
 & \left. + \frac{\dot{\varphi} \cos \varphi}{\sin \varphi} - \frac{\dot{\psi} \sin \psi}{\cos \psi} \right) + l_{2i} \sin \varphi_{2i} \cos \psi_{2i} \cos \varphi \cos \psi \times \\
 & \times \left(\frac{\dot{\varphi}_{2i} \cos \varphi_{2i}}{\sin \varphi_{2i}} - \frac{\dot{\psi}_{2i} \sin \psi_{2i}}{\cos \psi_{2i}} - \frac{\dot{\varphi} \sin \varphi}{\cos \varphi} - \frac{\dot{\psi} \sin \psi}{\cos \psi} \right),
 \end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
 x'_k = & (-l_k \dot{\varphi}_k \sin \varphi_k \cos \psi_k - l_k \cos \varphi_k \dot{\psi}_k \sin \psi_k) \cos \varphi - \\
 & - (l_k \cos \varphi_k \cos \psi_k + x_{k0}) \dot{\varphi} \sin \varphi - \\
 & - l_k \sin \varphi_k \cos \psi_k \sin \varphi \left(\frac{\dot{\varphi}_k \cos \varphi_k}{\sin \varphi_k} - \frac{\dot{\psi}_k \sin \psi_k}{\cos \psi_k} + \frac{\dot{\varphi} \cos \varphi}{\sin \varphi} \right) - V,
 \end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{y}'_k = & -l_k \dot{\psi}_k \sin \psi_k \cos \psi - l_k \cos \psi_k \dot{\psi} \sin \psi \cos \psi - (l_k \cos \varphi_k \cos \psi_k + x_{k0}) \sin \varphi \sin \psi \times \\
 & \times \left(\frac{-l_k \dot{\varphi}_k \sin \varphi_k \cos \psi_k - l_k \cos \varphi_k \dot{\psi}_k \sin \psi_k}{l_k \cos \varphi_k \cos \psi_k + x_{20}} + \frac{\dot{\varphi} \cos \varphi}{\sin \varphi} + \frac{\dot{\psi} \sin \psi}{\sin \psi} \right) - \\
 & - l_k \sin \varphi_k \cos \psi_k \cos \varphi \sin \psi \times \left(\frac{\dot{\varphi}_k \cos \varphi_k}{\sin \varphi_k} - \frac{\dot{\psi}_k \sin \psi_k}{\cos \psi_k} - \frac{\dot{\varphi} \sin \varphi}{\cos \varphi} + \frac{\dot{\psi} \cos \psi}{\sin \psi} \right),
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
 z'_k = & -l_k \dot{\psi}_k \sin \psi_k \sin \psi + l_k \cos \psi_k \dot{\psi} \cos \psi + (l_k \cos \varphi_k \cos \psi_k + x_{k0}) \times \\
 & \times \sin \varphi \cos \psi \left(-\frac{l_k \dot{\varphi}_k \sin \varphi_k \cos \psi_k + l_k \cos \varphi_k \dot{\psi}_k \sin \psi_k}{l_k \cos \varphi_k \cos \psi_k + x_{k0}} + \frac{\dot{\varphi} \cos \varphi}{\sin \varphi} - \frac{\dot{\psi} \sin \psi}{\cos \psi} \right) + \\
 & + l_k \sin \varphi_k \cos \psi_k \cos \varphi \cos \psi \left(\frac{\dot{\varphi}_k \cos \varphi_k}{\sin \varphi_k} - \frac{\dot{\psi}_k \sin \psi_k}{\cos \psi_k} - \frac{\dot{\varphi} \sin \varphi}{\cos \varphi} - \frac{\dot{\psi} \sin \psi}{\cos \psi} \right),
 \end{aligned} \tag{31}$$

Для проведення кількісного аналізу динаміки механічної системи визначено моменти інерції основної рами та робочих органів дискатора. Розрахунок параметрів інерції конструктивних елементів із пружним кріпленням та регулятором жорсткості базується на фундаментальних положеннях класичної механіки. Виходячи із загального визначення моменту інерції твердого тіла відносно осей координат, отримано такі залежності:

$$I_i = \int_{(m)} r^2 dm = \rho_{cm} \int_{(V)} r^2 dV = \rho_{cm} \int_0^{2\pi} \int_0^{\arcsin \frac{d}{2R}} \int_{R-\delta}^R r^4 \sin \theta dr d\theta d\phi =$$

$$= \frac{2\pi}{5} \rho_{cm} \left(R_i^5 - (R_i - \delta_i)^5 \right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d_i^2}{4R_i^2}} \right), \quad (32)$$

де r, θ, ϕ – змінні координати у сферичній системі відліку; ρ_{cm} – густина матеріалу робочого органу, для сталі приймаємо $\rho_{cm} = 7900 \text{ кг} / \text{м}^3$; R_i – радіус сфери диска, м; δ_i – товщина сферичного диска, м; d_i – діаметр сферичного диска, м.

Розрахунок загальної маси сферичного диска знаряддя доцільно розрахувати за таким відомим співвідношення:

$$m_i = \rho_{cm} \int_{(V)} dV = \rho_{cm} \int_0^{2\pi} \int_0^{\arcsin \frac{d}{2R}} \int_{R-\delta}^R r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi =$$

$$= \frac{2\pi}{3} \rho_{cm} \left(R_i^3 - (R_i - \delta_i)^3 \right) \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d_i^2}{4R_i^2}} \right). \quad (33)$$

Момент інерції пруткового котка ґрунтообробного знаряддя можна розрахувати за аналогією розрахунку моменту інерції тонкостінного циліндра за формулою:

$$I_k = \frac{\pi L_k}{2} \rho_{cm} \left(R_k^4 - (R_k - \delta_k)^4 \right), \quad (34)$$

де R_k – зовнішній радіус котка, м; δ_k – товщина стінки циліндра, м; L_k – довжина котка, м.

Використовуючи прийнятий підхід щодо розрахунків характеристик обраної механічної системи, масау пруткового котка в першому наближенні можна визначити за формулою маси циліндричної оболонки за формулою:

$$m_k = \pi L_k \rho_{cm} \left(R_k^2 - (R_k - \delta_k)^2 \right). \quad (35)$$

При визначенні потенційної енергії механічної системи у вигляді твердих тіл, які являють собою конструкцію дискового ґрунтообробного знаряддя використаного принцип суперпозиції. Запишемо наступним чином:

$$U = U_c + U_1 + U_2 + U_k. \quad (36)$$

де U_c – потенціальна енергія, що відповідає центру мас основної рами знаряддя, Дж:

$$U_c = F_{gc} z'_c, \quad (37)$$

F_{gc} – вага рами знаряддя, Н:

$$F_{gc} = M_c g, \quad (38)$$

U_1 – потенціальна енергія дискових робочих органів 1-го ряду, Дж:

$$U_1 = \sum_{i=1}^{N_1} F_{g1i} z'_{1i} + \sum_{i=1}^{N_1} F_{k1i} z'_{1i}, \quad (39)$$

U_2 – потенціальна енергія дискових робочих органів 2-го ряду, Дж:

$$U_2 = \sum_{i=1}^{N_1} F_{g2i} z'_{2i} + \sum_{i=1}^{N_1} F_{k2i} z'_{2i}, \quad (40)$$

F_{g1i}, F_{g2i} – сила тяжіння окремого сферичного диска 1-го і 2-го рядів, Н:

$$F_{g1i} = F_{g2i} = F_{gi} = m_i g \quad (41)$$

U_k – потенціальна енергія пруткового котка знаряддя, Дж:

$$U_k = F_{gk} z'_{2i}, \quad (42)$$

F_{gk} – сила тяжіння пруткового котка дискатора, Н:

$$F_{gk} = m_k g. \quad (43)$$

При виконанні розрахунків узагальнену непотенційну силу, що діє на механічну систему твердих тіл ґрунтообробного знаряддя, можна застосувати у вигляді:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_k, \quad (44)$$

де Q_1, Q_2 – момент сили, що відповідає 1-му і 2-му рядів дискових робочих органів, Н·м:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{N_1} (F_{r1ix} x'_{1i} + F_{r1iy} y'_{1i} + F_{r1iz} z'_{1i}), \quad (45)$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{N_1} (F_{r2ix} x'_{2i} + F_{r2iy} y'_{2i} + F_{r2iz} z'_{2i}), \quad (46)$$

$F_{r1ix}, F_{r1iy}, F_{r1iz}, F_{r2ix}, F_{r2iy}, F_{r2iz}$ – відповідно, сили опору ґрунтового середовища, які прикладено до сферичних дисків у 1-му і 2-му рядах уздовж координатних осей Ox , Oy і Oz , Н;

Q_k – момент сили, що виникає в результаті взаємодії пруткового котка з ґрунтом, Н·м:

$$Q_k = F_{rkx} x'_k + F_{rkz} z'_k, \quad (47)$$

F_{rkx} – горизонтальна складова сили опору пруткового котка з боку ґрунту, Н:

$$F_{rkx} = \left(f_k + \frac{\eta_k}{R_k} \right) F_{rkz}, \quad (48)$$

f_k, η_k – відповідно, коефіцієнти тертя ковзання та кочення пруткового котка знаряддя;

F_{rkz} – вертикальна сила взаємодії котка з ґрунтовым середовищем, Н:

$$F_{rkz} = 0,86t \sqrt{\frac{(m_k g)^4}{q_0 L (2R_k)^2}}, \quad (49)$$

де t – коефіцієнт, який визначає додатковий опір, від деформації ґрунту конструктивними елементами поверхні котка (шорсткість матеріалу, виступи на поверхні тощо, Н/м; q_0 – параметр, об'ємної деформації ґрунту, Н/м³.

Сформований математичний апарат у вигляді системи рівнянь (20)–(49) дає змогу комплексно оцінити коливання ґрунтообробного знаряддя у двох проекціях. Проте з огляду на високу трудомісткість аналітичного розв'язання такої системи, для реалізації мети дослідження було застосовано програмний комплекс SOLIDWORKS Simulation. Використання методів чисельного моделювання дозволило детально проаналізувати вплив конструктивних параметрів дискових робочих органів на пружних стояках на стійкість та ефективність функціонування всієї механічної системи. Такий підхід забезпечує можливість визначення раціональних варіантів компонування агрегату, спрямованих на демпфування вібрацій, підвищення рівномірності глибини обробітку та зниження загальної енергоємності процесу в системах поверхневого обробітку ґрунту. Згідно з програмою досліджень, на першому етапі було розроблено скінченно-елементну сіткову модель знаряддя, встановлено умови фіксації та визначено граничні зусилля. Результати візуалізації розрахункової схеми наведено на рисунку 3.

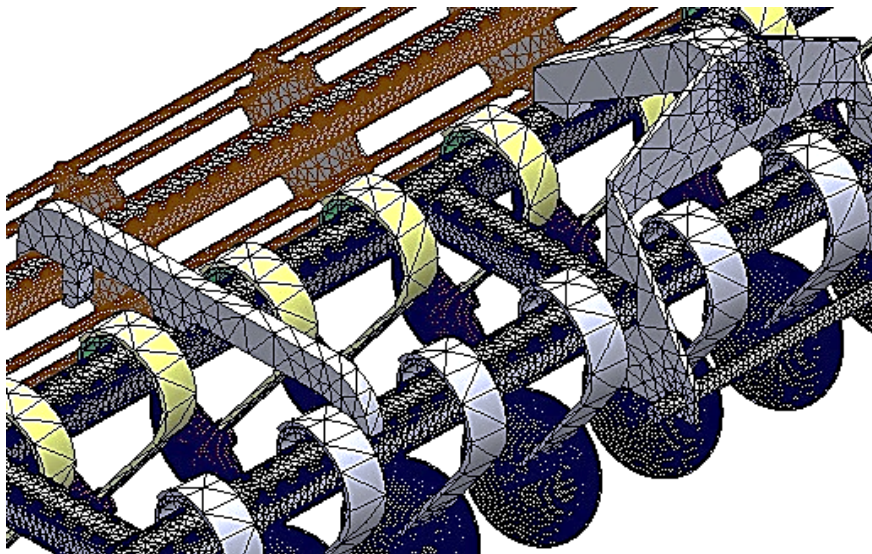


Рис. 3. Сіткова модель дискового знаряддя у середовищі SOLIDWORKS Simulation

Задля отримання результатів симуляції у вигляді зміни положення дискового ґрунтообробного знаряддя у просторі було прийнято попередньо визначені наступні конструктивні параметри: $R_1 = 107$ мм, $R_2 = 52$ мм, $L = 421$ мм, $\psi = 125^\circ$, $b = 109$ мм, $\delta = 14$ мм, $\alpha = 9,7^\circ$, $\gamma = 15^\circ$, $\beta = 48,8^\circ$, $\theta = 5,2^\circ$. Результати проведеної симуляції представлено на рисунку 4. Як показали результати проведених розрахунків, максимальнв значення кутів коливання ґрунтообробного знаряддя з дисковими робочими органами та регулятору жорсткості у двох площинах складають, відповідно: $\varphi = 2,34^\circ$ і $\psi = 0,85^\circ$.

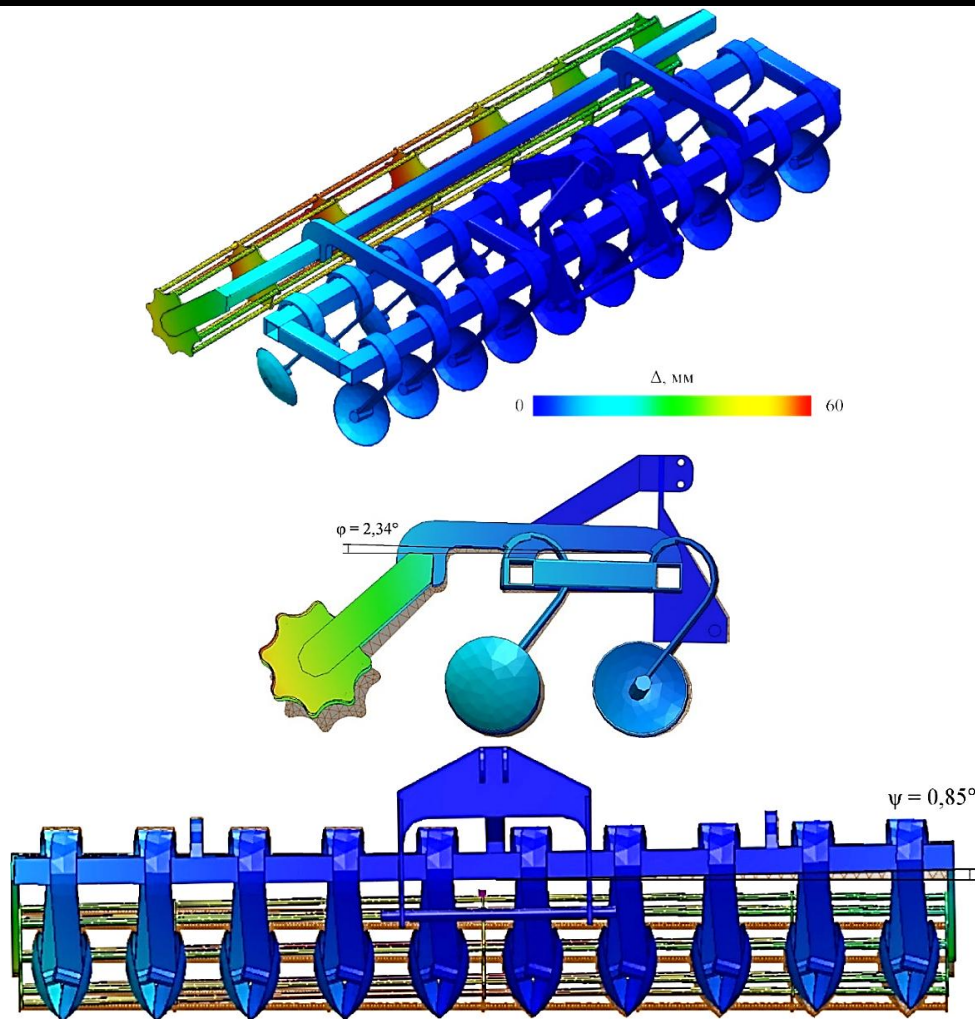


Рис. 4. Результати симуляції зміни положення дискового ґрунтообробного знаряддя

Чисельне моделювання підтвердило динамічну стійкість ґрунтообробного знаряддя з дисковими робочими органами, оскільки амплітуда коливань робочих органів залишається в межах допустимих значень, забезпечуючи стабільну глибину обробітку та входження сферичного диска в ґрунт. Відсутність резонансних явищ та відповідність виконаним теоретичним розрахункам підтверджують ефективність та працездатність обраної конструктивної схеми запропонованого дискатора на пружних стояках та регулятором жорсткості.

Висновки

1. Виконано комплексне дослідження динамічної стійкості дискатора з пружною підвіскою робочих органів. Розроблено просторову математичну модель на основі рівнянь Лагранжа другого роду, яку верифіковано шляхом чисельного моделювання в середовищі SOLIDWORKS Simulation. Такий інтегрований підхід дозволив з високою точністю описати перехідні процеси в механічній системі «агрегат — ґрунтове середовище».

2. Математична модель адекватно відтворює динаміку функціонування дискатора, враховуючи просторові масо-інерційні характеристики конструкції, фізико-механічну взаємодію дисків і котка з ґрунтом, а також демпфувальні властивості пружних стояків. Це дає змогу прогнозувати поведінку агрегату під впливом випадкових збурень мікрорельєфу.

3. Встановлено, що за умови використання регуляторів жорсткості амплітуда коливань дискатора в робочих режимах не перевищує гранично допустимих значень ($\varphi = 2,34^\circ$, $\psi = 0,85^\circ$). Це підтверджує високу динамічну стійкість конструкції, забезпечує стабільність курсового нахилу дисків та рівномірність глибини обробітку. Оптимізація жорсткості кріплення дозволяє мінімізувати вібраційне навантаження на раму та знизити енергоємність технологічного процесу шляхом стабілізації тягового опору.

Список використаних джерел

1. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Головач І. В., Горобей В. П. Теоретичні основи коливання зубчастого сошника селекційної сівалки. *Механізація та електрифікація сільського господарства: між від. темат. наук. зб.* 2015. Вип. 1 (100). С. 10–21.
2. В. Ф. Пашенко, В. В. Ким Методика построения математических моделей устойчивости функционирования механических систем. Харьков: ХНАУ им. В. В. Докучаева, 2010. 115 с.
3. Козаченко О.В. Проблеми ресурсозбереження у сільськогосподарських агрегатах: наукове видання. Харків: Торнадо, 2008. – 272с.
4. Антощенков Р. В., Галич І. В., Череватенко Г. І. Динаміка та енергетика руху машинно-тракторного агрегату з урахуванням профілю опорної поверхні: монографія. – Харків: ДБТУ, 2024. – 100 с.
5. Козаченко О.В. Динамічна модель процесу деформації пружної стійки дискатора / О.В. Козаченко, К.В. Сєдих // *Техніка та енергетика*. Київ: НУБіП, № 11(3), 2020. С. 31-39.
6. Козаченко О.В. Фізико-математична модель взаємодії диска з ґрунтом / О.В. Козаченко, К.В. Сєдих, О.М. Волковський // *Інженерія природокористування*. Харків: ХНТУСГ, №2(16), 2020. С. 69-77.
7. Kharchenko S., Domachenko V., Siedykh K. Mathematical modeling of Mogilnay O., Paschenko operational stability of sowing machines' mechanical systems. *Eastern-European Journal of Enterprise technologies*. – 2018. № 4/1 (94).P.37- 47.
8. Kozachenko O., Siedykh K. Modeling of the process of deformation of the elastic rack of the working bodies of the tillage implement ТЕКА. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. Lublin-Rzeszow. 2020. Vol. 20. No1. 41-50.
9. Сєдих К. В. (2021). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискатора з пружними стійками. Дис... канд. техн. наук за спеціальністю 05.05.11. Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. 248 с.
10. Кобець А.С., Алієв Е.Б., Теслюк Г.В., Алієва О.Ю. Симуляція процесу взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтом в Simcenter STAR-CCM+. *Науковий журнал Техніка та енергетика НУБіП* Том 14, № 1. 2023. DOI: 10.31548/machinery/1.2023.09.
11. Алієв Е.Б., Теслюк Г.В., Белка О.В., Пацула О.М. Чисельне моделювання процесу роботи ґрунтообробного модуля для передпосівного обробітку ґрунту. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 2023, № 34: ст. 132-145 DOI: 10.36710/IOC-2023-34-12.

References

1. Adamchuk V. V., Bulgakov V. M., Golovach I. V., Gorobey V. P. Theoretical foundations of oscillation of the toothed coulter of a selective seeder. *Mechanization and electrification of agriculture: inter-subject. scientific collection*. 2015. Issue 1 (100). P. 10–21.

2. V. F. Pashchenko, V. V. Kim Methodology for building mathematical models of the stability of the functioning of mechanical systems. Kharkiv: KhNAU named after V. V. Dokuchaev, 2010. 115 p.

3. Kozachenko O. V. Problems of resource conservation in agricultural aggregates: scientific publication. Kharkiv: Tornado, 2008. – 272 p.

4. Antoshchenkov R. V., Galich I. V., Cherevatenko G. I. Dynamics and energetics of the movement of a machine-tractor unit taking into account the profile of the supporting surface: monograph. – Kharkiv: DBTU, 2024. – 100 p.

5. Kozachenko O. V. Dynamic model of the process of deformation of the elastic support of the diskator / O. V. Kozachenko, K. V. Sedykh // Technology and energy. Kyiv: NUBiP, No. 11(3), 2020. P. 31-39.

6. Kozachenko O. V. Physical and mathematical model of the interaction of the disk with the soil / O. V. Kozachenko, K. V. Sedykh, O. M. Volkovsky // Environmental engineering. Kharkiv: KhNTUSG, No. 2(16), 2020. P. 69-77.

7. Kharchenko S., Domachenko V., Siedykh K. Mathematical modeling of Mogilnay O., Paschenko operational stability of sowing machines' mechanical systems. Eastern-European Journal of Enterprise technologies. – 2018. № 4/1 (94).P.37- 47.

8. Kozachenko O., Siedykh K. Modeling of the process of deformation of the elastic rack of the working bodies of the tillage implement TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow. 2020. Vol. 20. No1. 41-50.

9. Sedykh K. V. (2021). Justification of the design and technological parameters of a disc harrow with elastic racks. Dissertation candidate of technical sciences in the specialty 05.05.11. Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. 248 p.

10. Kobets A.S., Aliyev E.B., Teslyuk G.V., Aliyeva O.Yu. Simulation of the process of interaction of working bodies of soil tillage machines with the soil in Simcenter STAR-CCM+. Scientific journal Technology and Energy NUBiP Vol. 14, No. 1. 2023. DOI: 10.31548/machinery/1.2023.09.

11. Aliyev E.B., Teslyuk G.V., Belka O.V., Patsula O.M. Numerical modeling of the soil tillage module operation process for pre-sowing soil cultivation. Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseeds of the NAAS, 2023, No. 34: pp. 132-145 DOI: 10.36710/IOC-2023-34-12.

Отримано: 07.04.2026. Прийнято: 15.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Кириченко Р. В.
ORCID iD: 0000-0001-7830-6956
E-mail:
kirichenkoromeo1971@gmail.com
Лубченко Є. В.
ORCID iD: 0009-0009-2403-062X
Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СОШНИКІВ ДЛЯ СІВБИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ MINI-TILL

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.83>

УДК 631.331

Кириченко Р. В., Лубченко Є. В. *Дослідження сошників для сівби зернових культур за технологією Mini-till*

Анотація. У статті наведено результати досліджень конструкцій сошників зернових сівалок, адаптованих до умов сівби за технологією Mini-till. Розроблено експериментальний дводисковий сошник з вирізним диском, у якому периферійна частина диска більшого діаметра виконана з конічними вирізами для ефективного перерізання рослинних решток. Експериментальні дослідження проведено на зерновій сівалці СЗ-3,6 за різних швидкостей руху і рівнів притискового зусилля сошників з порівнянням експериментального сошника із серійними дводисковими однорядковими сошниками та сошниками з різновеликими дисками.

Досліджено вплив ущільнення посівної борозни прикочувальним котком на твердість ґрунту та схожість насіння озимої пшениці. Показано, що локальне ущільнення ґрунту в зоні висіву підвищує твердість посівного шару та сприяє збільшенню польової схожості насіння. Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленого сошника в умовах ресурсозберігаючої технології Mini-till.

Ключові слова: сошник, зернова сівалка, Mini-till, глибина заробки насіння, притискне зусилля, рослинні рештки, рівномірність сівби, прикочувальний коток.

Kyrychenko R.V., Lubchenko E.V. **Research on openers for sowing grain crops using Mini-till technology**

Abstract. The article presents the results of research on the designs of grain seed drill coulters adapted to the conditions of sowing using the Mini-till technology. An experimental double-disk coulters with a cut-out disc has been developed, in which the peripheral part of the disc of larger diameter is made with conical cutouts for effective cutting of plant residues. Experimental studies were carried out on a grain seeder SZ-3.6 at different speeds of movement and levels of coulters downforce with a comparison of the experimental coulters with serial double-disk single-row coulters and coulters with different-sized discs.

The effect of seed furrow compaction by a roller on soil hardness and germination of winter wheat seeds has been studied. It has been shown that local soil compaction in the sowing zone increases the hardness of the seed layer and contributes to an increase in field seed germination. The results obtained confirm the feasibility of using the developed opener in the context of the resource-saving Mini-till technology.

Key words: coulters, grain seeder, Mini-till, seed placement depth, downforce, crop residues, seeding uniformity, press roller.

Постановка проблеми

Інтенсифікація землеробства на основі традиційних систем обробітку ґрунту супроводжується зростанням енергетичних витрат, збільшенням кількості проходів машинно-тракторних агрегатів і підвищенням механічного навантаження на ґрунт, що призводить до його ущільнення, активізації ерозійних процесів, зниження вмісту органічної речовини та погіршення агрофізичних властивостей [1-3]. За умов зростання вартості енергоносіїв і, відповідно, підвищення собівартості продукції рослинництва, зазначені чинники об'єктивно зумовлюють необхідність переходу до енергоресурсозберігаючих технологій вирощування сільськогосподарських культур [4].

Одним із ефективних напрямів зниження енергоємності технологічних процесів у рослинництві є застосування системи мінімального обробітку ґрунту Mini-till, яка, поряд зі скороченням витрат паливо-мастильних матеріалів і тривалості польових робіт, забезпечує зменшення техногенного навантаження на ґрунт [5, 6]. Її впровадження при вирощуванні зернових культур сприяє збереженню ґрунтової структури, зниженню інтенсивності ерозійних процесів, поліпшенню водного режиму та стабілізації вмісту органічної речовини, що в сукупності підвищує екологічну стійкість агроєкосистем [7].

Ефективність технології Mini-till значною мірою визначається якістю виконання сівби, оскільки саме на етапі посіву формуються умови для проростання насіння та початкового розвитку рослин [8]. За результатами наукових досліджень, рівень урожайності зернових культур на 25...30 % залежить від якості виконання посівних робіт [9-11].

Аналіз технічного рівня наявних вітчизняних і зарубіжних зернових сівалок, призначених для посіву за технологією Mini-till, свідчить про їх високу конструктивну складність, матеріалоемність і вартість, що обмежує можливість широкого впровадження зазначених машин у дрібних і середніх сільськогосподарських підприємствах [12]. Водночас в експлуатації перебуває значна кількість зернових сівалок типу СЗ, конструктивні особливості яких не забезпечують належної якості посіву за умов мінімального обробітку ґрунту без відповідної модернізації робочих органів.

У зв'язку з цим виникає науково-прикладна проблема, що полягає у розробці, обґрунтуванні та експериментальному дослідженні удосконалених конструкцій сошників зернових сівалок типу СЗ, адаптованих до умов посіву за технологією Mini-till, які забезпечували б стабільну якість формування посівного ложа, рівномірну заробку насіння та ефективну роботу в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вибір посівних машин визначається біологічними особливостями сільськогосподарської культури та прийнятою системою обробітку ґрунту. За умов упровадження технології мінімального обробітку ґрунту Mini-till особливого значення набуває вибір сошників як ключового конструктивного елемента сівалки, який визначає її технологічне призначення та ефективність посіву. Сошники повинні забезпечувати формування посівного ложа, стабільну глибину розміщення й рівномірну заробку насіння за наявності рослинних решток і мінімального порушення ґрунтової структури, що є вирішальним для реалізації переваг технології Mini-till.

Питання обґрунтування параметрів сошників, підвищення рівномірності заробки насіння та стабільності глибини посіву активно досліджуються. Значний внесок зробили вітчизняні науковці (Морозов І.В., Сало В.М., Гевко Б.М. та ін.) [13–20], а також зарубіжні дослідники [21–23], які вивчали взаємодію робочих органів сівалок із ґрунтом та адаптацію конструкцій до ресурсозберігаючих технологій.

Аналіз наукових публікацій свідчить, що залишається недостатньо вивченим питання удосконалення конструкцій сошників зернових сівалок для технології Mini-till з урахуванням вітчизняних ґрунтово-кліматичних умов. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на удосконалення конструкції сошників сівалок для ресурсозберігаючої технології Mini-till.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є вдосконалення конструкції сошників зернових сівалок і підвищення рівномірності заробки насіння з метою забезпечення оптимальних умов його проростання та розвитку рослин під час сівби зернових культур за технологією Mini-till. Досягнення мети передбачає розроблення конструкції сошника, що забезпечить стабільну глибину висіву й ефективну заробку насіння за наявності рослинних решток. Реалізація запропонованого рішення спрямована на підвищення ефективності роботи сівалок в умовах енергоресурсозберігаючої технології Mini-till.

Результати досліджень

В сівалках застосовують два основні типи сошників: наральникові та дискові. Наральникові сошники поділяються на анкерні, кілеподібні, долотоподібні та лапові, дискові на однодискові та дводискові. Найбільш універсальними вважаються дводискові сошники, оскільки вони характеризуються кращою проникною здатністю у ґрунт; водночас така сошникова група не завжди забезпечує надійне копіювання мікрорельєфу поверхні поля, у зв'язку з чим сівалки додатково оснащують опорно-прикочувальними колесами. Анкерні сошники, на відміну від дискових, забезпечують якісніше формування посівної борозни та насінневого ложа, однак потребують ретельної підготовки ґрунту, що обмежує їх застосування за значної кількості рослинних решток. Долотоподібні сошники завдяки компактним геометричним розмірам і загостреній формі здатні ефективно проникати в ґрунт незалежно від наявності пожнивних залишків на поверхні поля.

За умов мінімальної системи обробітку ґрунту та наявності рослинних решток переважно застосовують дискові й лапові сошники. Проте під час сівби зернових культур, зокрема озимих, у технологіях Mini-till на полях після кукурудзи на зерно або соняшнику такі сошники не завжди забезпечують виконання агротехнічних вимог щодо рівномірної заробки насіння на задану глибину. Це зумовлено їх недостатньою здатністю до ефективного перерізання товстих і міцних часток навіть подрібнених пожнивних залишків.

Підвищення рівномірності заробки насіння зернових культур на задану глибину в умовах ресурсозберігаючих технологій можливе шляхом удосконалення конструкції сошників, зокрема за рахунок підвищення ефективності перерізання пожнивних залишків крайками дисків сошників.

Для реалізації поставленої мети розроблено експериментальний дводисковий сошник з вирізним диском для технології Mini-till [24]. Конструкція (рис. 1) включає корпус 1, напівосі 2 і 3 з дисками 4 і 5 різного діаметра, напрямник для насіння 7 та повідець 8 для кріплення до рами сівалки. Периферійна частина більшого диска виконана з конічними вирізами 9, боковини 10 яких утворюють кут α , менший за кут тертя ковзання стебел по металу, а глибина вирізів $h = R_\delta - R_\mu$ забезпечує перерізання пожнивних залишків.

Під час сівби диск більшого діаметра розрізає верхній шар ґрунту і формує початкову борозенку, після чого диск меншого діаметра заглиблюється в розпушений ґрунт. Бокові поверхні дисків відсувають ґрунт у сторони, формуючи конічну борозенку

Результати досліджень розподілу насіння за глибиною заробки залежно від швидкості руху сіялки та величини притискного зусилля сошників подано у вигляді гістограм (рис. 2) та таблиці 1, в якій наведено середні значення глибини заробки насіння $\bar{x}$, стандартні відхилення σ та коефіцієнти варіації V для трьох типів сошників.

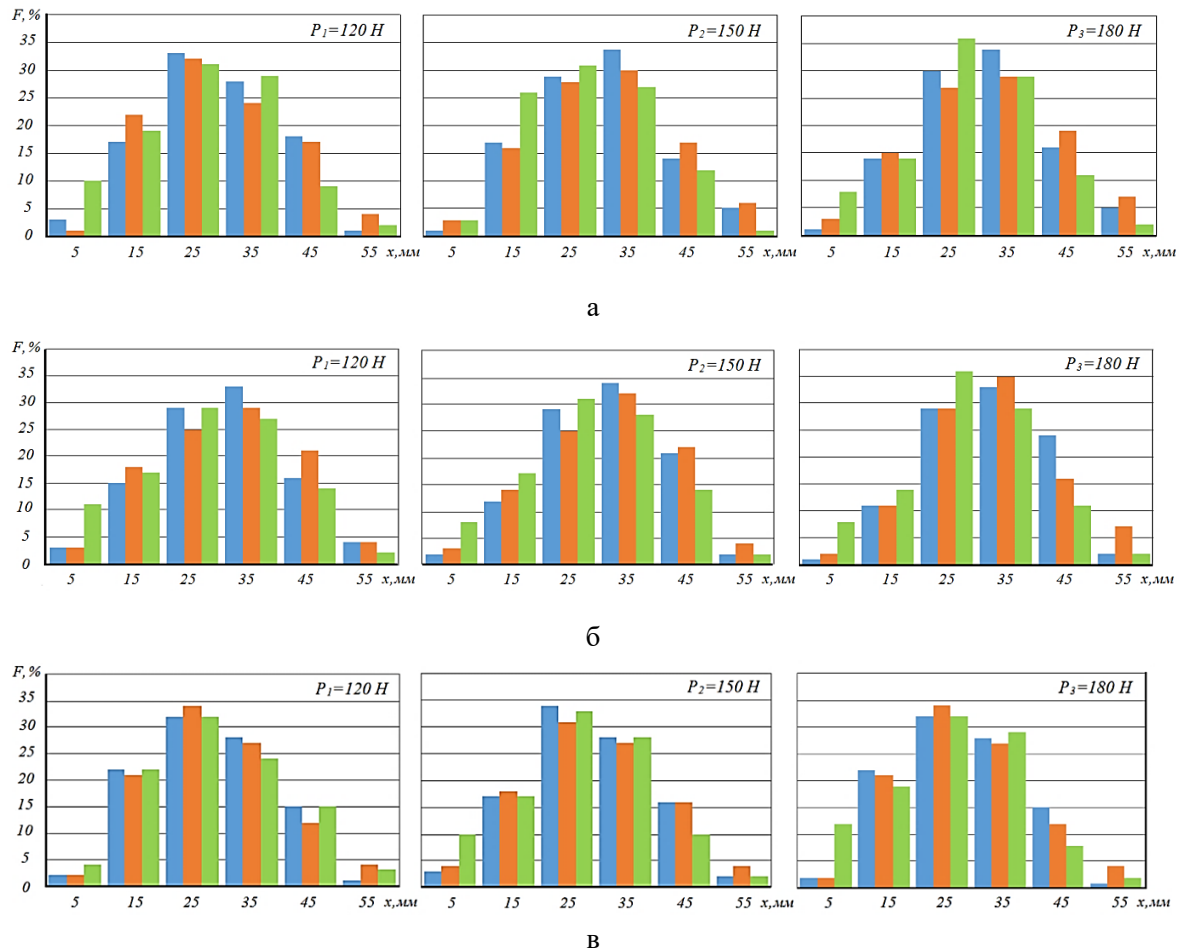


Рис. 2. Розподіл насіння за глибиною заробки в залежності від притискного зусилля сошників на ґрунт та швидкості руху сіялки:

- – сошник дводисковий однорядковий
- – сошник з різновеликими дисками
- – сошник експериментальний з вирізним диском

а – $v_1 = 1,5$ м/с; б – $v_2 = 2,0$ м/с; в – $v_3 = 2,5$ м/с

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що за швидкості руху сіялки $v_1 = 1,5$ м/с (рис. 2, а) збільшення притискного зусилля сошників з 120 до 180 Н істотно впливає на характер розподілу насіння у ґрунтовому шарі. Зокрема, кількість насіння, розміщеного у шарі ґрунту завглибшки 31...50 мм, для експериментального сошника зросла на 4 %, для сошника з різновеликими дисками - на 7 %, тоді як для дводискового однорядкового сошника цей показник збільшився лише на 2 %. Водночас зафіксовано зменшення кількості насіння у верхньому шарі ґрунту 0...20 мм: для дводискового однорядкового сошника - на 7 %, а для сошника з різновеликими дисками та експериментального сошника - на 5 %. Отримані результати свідчать, що зі зростанням притискного зусилля експериментальний сошник і сошник з різновеликими

дисками характеризуються підвищеною стабільністю роботи у вертикальній площині, що забезпечує більш рівномірну глибину заробки насіння.

За швидкості руху сівалки $v_2 = 2,0$ м/с (рис. 2, б) та збільшення притискного зусилля сошників з 120 до 180 Н спостерігається перерозподіл насіння за глибиною заробки. Для всіх досліджуваних сошників зазначена зміна супроводжується зменшенням частки насіння у крайніх ґрунтових горизонтах, однак характер цього перерозподілу суттєво залежить від конструкції сошника. Зокрема, кількість насіння у верхньому шарі ґрунту завглибшки 0...20 мм зменшується для дводискового однорядкового та експериментального сошників на 6 %, тоді як для сошника з різновеликими дисками - на 8 %. У нижньому шарі ґрунту 41...60 мм для дводискового однорядкового сошника зафіксовано зменшення частки насіння на 3 %, для сошника з різновеликими дисками - на 2 %. Водночас для експериментального сошника, на відміну від серійних конструкцій, спостерігається збільшення кількості насіння у зазначеному шарі на 6 %. Отримані результати свідчать, що за швидкості руху 2,0 м/с експериментальний сошник забезпечує більш контрольований характер заробки насіння та стабільність формування посівної борозни за умов підвищеного притискного зусилля, тоді як серійні сошники демонструють тенденцію до зміщення насіння у верхні горизонти ґрунту.

За швидкості руху $v_3 = 2,5$ м/с (рис. 2, в) і зміні притискного зусилля також спостерігається перерозподіл насіння у ґрунтових шарах. У шарі ґрунту 31...50 мм відбувається зменшення кількості насіння для дводискового однорядкового сошника на 4 %, тоді як для сошника з різновеликими дисками та експериментального сошника, навпаки, фіксується збільшення цього показника на 7 %. У діапазоні глибин заробки 21...40 мм дводисковий сошник і сошник з різновеликими дисками забезпечують розміщення від 57 до 61 % насіння, тоді як для експериментального сошника з вирізним диском цей показник є більш стабільним і становить 60...62 %. Отримані результати свідчать про дещо вищу ефективність експериментального сошника порівняно з серійними конструкціями за показником забезпечення заробки насіння у заданому інтервалі глибин.

Узагальнення отриманих даних показує, що як збільшення швидкості руху сівалки, так і зміна притискного зусилля сошників істотно впливають на рівномірність заробки насіння незалежно від типу сошника.

Аналіз даних таблиці 1 свідчить, що для експериментального сошника стандартне відхилення глибини заробки насіння перебуває в межах 10,4...11,4 мм, що характеризує достатньо стабільний процес заробки на задану глибину. Для дводискового однорядкового сошника значення стандартного відхилення змінюються у межах 10,9...12,6 мм, а для сошника з різновеликими дисками - 11,3...12,3 мм, що свідчить на збільшення відхиленнями глибини заробки насіння порівняно з експериментальним сошником.

По рівномірності заробки насіння по глибині, перевагу має експериментальний сошник з вирізним диском. Для серійних сошників коефіцієнт варіації коливається від 35,2 % до 46,5 %, що свідчить про більшу нерівномірність глибини заробки насіння. Коефіцієнт варіації для експериментального сошника становить від 32,1 % до 37,8 %, що вказує на більш рівномірну заробку насіння, причому найкращий показник по рівномірності досягається при швидкості 2,0 м/с та притискному зусиллі 180 Н.

Дослідження показало, що за рівних умов (однакова швидкість та однаковий тиск на сошники) експериментальний сошник та сошник з різновеликими дисками забезпечують заробку насіння на більшу глибину порівняно з дводисковим однорядковим. Різниця в глибині заробки між сошниками становить від 2,6 мм до 4,7 мм. Встановлено, що зі збільшенням швидкості руху різниця глибина заробки насіння

зростає. Це досягається за рахунок кращого заглиблення експериментального сошника у ґрунт, завдяки особливостям конструкції, зокрема використанню диска на сошниках зі збільшеним діаметром і наявністю вирізів на ньому.

Таблиця 1

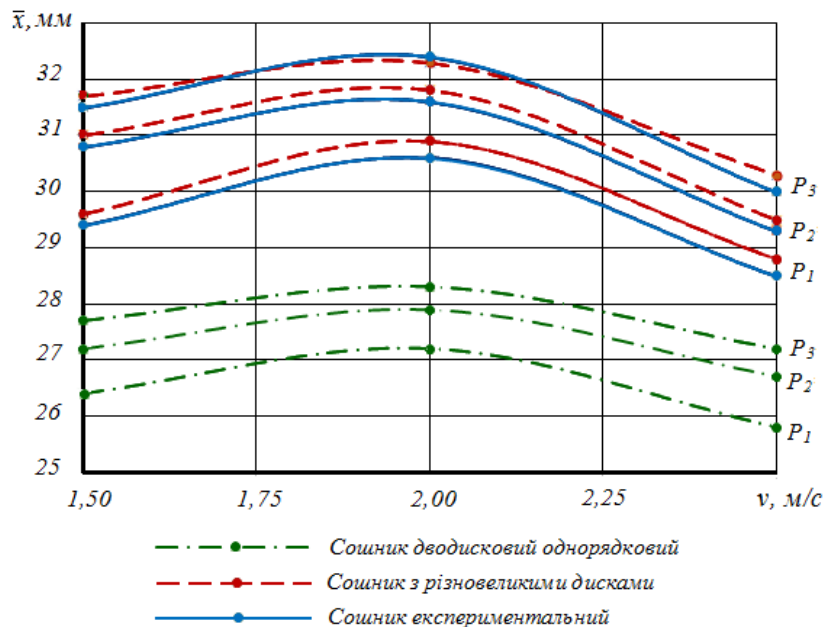
Результати досліджень глибини заробки насіння сошниками

Тип сошника	Швидкість руху v , м/с	Притискне зусилля сошника P , Н	Середня глибина заробки насіння $\bar{x}$, мм	Стандартне відхилення σ , мм	Коефіцієнт варіації V , %
Сошник дводисковий однорядковий	1,5	120	26,4	11,9	45,1
		150	27,2	10,9	40,0
		180	27,7	11,4	41,3
	2,0	120	27,2	12,6	46,3
		150	27,9	12,0	43,0
		180	27,7	11,4	41,3
	2,5	120	28,3	11,8	41,7
		150	26,7	11,9	44,6
		180	25,8	12,0	46,5
Сошник з різновеликими дисками	1,5	120	29,6	11,6	39,1
		150	31,0	12,1	38,9
		180	31,7	12,3	38,8
	2,0	120	30,9	12,1	39,1
		150	31,8	11,7	36,8
		180	32,3	11,4	35,2
	2,5	120	28,8	11,3	39,1
		150	29,5	11,9	40,4
		180	30,3	12,6	41,5
Сошник експериментальний з вирізним диском	1,5	120	29,4	10,9	37,2
		150	30,8	11,1	36,1
		180	31,5	11,0	34,8
	2,0	120	30,6	11,4	37,3
		150	31,6	10,7	33,7
		180	32,4	10,4	32,1
	2,5	120	28,5	10,8	37,8
		150	29,3	11,0	37,7
		180	30,0	11,2	37,5

На рисунку 3 наведено залежність середньої глибини заробки насіння $\bar{x}$ від швидкості руху сівалки v та притискного зусилля сошників P для трьох типів сошників: дводискового однорядкового, з різновеликими дисками та експериментального з вирізним диском.

Аналіз графіків показує, що для всіх досліджуваних сошників зі збільшенням швидкості руху від 1,5 до 2,0 м/с спостерігається зростання середньої глибини заробки насіння, після чого за подальшого підвищення швидкості до 2,5 м/с глибина заробки помітно зменшується. Це пояснюється тим, що за невеликої швидкості руху сівалки сошники копіюють окремі ґрунтові грудки та не повністю перерізають стебла рослинних решток, унаслідок чого насіння загортається на глибину, меншу за установчу. Із підвищенням швидкості диски сошників ефективніше руйнують ґрунтові грудки та

якісніше перерізають рослинні рештки (особливо це стосується експериментального сошника), що зумовлює збільшення глибини їх ходу і, відповідно, глибини заробки насіння до установчого значення. Максимальні значення середньої глибини заробки $\bar{x}$ для всіх типів сошників досягаються за швидкості 2,0 м/с. Подальше збільшення швидкості призводить до виглиблення сошників унаслідок зростання опору ґрунту.



$P_1=120$ Н; $P_2=150$ Н; $P_3=180$ Н

Рис. 3. Залежність середньої глибини заробки насіння $\bar{x}$ від швидкості руху v та притискового зусилля на сошники P

Підвищення притискового зусилля сошників із 120 Н до 180 Н супроводжується зростанням середньої глибини заробки насіння в усьому досліджуваному діапазоні швидкостей. При цьому для кожного значення швидкості криві, що відповідають більшим значенням притискового зусилля, розташовані вище, що свідчить про безпосередній вплив тиску на сошники на їх заглиблення в ґрунт.

Порівняльний аналіз показує, що експериментальний сошник, порівняно з серійними конструкціями, забезпечує більш стабільну і задану глибину заробки насіння в усьому діапазоні швидкостей руху та притискних зусиль, що підтверджує доцільність його застосування в умовах ресурсозберігаючих технологій обробітки ґрунту.

Другий етап експериментальних досліджень було проведено з метою визначення впливу ущільнення посівної борозни на схожість насіння озимої пшениці. Для цього розглянуто два варіанти висіву:

- 1) висів і заробка насіння експериментальним сошником із вирізним диском;
- 2) висів і заробка насіння із використанням того самого сошника, оснащеного прикочувальним котком, який встановлювався позаду сошника та виконував функцію ущільнення ґрунту в зоні висіву (рис. 4).

Для визначення твердості ґрунту в посівних борозенках використовували твердомір, який забезпечував отримання об'єктивних даних щодо щільності ґрунту після проходження сошника. Вимірювання проводили у верхньому шарі ґрунту (0...5 см) із виконанням трьох повторних вимірювань для забезпечення статистичної надійності результатів. Дослідження виконували на середньосуглинковому ґрунті.

За результатами проведених дослідів встановлено залежність твердості ґрунту ρ у посівній борозні від швидкості руху v . Отримані залежності подано у вигляді кривих (рис. 5) для двох варіантів висіву.



Рис. 4. Висів та заробка насіння експериментальним сошником з застосуванням прикочувального котка

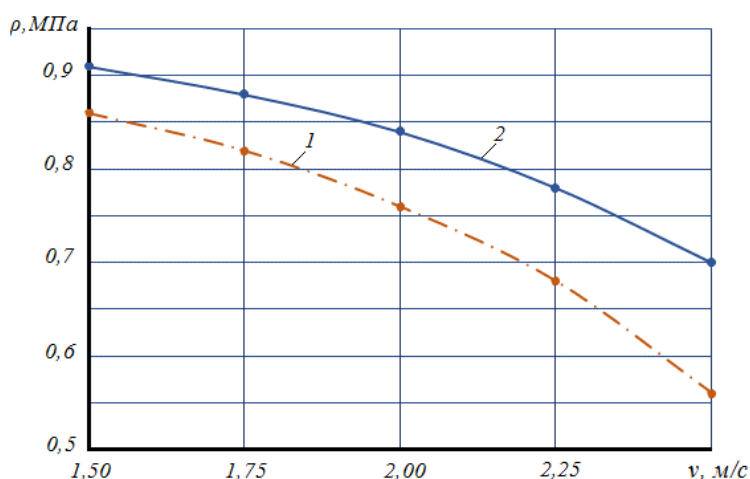


Рис. 5. Залежність твердості ґрунту ρ у посівній борозні від швидкості руху v :
1 – висів та заробка насіння сошником;
2 – висів та заробка насіння сошником з прикочувальним котком

Аналіз отриманих даних (рис. 5) показує, що твердість ґрунту у посівній борозні при використанні сошника з прикочувальним котком є вищою порівняно з варіантом, у якому застосовувався лише сошник. Крім того, у варіанті з прикочуванням зменшення твердості ґрунту зі збільшенням швидкості руху сіялки має більш плавний характер, що свідчить про рівномірніше ущільнення посівного шару та стабільніші умови в зоні розміщення насіння.

Важливим є те, що схожість насіння значною мірою залежить від твердості ґрунту в зоні висіву, оскільки вона визначає щільність контакту насіння з ґрунтом і умови надходження вологи. Результати досліджень показали, що використання експериментального сошника в поєднанні з прикочувальним котком сприяє підвищенню схожості насіння озимої пшениці на 3,6 % порівняно з варіантом, у якому ущільнення борозни не виконувалося. Це підтверджує доцільність застосування локального ущільнення ґрунту для поліпшення умов проростання насіння та підвищення польової схожості.

Висновки

1. Удосконалена конструкція експериментального сошника з вирізним диском більшого діаметра забезпечує ефективніше перерізання рослинних решток, зменшення вертикальних коливань і підвищення якості формування посівної борозни, що є важливою умовою для реалізації ресурсозберігаючої технології Mini-till.
2. Експериментальний дводисковий сошник характеризується підвищеною стабільністю роботи порівняно з дводисковим однорядковим сошником і сошником з різновеликими дисками, що проявляється у меншому впливі до зміни швидкості руху та у забезпеченні розміщення насіння в межах агротехнічно доцільних шарів ґрунту.
3. Встановлено, що зі зростанням швидкості руху сівалки для всіх типів сошників спостерігається тенденція до зменшення середньої глибини заробки насіння, тоді як підвищення притискного зусилля забезпечує її зростання та стабілізацію за різних режимів роботи.
4. Порівняльні дослідження показали, що поєднання експериментального сошника з прикочувальним котком забезпечує підвищення стабільності глибини заробки насіння та сприяє збільшенню польової схожості озимої пшениці.

Список використаних джерел

1. Kumarasinghe U. A review on new technologies in soil erosion management. Journal of research technology and engineering. 2021. Vol. 2, Issue 1. P. 120–127.
2. Камінський В.Ф. Наукові основи оптимізації сучасних технологій вирощування сільськогосподарських культур залежно від типу агроформувань. Збірник наукових праць Національного наукового центру «Інститут землеробства НААН». 2017. Вип. 4. С. 3–14.
3. Формування родючості ґрунту в умовах органічного землеробства / В.М. Писаренко та ін. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2019. № 3. С. 85–91. DOI 10.31210/visnyk2019.03.11
4. Чайка Т.О. Роль мінімального обробітку ґрунту в органічному землеробстві. Інженерія природокористування. 2018. № 2 (10). С. 37–44.
5. Циліурік О.І. Система мульчувального обробітку ґрунту в Північному Степу: монографія. Дніпро: Новий Світ – 2000, 2019. 298 с.
6. Гангур В. В., Лень О. І., Гангур Ю. М. Ефект мінімалізації. Farmer. 2015. № 5. С. 24–25.
7. Паштецький В.С. Мінімізація обробітку ґрунту в системі агроекологічного захисту ґрунтів. Вісник аграрної науки Причорномор'я. 2013. Вип. 2. С. 74–81.
8. Гангур В. В., Лень О. І., Гангур М. В. Вплив мінімалізації обробітку ґрунту на вологозабезпечення та продуктивність ячменю ярого в зоні Лівобережного Лісостепу України. Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2021. № 1. С. 128–134. doi: 10.31210/visnyk2021.01.15.
9. Свидинюк І.М., Шморгун О.В. Реалізація біологічного потенціалу зернових культур за різних технологій вирощування. Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства УААН» К.: ВД «ЕКМО», 2008. Спецвипуск. С. 49.
10. Лихочвор В.В. Агробіологічні основи формування врожаю озимої пшениці в умовах західного Лісостепу України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. с.-г. наук. спец. 06.01.09 «рослинництво». Інститут землеробства УААН. К., 2004. 42 с.
11. Зубко В.М. Особливості формування біологічної врожайності озимої пшениці. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. К., 2013. Вип. 185, ч. 3. С. 328–334.

12. Огляд конструкцій посівних машин для MINI-TILL та NO-TILL технологій у системах ресурсозберігаючого землеробства / Р.В. Кириченко, Є.В. Лубченко, О.Б. Козій, А.О. Колпаченко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів: Науковий журнал. Харків: ДБТУ, 2025. Вип. 26. С. 25–35. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.25-35>.

13. Improving the efficiency of a sowing technology based on the improved structural parameters for colters / O. Nanka, I. Morozov, V. Morozov, M. Krekot, A. Poliakov, I. Kiralhazi, M. Lohvynenko, K. Sharai, A. Babiy, M. Stashkiv // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2019. - Vol. 4, Issue 1-100. - С. 33-45. - DOI 10.15587/1729-4061.2019.174445.

14. Substantiation of the presence and parameters of seed guides in the openers, which increase the quality of sowing and yield / O. Nanka, I. Morozov, V. Morozov, M. Krekot, A. Poliakov, I. Kiralhazi, M. Lohvynenko, V. Ryndiaiev, S. Dyakonov, M. Stashkiv // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2021. - Vol. 4, № 1-112. - С. 61-75. - DOI 10.15587/1729-4061.2021.239304.

15. Сало В.М., Лузан О.Р. Вибір напрямів вдосконалення сошників сівалок прямого посіву зернових культур. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Кіровоград: КНТУ. 2010. Вип. 40. Част. II. С. 271-277.

16. Gorobey V., Adamchuk V., Bulgakov V. Theory of two-disc anchor opener of grain drill. Scientific proceedings i international scientific conference «CONSERVING SOILS AND WATER», 2016. P. 71-73.

17. Гевко Б.М., Павельчук Ю.Ф. Дослідження процесу розподілу насіння зернових культур при підґрунтоворозкидному способі сівби: теоретичний аналіз. Зб. наук. праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Ч. 2. Технічні науки. Кам'янець-Подільський. 2016. Вип. 24. С. 25–32.

18. Грушецький С.М., Кириченко Р.В., Омелянов О.М. Аналіз та перспективи технологічних і конструктивних особливостей посівних машин. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 2 (117). С. 25-33. doi: 10.37128/2520-6168-2022-2-3.

19. Кириченко Р.В., Бурлака С.А. Шляхи удосконалення конструкцій сівалок для точного землеробства. Вібрації в техніці та технологіях. - 2023. - № 4 (111). С. 37-46. - DOI 10.37128/2306-8744-2023-4-6.

20. Результати польових досліджень дводискових сошників для сівби зернових культур за технологією MINI-TILL / Р.В. Кириченко, Є.В. Лубченко, М.В. Бакум, О.Б. Козій // Науковий вісник Таврійського держ. агротехнол. ун-ту. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Т. 15, № 2. С. 53–60. DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-5>.

21. He J, Zhang Z Q, Li H W, Wang Q J. Development of small/medium size no-till and minimum-till seeders in Asia: A review. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014; 7(4): 1-12. DOI:10.3965/j.ijabe.20140704.001.

22. P. Savinych, R.Kurbanov, M. Kuboń, J. Kamionka. Stability of semi-mounted sod seeder motion. Scientific quarterly journal: Agricultural Engineering, 2015. 3 (155). P:101–108. DOI: <http://dx.medra.org/10.14654/ir.2015.155.140>.

23. L. Conceição, P. Barreiro, S. Dias, M. Garrido, C. Valero, J. R. Marques da Silva. A partial study of vertical distribution of conventional no-till seeders and spatial variability of seed depth placement of maize in the Alentejo region, Portugal. Precision Agriculture, 2016. Vol.17. P. 36–52. DOI 10.1007/s11119-015-9405.

24. Пат. 156689 Україна, МПК А01С7/20. Дводисковий сошник для ресурсозберігаючих технологій посіву зернових культур / М.В. Бакум, Р.В. Кириченко, Є.В. Лубченко, О.В. Лубченко, О.І. Завгородній, Т.О. Сичова, А.І. Сичов, М.М. Крекот, О.В. Сіняєва; власник Держ. біотехнол. ун-т. - № u202400597; Заявл. 05.02.2024; Опубл. 24.07.2024, Бюл. № 30. 5 с.

25. СОУ 74.3-37-129:2004 Випробування сільськогосподарської техніки. Машини посівні. Методи випробувань / М. Собчук, В. Погорілий, Л. Шустік та ін. К.: Мінагрополітики України, 2006. 86 с.

References

1. Kumarasinghe U. A review on new technologies in soil erosion management. Journal of research technology and engineering. 2021. Vol. 2, Issue 1. P. 120–127.
2. Kaminsky V.F. Scientific foundations of optimization of modern technologies of growing agricultural crops depending on the type of agricultural formations. Collection of scientific papers of the National Scientific Center "Institute of Agriculture of the NAAS". 2017. Issue 4. P. 3–14.
3. Formation of soil fertility in conditions of organic farming / V.M. Pisarenko et al. Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy. 2019. No. 3. P. 85–91. DOI 10.31210/visnyk2019.03.11.
4. Chaika T.O. The role of minimum tillage in organic farming. Environmental Engineering. 2018. No. 2 (10). P. 37–44.
5. Tsilyuryk O.I. Mulching soil cultivation system in the Northern Steppe: monograph. Dnipro: Novy Svit – 2000, 2019. 298 p.
6. Gangur V. V., Len O. I., Gangur Yu. M. The effect of minimization. Farmer. 2015. No. 5. P. 24–25.
7. Pashetsky V. S. Minimization of soil cultivation in the system of agroecological soil protection. Bulletin of the Black Sea Region Agricultural Science. 2013. Issue 2. P. 74–81.
8. Gangur V. V., Len O. I., Gangur M. V. The impact of minimization of soil cultivation on moisture supply and productivity of spring barley in the Left-Bank Forest-Steppe zone of Ukraine. Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy. 2021. No. 1. P. 128–134. doi: 10.31210/visnyk2021.01.15
9. Svydynyuk I.M., Shmorgun O.V. Realization of the biological potential of grain crops under different cultivation technologies. Collection of scientific works of the NSC "Institute of Agriculture of the Ukrainian Academy of Sciences" Kyiv: Publishing House "EKMO", 2008. Special issue. P. 49.
10. Likhochvor V.V. Agrobiological foundations of winter wheat yield formation in the conditions of the western Forest-Steppe of Ukraine: author's abstract. dissertation for the degree of Doctor of Agricultural Sciences. Special Sciences 06.01.09 "Plant cultivation". Institute of Agriculture of the Ukrainian Academy of Sciences. Kyiv, 2004. 42 p.
11. Zubko V.M. Features of the formation of biological yield of winter wheat. Scientific Bulletin of the National University of Life Resources and Nature Management of Ukraine. K., 2013. Issue 185, part 3. P. 328–334.
12. Review of the designs of sowing machines for MINI-TILL and NO-TILL technologies in resource-saving farming systems / R.V. Kyrychenko, E.V. Lubchenko, O.B. Koziy, A.O. Kolpachenko // Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: Scientific journal. Kharkiv: DBTU, 2025. Issue 26. P. 25–35. <https://doi.org/10.64165/journal-ts.2025.26.25-35>.
13. Improving the efficiency of a sowing technology based on the improved structural parameters for colters / O. Nanka, I. Morozov, V. Morozov, M. Krekot, A. Poliakov, I. Kiralhazi, M. Lohvynenko, K. Sharai, A. Babi, M. Stashkiv // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. - 2019. - Vol. 4, Issue 1-100. - C. 33-45. - DOI 10.15587/1729-4061.2019.174445.
14. Substantiation of the presence and parameters of seed guides in the openers, which increase the quality of sowing and yield / O. Nanka, I. Morozov, V. Morozov, M. Krekot, A. Poliakov, I. Kiralhazi, M. Lohvynenko, V. Ryndiaiev, S. Dyakonov, M. Stashkiv // Eastern-

European Journal of Enterprise Technologies. - 2021. - Vol. 4, № 1-112. - С. 61-75.
- DOI 10.15587/1729-4061.2021.239304.

15. Salo V.M., Luzan O.R. Selection of directions for improving the openers of direct seeding seeders of grain crops. Design, production and operation of agricultural machines. Kirovograd: KNTU. 2010. Issue 40. Part II. P. 271-277.

16. Gorobey V., Adamchuk V., Bulgakov V. Theory of two-disc anchor opener of grain drill. Scientific proceedings i international scientific conference «CONSERVING SOILS AND WATER», 2016. P. 71-73.

17. Gevko B.M., Pavelchuk Yu.F. Research on the process of seed distribution of grain crops with subsoil sowing method: theoretical analysis. Collection of scientific works of Podolsk State Agrarian and Technical University. Part 2. Technical Sciences. Kamianets-Podilskyi. 2016. Issue 24. P. 25-32.

18. Hrushetsky S.M., Kyrychenko R.V., Omelyanov O.M. Analysis and prospects of technological and design features of sowing machines. Technology, energy, transport of the agricultural complex. 2022. No. 2 (117). P. 25-33. doi: 10.37128/2520-6168-2022-2-3

19. Kyrychenko R.V., Burlaka S.A. Ways to improve the designs of seed drills for precision farming. Vibrations in engineering and technologies. - 2023. - No. 4 (111). P. 37-46. - DOI 10.37128/2306-8744-2023-4-6.

20. Results of field studies of double-disk openers for sowing grain crops using MINI-TILL technology / R.V. Kyrychenko, E.V. Lubchenko, M.V. Bakum, O.B. Koziy // Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University. Zaporizhzhia: TSATU, 2025. Vol. 15, No. 2. P. 53-60. DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-5>.

21. He J, Zhang Z Q, Li H W, Wang Q J. Development of small/medium size no-till and minimum-till seeders in Asia: A review. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014; 7(4): 1-12. DOI:10.3965/j.ijabe.20140704.001.

22. P. Savinych, R.Kurbanov, M. Kuboń, J. Kamionka. Stability of semi-mounted sod seeder motion. Scientific quarterly journal: Agricultural Engineering, 2015. 3 (155). P:101-108. DOI: <http://dx.medra.org/10.14654/ir.2015.155.140>.

23. L. Conceição, P. Barreiro, S. Dias, M. Garrido, C. Valero, J. R. Marques da Silva. A partial study of vertical distribution of conventional no-till seeders and spatial variability of seed depth placement of maize in the Alentejo region, Portugal. Precision Agriculture, 2016. Vol.17. P. 36-52. DOI 10.1007/s11119-015-9405.

24. Pat. 156689 Ukraine, MPK A01C7/20. Double-disk opener for resource-saving technologies of sowing grain crops / M.V. Bakum, R.V. Kyrychenko, E.V. Lubchenko, O.V. Lubchenko, O.I. Zavgorodniy, T.O. Sychova, A.I. Sychov, M.M. Krekot, O.V. Sinyaeva; owner State Biotechnological University - No. u202400597; Appl. 05.02.2024; Publ. 24.07.2024, Bull. No. 30. 5 p.

25. SOU 74.3-37-129:2004 Testing of agricultural machinery. Sowing machines. Test methods / M. Sobchuk, V. Pohoriliy, L. Shustik, etc. Kyiv: Ministry of Agrarian Policy of Ukraine, 2006. 86 p.

Отримано: 10.04.2026. Прийнято: 21.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Задорожний В. П.
ORCID iD: 0000-0002-1013-2715
E-mail: Terrados@meta.ua

Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ТРАНСМІСІЇ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА ПРАЦЮЮЧОГО У СКЛАДІ ГРУНТООБРОБНОГО АГРЕГАТУ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.96>

УДК 631.3.06-752

Задорожний В. П. До дослідження динаміки трансмісії колісного трактора працюючого у складі ґрунтообробного агрегату

Анотація. Визначено, що дослідження динаміки трансмісії колісного трактора, що працює у складі ґрунтообробного агрегату, є ключовим для підвищення ефективності, надійності та довговічності сільськогосподарської техніки. Це комплексне завдання, яке охоплює аналіз взаємодії трактора з ґрунтом, динамічних навантажень на трансмісію, а також оптимізацію систем перемикання передач та управління. Встановлено, що ефективність ґрунтообробних агрегатів значною мірою залежить від взаємодії робочих органів з ґрунтом та тягових характеристик трактора. Встановлено, що дослідження динаміки трансмісії повнопривідного колісного трактора працюючого у складі ґрунтообробного МТА потребує складання відповідної динамічної та математичної моделі. Використовуючи методи формування рівнянь динаміки трансмісії трактора складено відповідні динамічну та математичну моделі трансмісії трактора. Математичну модель динаміки повнопривідного колісного трактора, що працює у складі ґрунтообробного агрегату досліджено на прикладі колісного трактора ХТЗ-17021 та культиватора КПС-4,2. Встановлено залежності швидкостей обертання елементів трансмісії та коліс повнопривідного колісного трактора від часу. Визначено залежності моментів, що діють на елементи трансмісії та крутні моменти коліс повнопривідного колісного трактора від часу. Розраховано залежності дотичних сил тяги та опору руху коліс повнопривідного колісного трактора від часу. Куткові швидкості ω_1 , ω_2 та ω_3 мають виражений перехідний процес на початковому етапі ($t < 1$ с). Після короткочасного перехідного процесу система виходить на усталений режим роботи при $\omega_1 \approx 275$ рад/с, $\omega_2 \approx 275$ рад/с та $\omega_3 \approx 40$ рад/с. Після завершення перехідного процесу крутні моменти коліс трактора стабілізуються на рівні $M_{k11} \approx M_{k12} \approx 1,8 \cdot 10^4$ Н·м та $M_{k21} \approx M_{k22} \approx 1,1 \cdot 10^4$ Н·м. У початковий момент часу спостерігається короткочасний різкий імпульс (пікове значення) дотичних сил тяги та опору руху коліс повнопривідного колісного трактора, після чого всі криві швидко затухають (на рівні $P_{k11} \approx P_{k12} \approx 0,73 \cdot 10^4$ Н та $P_{k21} \approx P_{k22} \approx 0,45 \cdot 10^4$ Н).

Ключові слова: динаміка, трансмісія, математична модель, момент, сила, ґрунтообробний, машинно-тракторний агрегат.

Zadorozhny V. P. To the study of the dynamics of the transmission of a wheeled tractor operating as part of a soil tillage unit

Abstract. It has been determined that the study of the dynamics of the transmission of a wheeled tractor operating as part of a tillage unit is key to improving the efficiency, reliability and durability of agricultural machinery. This is a complex task that includes the analysis of the interaction of the tractor with the soil, dynamic loads on the transmission, as well as the optimization of gear shifting and control systems. It has been established that the efficiency of tillage units largely depends on the interaction of working bodies with soil and traction characteristics of the tractor. It has been established that the study of the dynamics of the transmission dynamics of an all-wheel drive wheeled tractor operating as part of a tillage MTA

requires the compilation of an appropriate dynamic and mathematical model. Using the methods of forming the equations of the dynamics of the tractor transmission, the corresponding dynamic and mathematical models of the tractor transmission were compiled. A mathematical model of the dynamics of an all-wheel drive wheeled tractor operating as part of a tillage unit was studied on the example of a wheeled tractor KhTZ-17021 and a cultivator KPS-4.2. The dependencies of the rotation speeds of the transmission elements and wheels of an all-wheel drive wheeled tractor on time have been established. The dependencies of the moments acting on the transmission elements and the torques of the wheels of an all-wheel drive wheeled tractor on time have been determined. The dependence of the tangential traction forces and the resistance of the wheels of the wheels of an all-wheel drive wheeled tractor on time has been calculated. The angular velocities ω_1 , ω_2 and ω_3 have a pronounced transient process at the initial stage ($t < 1$ s). After a short-term transient, the system enters a steady state of operation at $\omega_1 \approx 275$ rad/s, $\omega_2 \approx 275$ rad/s and $\omega_3 \approx 40$ rad/s. After the completion of the transient, the torques of the tractor wheels stabilize at the level of $M_{k11} \approx M_{k12} \approx 1.8 \cdot 10^4$ N·m and $M_{k21} \approx M_{k22} \approx 1.1 \cdot 10^4$ N·m. At the initial moment of time, there is a short-term sharp impulse (peak value) of the tangential forces of traction and resistance of the wheels of an all-wheel drive wheeled tractor, after which all curves quickly fade away (at the level of $P_{k11} \approx P_{k12} \approx 0.73 \cdot 10^4$ N and $P_{k21} \approx P_{k22} \approx 0.45 \cdot 10^4$ N).

Keywords: dynamics, transmission, mathematical model, moment, force, tillage, machine-tractor unit.

Актуальність проблеми

Дослідження динаміки трансмісії колісного трактора, що працює у складі ґрунтообробного агрегату, є ключовим для підвищення ефективності, надійності та довговічності сільськогосподарської техніки. Це комплексне завдання, яке охоплює аналіз взаємодії трактора з ґрунтом, динамічних навантажень на трансмісію, а також оптимізацію систем перемикавання передач та управління [1–3].

Встановлено, що ефективність ґрунтообробних агрегатів значною мірою залежить від взаємодії робочих органів з ґрунтом та тягових характеристик трактора [3, 4]. Однак, під час ґрунтообробних робіт трансмісія трактора зазнає значних і змінних навантажень, які можуть призвести до зносу та пошкоджень [1, 2].

Визначено, що тяговий опір ґрунтообробних знарядь залежить від багатьох факторів, включаючи індекс конуса ґрунту, глибину обробітку та робочу швидкість [5]. Ці змінні параметри впливають на навантаження, що передається на трансмісію трактора. Машинне навчання може бути використане для прогнозування тягового опору відвальних плугів у супіщаному ґрунті, що дозволяє оптимізувати налаштування обладнання [5].

Буксування коліс є значною проблемою в сільському господарстві, що призводить до втрати енергії та підвищеного споживання палива [6–8]. Надмірне буксування коліс знижує тягову ефективність і збільшує навантаження на компоненти трансмісії [7]. Розробка автоматичних систем контролю буксування, наприклад, на основі нечіткої логіки, що регулюють глибину обробітку залежно від рівня буксування, може значно покращити ефективність [6]. Штучні нейронні мережі (ШНМ) та множинна лінійна регресія (МЛР) також можуть ефективно прогнозувати буксування заднього колеса трактора в режимі 2WD під час оранки, забезпечуючи точний моніторинг для оперативного коригування [8].

Параметри передавального числа трансмісії є вирішальними факторами, що впливають на потужність, економічність та комфорт транспортного засобу [9]. Метод оптимізації передавальних чисел, заснований на коефіцієнті використання швидкості життєвого циклу, враховує складні умови роботи сільськогосподарських тракторів та

різні робочі режими для забезпечення оптимального поєднання потужності, економічності та комфорту [9].

Чисті електричні трактори, такі як ті, що оснащені колісним приводом, пропонують значні переваги у зниженні викидів та підвищенні тягової ефективності. Для таких систем застосовується метод спільного управління, що враховує швидкість руху та буксування для активного розподілу крутного моменту між колесами, що дозволяє знизити споживання енергії під час оранки [7].

Розробка оптимальних графіків перемикання передач є фундаментальною для всіх типів трансмісій. Ці графіки повинні враховувати швидкість трактора, навантаження на двигун, умови ґрунту та бажану продуктивність. Для гібридних систем графіки можуть також інтегрувати управління енергією, оптимізуючи розподіл потужності між різними джерелами [10]. З огляду на мінливість умов ґрунту та робочих завдань, адаптивні стратегії перемикання передач, які можуть динамічно змінюватися, є дуже цінними. Системи моніторингу в реальному часі, що вимірюють навантаження на двигун, тягове зусилля та швидкість руху, дозволяють адаптувати стратегії перемикання передач до конкретних умов ґрунту та знаряддя [11].

Таким чином, комплексний підхід до дослідження динаміки трансмісії, що включає аналіз взаємодії з ґрунтом, оптимізацію стратегій перемикання передач для різних типів трансмісій, а також моніторинг та оцінку терміну служби компонентів, є необхідним для підвищення ефективності та стійкості сільськогосподарських операцій [1–11].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування методу дослідження динаміки трансмісії колісного трактора працюючого у складі ґрунтообробного агрегату через складання математичної та динамічної моделі.

Результати досліджень

1 Аналітичний вираз для оцінки показника якості сепарації насіння

Колісні трактори серії ХТЗ-170 виробництва ПАТ «Харківський тракторний завод», м. Харків (Україна) широко застосовуються в сільському господарстві з огляду на низку техніко-експлуатаційних, економічних та організаційних переваг. Трактори серії ХТЗ-170 мають достатню тягову потужність для виконання широкого спектра агротехнічних робіт: оранка, культивування, сівба, обробіток ґрунту та транспортні роботи із причепами й причіпним інструментом. Колісна формула цих тракторів забезпечує кращу швидкість переміщення по дорогах та між полями порівняно з гусеничними машинами, що важливо для роботи на розосереджених земельних масивах.

На рис. 1 наведено загальний вигляд ґрунтообробного агрегату у складі колісного трактора ХТЗ-17021 та культиватора КПС-4,2.

Культиватор КПС-4,2 є широко застосовуваним ґрунтообробним знаряддям у складі МТА для суцільного обробітку ґрунту під посів. Його конструктивні та технологічні рішення забезпечують підвищення ефективності обробітку та зниження енергетичних і трудових витрат за рахунок раціональної схеми роботи робочих органів.

Підвищення тягового-енергетичних показників ґрунтообробного агрегату у складі колісного трактора та культиватора для суцільного обробітку ґрунту можна досягнути оптимізацією передавальних чисел трансмісії та розробкою системи автоматичного перемикання передач.



Рис. 1. Загальний вигляд ґрунтообробного агрегату у складі колісного трактора ХТЗ-17021 та культиватора КПС-4,2

1 Математичне моделювання динаміки трансмісії повнопривідного колісного трактора працюючого у складі ґрунтообробного машинно-тракторного агрегату.

Дослідження динаміки трансмісії повнопривідного колісного трактора працюючого у складі ґрунтообробного МТА потребує складання відповідної динамічної та математичної моделі [12–16]. Використовуючи методи формування рівнянь динаміки трансмісії трактора складено відповідні динамічну та математичну моделі трансмісії трактора (рис. 2).

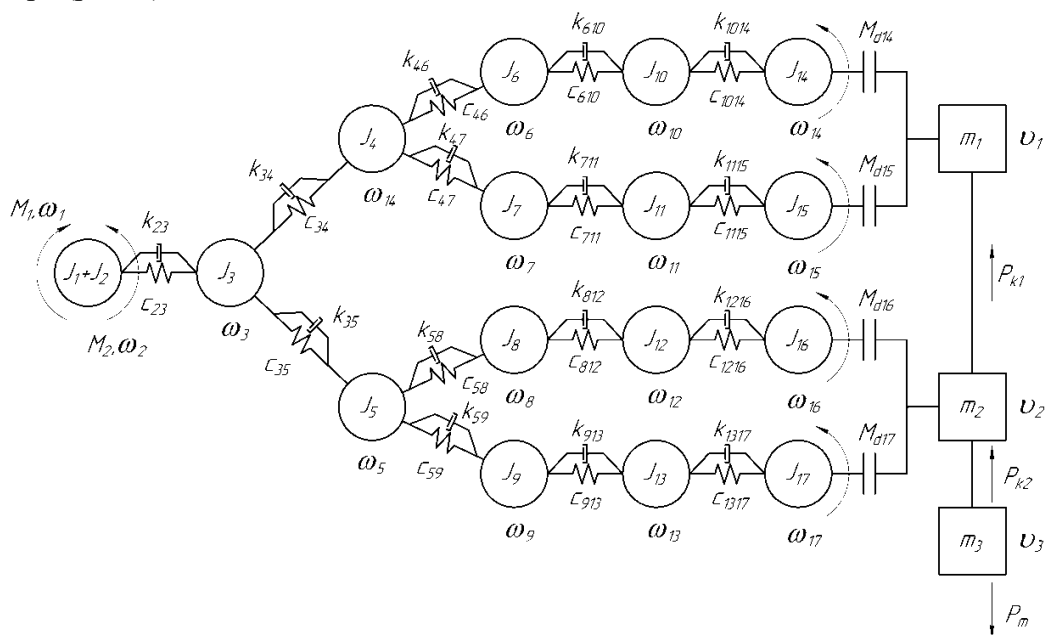


Рис. 2. Динамічна модель повнопривідного колісного трактора працюючого у складі ґрунтообробного агрегату

Динамічна модель колісного трактора з колісною формулою 4х4 характеризується наступними параметрами (рис. 2): J_1 – приведений момент інерції двигуна; J_2 – приведений момент інерції муфти зчеплення; J_3 – момент інерції елементів загальної частини трансмісії трактора; J_4, J_5 – моменти інерції обертових частин приводів передніх і задніх ведучих коліс трактора; J_6, J_7, J_8 та J_9 – моменти інерції бортових

редукторів передніх і задніх ведучих коліс трактора; J_{10}, J_{11}, J_{12} і J_{13} – моменти інерції дисків передніх і задніх ведучих коліс трактора; J_{14}, J_{15}, J_{16} і J_{17} – моменти інерції шин передніх і задніх ведучих коліс трактора; m_1, m_2 – маси першої та другої піврами трактора; M_1 – ефективний крутний момент ДВЗ; M_2 – момент опору на маховику ДВЗ; $M_{d14}, M_{d15}, M_{d16}$ та M_{d17} – моменти зсувних сил взаємодії переднього правого, переднього лівого, заднього правого та заднього лівого коліс трактора; P_{k1}, P_{k2} – тягове зусилля першої та другої піврами трактора; v_1, v_2 – поступальна швидкість руху першої та другої піврами трактора; ω_1 – швидкість обертання колінчатого валу ДВЗ; ω_2 – швидкість обертання веденого диску муфти зчеплення; ω_3 – швидкість обертання первинного валу КПП трактора; ω_4, ω_5 – швидкість обертання переднього та заднього карданів трактора; $\omega_6, \omega_7, \omega_8, \omega_9$ – швидкість обертання передньої лівої, передньої правої, задньої лівої та задньої правої напівосей трактора; $\omega_{10}, \omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13}$ – швидкість обертання передньої лівої, передньої правої, задньої лівої та задньої правої бортової передачі трактора; $\omega_{14}, \omega_{15}, \omega_{16}, \omega_{17}$ – швидкість обертання переднього лівого, переднього правого, заднього лівого та заднього правого колеса трактора; c_{23}, k_{23} – кутова жорсткість та коефіцієнт демпфування загальної частини трансмісії; $c_{34}, c_{35}, k_{34}, k_{35}$ – кутова жорсткість та коефіцієнт демпфування кардану передньої та задньої піврами трактора; $c_{46}, k_{46}, c_{47}, k_{47}, c_{58}, k_{58}, c_{59}, k_{59}$ – окружна жорсткість і коефіцієнт демпфування напівосей приводу передніх і задніх ведучих коліс трактора; $c_{1014}, k_{1014}, c_{1115}, k_{1115}, c_{1216}, k_{1216}, c_{1317}, k_{1317}$ – окружна жорсткість і коефіцієнт демпфування шин передніх і задніх ведучих коліс трактора; m_3 – маса сільськогосподарської машини (культиватора); P_m – тяговий опір ґрунтообробної сільськогосподарської машини (культиватора); $\dot{v}_3$ – швидкість руху сільськогосподарської машини (культиватора).

Дана динамічна багатомасова модель трансмісії ґрунтообробного МТА на базі трактора з технологічним модулем (культиватором) дає можливість оцінити динамічні та енергетичні показники з урахуванням пружних властивостей і демпфуючих елементів трансмісії, ведучих коліс трактора тощо.

Маса, що імітує обертові маси двигуна з моментом інерції J_1 , поєднується з масою обертових частин ведучої частини зчеплення з моментом інерції J_2 .

Двигун, як регульований об'єкт, може мати стаціонарний і нестаціонарний режими роботи. Порушення усталеного стану роботи двигуна може відбуватися як в результаті зміни крутного моменту двигуна, так і в результаті зміни крутного моменту опору [14, 16]. Диференціальне рівняння руху колінчастого вала ДВЗ побудовано на основі принципу д'Аламбера:

$$J_d \dot{\omega}_1 = M_1 - M_2, \quad (1)$$

де $J_d = J_1 + J_2$ – момент інерції, що дорівнює сумі моменту інерції J_1 обертових деталей двигуна, приведених до колінчатого валу та моменту інерції J_2 обертових частин ведучої частини зчеплення.

Для трактора з механічною трансмісією при відсутності буксування муфт зчеплення при сталому русі:

$$\omega_1 = \omega_2,$$

де ω_2 – кутова швидкість веденої частини зчеплення.

Для наближення функціональної залежності $M_d = f(\omega_1, h)$ застосовано наближення многочленом другого порядку до регресії вигляду [14]:

$$M_1 = a_{d0} + a_{d1}\omega_1 + a_{d2}\omega_1^2 + a_{d3}h + a_{d4}h^2, \quad (2)$$

де h – положення рейки подачі палива.

Для опису залежності положення рейки подачі палива в залежності від кутової швидкості колінчастого вала ДВЗ скористаємося диференціальним рівнянням механічного регулятора ПНВТ в повних координатах:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} + N \frac{dh}{dt} + E = A_u \omega_p^2, \quad (3)$$

де ω_p – кутова швидкість регулятора;
 m – маса рухомих частин регулятора і паливного насоса;
 E – відновлююча сила регулятора;
 N – коефіцієнт, що враховує сили тертя рідини або демпфування;
 A – коефіцієнт інерції.

Для деталізації виразу (3) використовуємо функціональні залежності:

$$\begin{aligned} E &= E_{pez} = E_p + c_p h \text{ при } h \geq h_{ном}; \\ E &= E_{кор} = E_k + c_k h \text{ при } h \geq h_{ном}; \\ A_u &= A_{u0} + c_a h, \end{aligned} \quad (4)$$

де E_{p2} , E_k – коефіцієнти, що характеризують натяг пружин регулятора і коректора ПНВТ;

c_p , c_k – коефіцієнти, що виражають залежність відновлюючої сили від положення дозуючого органу відповідно в регулюючій та коректорній гілках характеристик регулятора ПНВТ;

c_a – коефіцієнт, що виражає залежність інерційного коефіцієнта від зміщення дозуючого органу ПНВТ;

A_{u0} – коефіцієнт інерції, що відповідає нульовому положенню дозуючого органу ПНВТ.

Динаміка елементів загальної частини трансмісії описується такими рівняннями:

$$\begin{cases} J_3 \ddot{\varphi}_3 = c_{23}(\varphi_3 - \varphi_2) + k_{23}(\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) - c_{34}(\varphi_4 - \varphi_3) - k_{34}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_3) - \\ - c_{35}(\varphi_5 - \varphi_3) - k_{35}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_3); \\ J_4 \ddot{\varphi}_4 = c_{34}(\varphi_4 - \varphi_3) + k_{34}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_3) - c_{46}(\varphi_6 - \varphi_4) - k_{46}(\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_4) - \\ - c_{47}(\varphi_7 - \varphi_4) - k_{47}(\dot{\varphi}_7 - \dot{\varphi}_4); \\ J_5 \ddot{\varphi}_5 = c_{35}(\varphi_5 - \varphi_3) + k_{35}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_3) - c_{85}(\varphi_8 - \varphi_5) - k_{85}(\dot{\varphi}_8 - \dot{\varphi}_5) - \\ - c_{95}(\varphi_9 - \varphi_5) - k_{95}(\dot{\varphi}_9 - \dot{\varphi}_5). \end{cases} \quad (5)$$

Рівняння руху елементів бортових редукторів передніх і задніх ведучих коліс трактора мають такий вигляд:

$$\begin{cases} J_6 \ddot{\varphi}_6 = c_{46}(\varphi_6 - \varphi_4) + k_{46}(\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_4) - c_{610}(\varphi_{10} - \varphi_6) - k_{610}(\dot{\varphi}_{10} - \dot{\varphi}_6); \\ J_7 \ddot{\varphi}_7 = c_{47}(\varphi_7 - \varphi_4) + k_{47}(\dot{\varphi}_7 - \dot{\varphi}_4) - c_{711}(\varphi_{11} - \varphi_7) - k_{711}(\dot{\varphi}_{11} - \dot{\varphi}_7); \\ J_8 \ddot{\varphi}_8 = c_{48}(\varphi_8 - \varphi_4) + k_{48}(\dot{\varphi}_8 - \dot{\varphi}_4) - c_{812}(\varphi_{12} - \varphi_8) - k_{812}(\dot{\varphi}_{12} - \dot{\varphi}_8); \\ J_9 \ddot{\varphi}_9 = c_{49}(\varphi_9 - \varphi_4) + k_{49}(\dot{\varphi}_9 - \dot{\varphi}_4) - c_{913}(\varphi_{13} - \varphi_9) - k_{913}(\dot{\varphi}_{13} - \dot{\varphi}_9). \end{cases} \quad (6)$$

Розглянемо зв'язок, що враховує рух ведучих коліс трактора (рис. 2). При роботі ведучого колеса в режимі руху під впливом ваги трактора, реакції ґрунту та прикладеного крутного моменту шина ведучого колеса відчуває радіальні, поздовжні і окружні деформації і згладжує нерівномірність сил опору робочої поверхні (коливань нерівностей ґрунту) [13, 14].

Динаміка ведучих коліс трактора описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} J_{10}\ddot{\varphi}_{10} = c_{610}(\varphi_{10} - \varphi_6) + k_{610}(\dot{\varphi}_{10} - \dot{\varphi}_6) - c_{1014}(\varphi_{14} - \varphi_{10}) - k_{1014}(\dot{\varphi}_{14} - \dot{\varphi}_{10}); \\ J_{11}\ddot{\varphi}_{11} = c_{711}(\varphi_{11} - \varphi_7) + k_{711}(\dot{\varphi}_{11} - \dot{\varphi}_7) - c_{1115}(\varphi_{115} - \varphi_{11}) - k_{1115}(\dot{\varphi}_{115} - \dot{\varphi}_{11}); \\ J_{12}\ddot{\varphi}_{12} = c_{812}(\varphi_{12} - \varphi_8) + k_{812}(\dot{\varphi}_{12} - \dot{\varphi}_8) - c_{1216}(\varphi_{16} - \varphi_{12}) - k_{1216}(\dot{\varphi}_{16} - \dot{\varphi}_{12}); \\ J_{13}\ddot{\varphi}_{13} = c_{913}(\varphi_{13} - \varphi_9) + k_{913}(\dot{\varphi}_{13} - \dot{\varphi}_9) - c_{1317}(\varphi_{17} - \varphi_{13}) - k_{1317}(\dot{\varphi}_{17} - \dot{\varphi}_{13}); \\ J_{14}\ddot{\varphi}_{14} = c_{1014}(\varphi_{10} - \varphi_{14}) + k_{1014}(\dot{\varphi}_{10} - \dot{\varphi}_{14}) - M_{d11}; \\ J_{15}\ddot{\varphi}_{15} = c_{1115}(\varphi_{11} - \varphi_{15}) + k_{1115}(\dot{\varphi}_{11} - \dot{\varphi}_{15}) - M_{d12}; \\ J_{16}\ddot{\varphi}_{16} = c_{1216}(\varphi_{12} - \varphi_{16}) + k_{1216}(\dot{\varphi}_{12} - \dot{\varphi}_{16}) - M_{d21}; \\ J_{17}\ddot{\varphi}_{17} = c_{1317}(\varphi_{13} - \varphi_{17}) + k_{1317}(\dot{\varphi}_{13} - \dot{\varphi}_{17}) - M_{d22}. \end{cases} \quad (7)$$

Моменти дотичних сил взаємодії передніх і задніх ведучих коліс трактора з ґрунтом можуть бути виражені через моменти, обумовлені пружністю і демпфуванням в шинах передніх і задніх ведучих коліс відповідно [17–19]:

$$\begin{cases} M_{d11} = (c_{1014}\lambda_{m11} + k_{1014}\dot{\lambda}_{m11} + a_{m11}r_{11}^{-1}R_{z11})r_{11}; \\ M_{d12} = (c_{1115}\lambda_{m12} + k_{1115}\dot{\lambda}_{m12} + a_{m12}r_{12}^{-1}R_{z12})r_{12}; \\ M_{d21} = (c_{1216}\lambda_{m21} + k_{1216}\dot{\lambda}_{m21} + a_{m21}r_{21}^{-1}R_{z21})r_{21}; \\ M_{d22} = (c_{1317}\lambda_{m22} + k_{1317}\dot{\lambda}_{m22} + a_{m22}r_{22}^{-1}R_{z22})r_{22}, \end{cases} \quad (8)$$

де a_{m11} , a_{m12} , a_{m21} , a_{m22} – зміщення вертикальних реакцій R_{z11} , R_{z12} , R_{z21} , R_{z22} щодо вертикальної осі переднього лівого та правого, заднього лівого та правого ведучих коліс трактора відповідно;

λ_{m11} , λ_{m12} , λ_{m21} , λ_{m22} – поздовжня деформація шин переднього лівого та правого, заднього лівого та правого ведучих коліс трактора відповідно;

r_{11} , r_{12} , r_{21} , r_{22} – динамічні радіуси коліс трактора.

Рівняння руху піврам колісного трактора шарнірно-з'єднаної компоновки описується рівняннями:

$$m_1\dot{v}_1 = \frac{M_{k11}}{r_{k11}} + \frac{M_{k12}}{r_{k12}} - P_k \frac{m_1}{m_t}; \quad (9)$$

$$m_2\dot{v}_2 = \frac{M_{k21}}{r_{k21}} + \frac{M_{k22}}{r_{k22}} - P_k \frac{m_2}{m_t}, \quad (10)$$

де m_t – маса трактора.

Швидкість руху першої та другої піврами трактора залежить від динамічних радіусів ведучих коліс та знаходяться з виразу:

$$v_1 = 0,5(\omega_{k11}r_{k11} - \dot{\lambda}_{m11} - \delta_{k11}\lambda_{m11} + \omega_{k12}r_{k12} - \dot{\lambda}_{m12} - \delta_{k12}\lambda_{m12}); \quad (11)$$

$$v_2 = 0,5(\omega_{k21}r_{k21} - \dot{\lambda}_{m21} - \delta_{k21}\lambda_{m21} + \omega_{k22}r_{k22} - \dot{\lambda}_{m22} - \delta_{k22}\lambda_{m22}), \quad (12)$$

де $\delta_{k11}, \delta_{k12}, \delta_{k21}, \delta_{k22}$ – коефіцієнти буксування ведучих коліс трактора.

Рівняння руху ґрунтообробної машини можна описано наступним виразом:

$$m_3\dot{v}_3 = P_k - P_m, \quad (13)$$

де $P_k = P_{k1} + P_{k2}$ – сила тяги, що створюється трактором;

У наведених вище рівняннях для зручності вирішення і аналізу записані узагальнені координати і швидкості без зведення до одного валу.

Таким чином, рух машинно-тракторного агрегату описується наведеними вище рівняннями і функціональними залежностями. Їх спільне рішення дозволить визначити показники продуктивності машинно-тракторного агрегату в реальних умовах експлуатації.

2 Результати теоретичних досліджень

Математичну модель динаміки повнопривідного колісного трактора (1)–(13), що працює у складі ґрунтообробного агрегату досліджено на прикладі колісного трактора ХТЗ-17021 та культиватора КПС-4,2. На рис. 3–5 наведено результати теоретичних досліджень.

Встановлено залежності швидкостей обертання елементів трансмісії та коліс повнопривідного колісного трактора від часу (рис. 3). Визначено залежності моментів, що діють на елементи трансмісії та крутні моменти коліс повнопривідного колісного трактора від часу (рис. 4). Розраховано залежності дотичних сил тяги та опору руху коліс повнопривідного колісного трактора від часу (рис. 5).

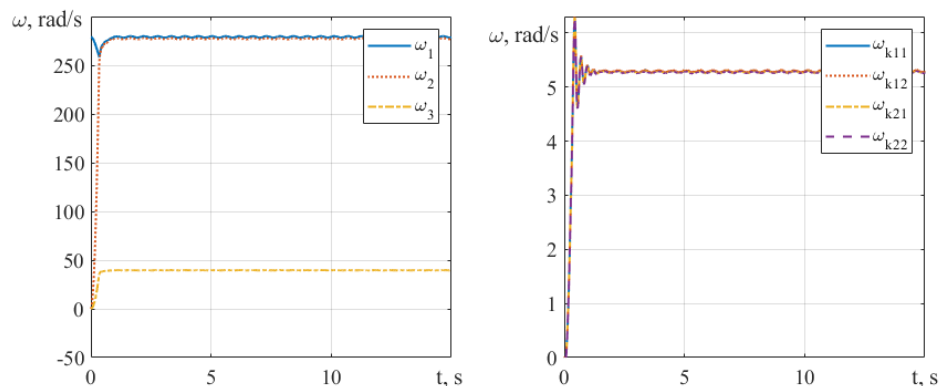


Рис. 3. Залежності швидкостей обертання елементів трансмісії та коліс повнопривідного колісного трактора від часу

Кутові швидкості ω_1, ω_2 та ω_3 мають виражений перехідний процес на початковому етапі ($t < 1$ с) (рис. 3). Після короткочасного перехідного процесу система виходить на усталений режим роботи при $\omega_1 \approx 275$ рад/с, $\omega_2 \approx 275$ рад/с та $\omega_3 \approx 40$ рад/с. Кутові швидкості коліс трактора $\omega_{k11}, \omega_{k12}, \omega_{k21}, \omega_{k22}$, також демонструють короткий коливальний перехідний процес. Усталене значення швидкості становить приблизно $\omega_k \approx 5,3$ рад/с.

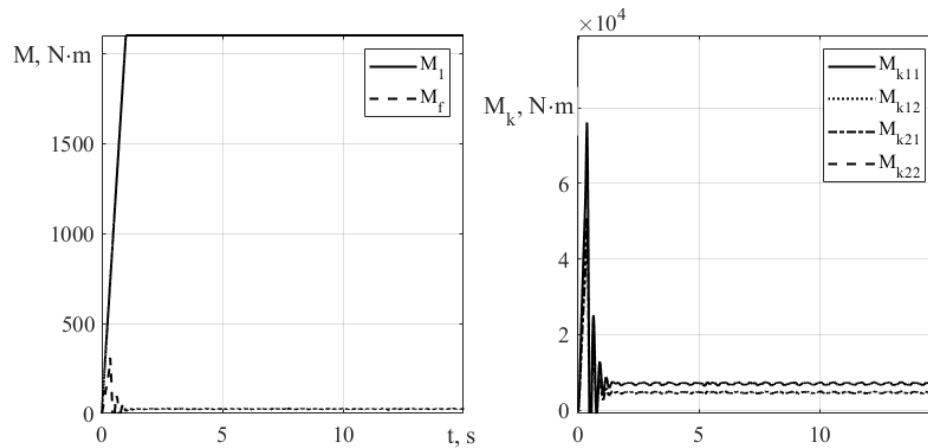


Рис. 4. Залежності моментів, що діють на елементи трансмісії та крутні моменти коліс повнопривідного колісного трактора від часу

Визначено, ефективний крутний момент ДВЗ – M_1 та крутні моменти на колесах трактора M_{k11} , M_{k12} , M_{k21} , M_{k22} . Момент M_1 швидко зростає на початку процесу та досягає сталого значення приблизно 1900–2000 Н·м. Час встановлення становить менше 1 с. (рис. 4). На початку процесу спостерігаються значні пікові значення моментів M_{k11} , M_{k12} , M_{k21} , M_{k22} до $7 \cdot 10^4$ Н·м. Ці піки мають короткочасний характер (менше 1 с). Після завершення перехідного процесу крутні моменти коліс трактора стабілізуються на рівні $M_{k11} \approx M_{k12} \approx 1,8 \cdot 10^4$ Н·м та $M_{k21} \approx M_{k22} \approx 1,1 \cdot 10^4$ Н·м.

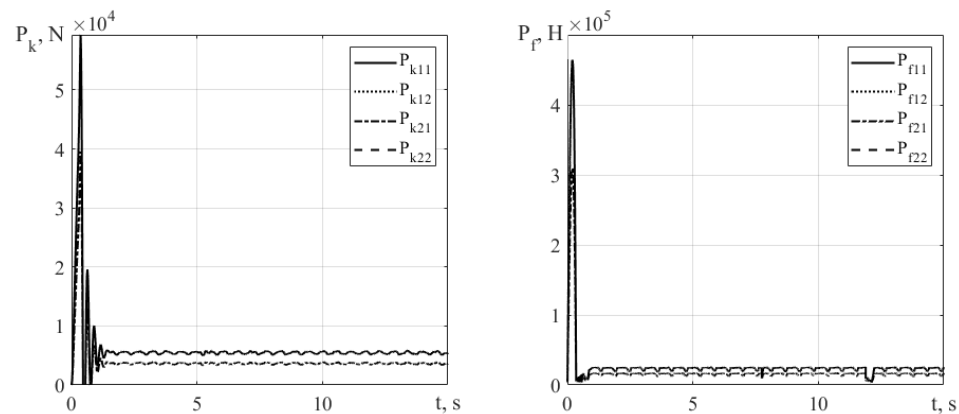


Рис. 5. Залежності дотичних сил тяги та опору руху коліс повнопривідного колісного трактора від часу

У початковий момент часу спостерігається короткочасний різкий імпульс (пікове значення) дотичних сил тяги та опору руху коліс повнопривідного колісного трактора, після чого всі криві швидко затухають (на рівні $P_{k11} \approx P_{k12} \approx 0,73 \cdot 10^4$ та $P_{k21} \approx P_{k22} \approx 0,45 \cdot 10^4$) (рис. 5).

3 Обговорення отриманих результатів

Встановлено, що дослідження динаміки трансмісії колісного трактора, що працює у складі ґрунтообробного агрегату, є ключовим для підвищення ефективності, надійності та довговічності сільськогосподарської техніки. Це комплексне завдання, яке охоплює аналіз взаємодії трактора з ґрунтом, динамічних навантажень на трансмісію, а також оптимізацію систем перемикавання передач та управління. Розробка оптимальних режимів перемикавання передач є фундаментальною для всіх типів трансмісій. Ці залежності повинні враховувати швидкість трактора, навантаження на двигун, умови ґрунту та

бажану продуктивність. Визначено, що комплексний підхід до дослідження динаміки трансмісії, що включає аналіз взаємодії з ґрунтом, оптимізацію стратегій перемикання передач для різних типів трансмісій, а також моніторинг та оцінку терміну служби компонентів, є необхідним для підвищення ефективності та стійкості сільськогосподарських операцій. Розроблена математичну модель динаміки повнопривідного колісного трактора, що працює у складі ґрунтообробного агрегату та досліджено на прикладі колісного трактора ХТЗ-17021 та культиватора КПС-4,2. Математичну модель (1)–(13) зручно застосовувати для оцінки динаміки як агрегату в цілому так і окремих елементів трансмісії трактора.

Висновки

Встановлено, що дослідження динаміки трансмісії колісного трактора, що працює у складі ґрунтообробного агрегату, є ключовим для підвищення ефективності, надійності та довговічності сільськогосподарської техніки. Це комплексне завдання, яке охоплює аналіз взаємодії трактора з ґрунтом, динамічних навантажень на трансмісію, а також оптимізацію систем перемикання передач та управління. Розроблена математичну модель динаміки повнопривідного колісного трактора, що працює у складі ґрунтообробного агрегату та досліджено на прикладі колісного трактора ХТЗ-17021 та культиватора КПС-4,2.

Визначено кутові швидкості ω_1 , ω_2 та ω_3 мають виражений перехідний процес на початковому етапі ($t < 1$ с). Після короткочасного перехідного процесу система виходить на усталений режим роботи при $\omega_1 \approx 275$ рад/с, $\omega_2 \approx 275$ рад/с та $\omega_3 \approx 40$ рад/с. Кутові швидкості коліс трактора ω_{k11} , ω_{k12} , ω_{k21} , ω_{k22} , також демонструють короткий коливальний перехідний процес. Усталене значення швидкості становить приблизно $\omega_k \approx 5,3$ рад/с. Визначено, ефективний крутний момент ДВЗ – M_1 та крутні моменти на колесах трактора M_{k11} , M_{k12} , M_{k21} , M_{k22} . Момент M_1 швидко зростає на початку процесу та досягає сталого значення приблизно 1900–2000 Н·м. Час встановлення становить менше 1 с. (рис. 4). На початку процесу спостерігаються значні пікові значення моментів M_{k11} , M_{k12} , M_{k21} , M_{k22} до $7 \cdot 10^4$ Н·м. Ці піки мають короткочасний характер (менше 1 с). Після завершення перехідного процесу крутні моменти коліс трактора стабілізуються на рівні $M_{k11} \approx M_{k12} \approx 1,8 \cdot 10^4$ Н·м та $M_{k21} \approx M_{k22} \approx 1,1 \cdot 10^4$ Н·м. У початковий момент часу спостерігається короткочасний різкий імпульс (пікове значення) дотичних сил тяги та опору руху коліс повнопривідного колісного трактора, після чого всі криві швидко затухають (на рівні $P_{k11} \approx P_{k12} \approx 0,73 \cdot 10^4$ та $P_{k21} \approx P_{k22} \approx 0,45 \cdot 10^4$).

Список використаних джерел

1. Wen C.K., Ren W., Zhu Q.Z., Zhao C.J., Luo Z.H., Zhang S.L., et al. Reducing Operation Emissions and Improving Work Efficiency Using a Pure Electric Wheel Drive Tractor. *Engineering*, 2024. Jun, 37. PP. 230–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2024.01.026>.
2. Jeon H.H., Baek S.Y., Baek S.M., Choi J.Y., Kim Y.S., Kim W.S., et al. Efficiency Analysis of Powertrain for Internal Combustion Engine and Hydrogen Fuel Cell Tractor According to Agricultural Operations. *Sensors*, 2024 Aug 24. Vol. 24(17). P. 5494. <http://dx.doi.org/10.3390/s24175494>.
3. Yan J., Kong Z., Liu Y., Li N., Yang X., Zhuang M. A high-resolution energy use efficiency assessment of China's staple food crop production and associated improvement potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023.
4. Zheng L. Optimization of Agricultural Machinery Task Scheduling Algorithm Based on Multiobjective Optimization. Zhang W, editor. *Journal of Sensors*, 2022. Vol. 7(2022). PP. 1–12. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/5800332>.
5. Li B., Pan J., Li Y., Ni K., Huang W., Jiang H., et al. Optimization Method of Speed

Ratio for Power-Shift Transmission of Agricultural Tractor. *Machines*, 2023. Vol. 29. 11(4). P. 438. <http://dx.doi.org/10.3390/machines11040438>.

6. Askari M, Abbaspour-Gilandeh Y, Taghinezhad E, Hegazy R, Okasha M. Prediction and optimizing the multiple responses of the overall energy efficiency (OEE) of a tractor-implement system using response surface methodology. *Journal of Terramechanics* [Internet]. 2022 Oct;103:11–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2022.06.003>

7. Al-Dosary N.M.N., Alnajjar F.M., Aboukarima A.E.W.M. Estimation of wheel slip in 2WD mode for an agricultural tractor during plowing operation using an artificial neural network. *Sci Rep*, 2023. Vol. 13(1). <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-32994-7>.

8. Zhu Z., Sheng J., Zhang H., Wang D., Chen L. Optimization and Analysis of Clutch Switching Timing for Hybrid Tractors Equipped with Hydraulic Mechanical Combined Transmission. *Applied Sciences*, 2024. Vol. 14(11). P. 4914. <http://dx.doi.org/10.3390/app14114914>.

9. Mahore V., Soni P., Paul A., Patidar P., Machavaram R. Machine learning-based draft prediction for mouldboard ploughing in sandy clay loam soil. *Journal of Terramechanics*, 2024. Vol. 111. PP. 31–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2023.09.002>.

10. Cheng J., Zheng K., Xia J., Liu G., Jiang L., Li D. Analysis of Adhesion between Wet Clay Soil and Rotary Tillage Part in Paddy Field Based on Discrete Element Method. *Processes*, 2021. Vol. 9(5). P. 845. <http://dx.doi.org/10.3390/pr9050845>.

11. Zhai S., Shi Y., Zhou J., Liu J., Huang D., Zou A., et al. Simulation Optimization and Experimental Study of the Working Performance of a Vertical Rotary Tiller Based on the Discrete Element Method. *Actuators*, 2022. Vol. 11(12). P. 342. <http://dx.doi.org/10.3390/act11120342>.

12. Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Viktor Antoshchenkov, Anton Nykyforov, Liliia Kis-Korkishchenko, Halyna Cherevatenko, Dmytro Smitskov. Measuring system of dynamics and energy of mobile machines: monograph. Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2024. 150 p.

13. Антощенко Р. В., Галич І. В., Череватенко Г. І. Динаміка та енергетика руху машинно-тракторного агрегату з урахуванням профілю опорної поверхні: монографія. Харків: ДБТУ, 2024. 100 с.

14. Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Anton Nikiforov, Halyna Cherevatenko, Serhii Sheptun. Study of inter-wheel differential influence on dynamics of traction and transport machine. *Engineering for Rural Development*, 2025, 24. 234–241. DOI: 10.22616/ERDev.2025.24.TF046.

15. Volodymyr Bulgakov, Adolfs Rucins, Lucretia Popa, Roman Antoshchenkov, Mykyta Kuskov, Mariia Ruzhylo, Mykhailo Chernovol, Ivan Holovach, Oleksandra Trokhaniak. Experimental and theoretical study on straightness improvement in agricultural machinery movement. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 2025. Vol. 76. No. 2. PP. 1268–1278. DOI: 10.35633/inmateh-76-106.

16. Антощенко Р. В., Череватенко Г. І., Антощенко В. М., Скляр О. Г., Скляр Р. В. Дослідження впливу між колісного диференціалу на динамічні та тягово-енергетичні показники повнопривідного чотирьох колісного трактора. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 2025. Том 10. № 2. С. 295–299. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-2-62>.

17. Antoshchenkov, R., Bogdanovich, S., Halych, I., Cherevatenko, H. Determination of dynamic and traction-energy indicators of all-wheel-drive traction-transport machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. 1 (7 (121)), 40–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.270988>.

18. R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkova, V. Kis, D. Smitskov. Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units. *Engineering for Rural Development*,

2023, 22. pp. 210–215. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF040>.

19. Антощенко Р. В., Череватенко Г. І., Задорожний В. П., Світличний О. В., Кусков М. А. Дослідження динаміки повнопривідної тягово-транспортної машини. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 2023. Т. 8. № 4. С. 336 – 341.

References

1. Wen C.K., Ren W., Zhu Q.Z., Zhao C.J., Luo Z.H., Zhang S.L., et al. Reducing Operation Emissions and Improving Work Efficiency Using a Pure Electric Wheel Drive Tractor. *Engineering*, 2024. Jun, 37. PP. 230–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2024.01.026>.
2. Jeon H.H., Baek S.Y., Baek S.M., Choi J.Y., Kim Y.S., Kim W.S., et al. Efficiency Analysis of Powertrain for Internal Combustion Engine and Hydrogen Fuel Cell Tractor According to Agricultural Operations. *Sensors*, 2024 Aug 24. Vol. 24(17). P. 5494. <http://dx.doi.org/10.3390/s24175494>.
3. Yan J., Kong Z., Liu Y., Li N., Yang X., Zhuang M. A high-resolution energy use efficiency assessment of China's staple food crop production and associated improvement potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023.
4. Zheng L. Optimization of Agricultural Machinery Task Scheduling Algorithm Based on Multiobjective Optimization. Zhang W, editor. *Journal of Sensors*, 2022. Vol. 7(2022). PP. 1–12. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/5800332>.
5. Li B., Pan J., Li Y., Ni K., Huang W., Jiang H., et al. Optimization Method of Speed Ratio for Power-Shift Transmission of Agricultural Tractor. *Machines*, 2023. Vol. 29. 11(4). P. 438. <http://dx.doi.org/10.3390/machines11040438>.
6. Askari M., Abbaspour-Gilandeh Y., Taghinezhad E., Hegazy R., Okasha M. Prediction and optimizing the multiple responses of the overall energy efficiency (OEE) of a tractor-implement system using response surface methodology. *Journal of Terramechanics* [Internet]. 2022 Oct;103:11–7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2022.06.003>
7. Al-Dosary N.M.N., Alnajjar F.M., Aboukarima A.E.W.M. Estimation of wheel slip in 2WD mode for an agricultural tractor during plowing operation using an artificial neural network. *Sci Rep*, 2023. Vol. 13(1). <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-32994-7>.
8. Zhu Z., Sheng J., Zhang H., Wang D., Chen L. Optimization and Analysis of Clutch Switching Timing for Hybrid Tractors Equipped with Hydraulic Mechanical Combined Transmission. *Applied Sciences*, 2024. Vol. 14(11). P. 4914. <http://dx.doi.org/10.3390/app14114914>.
9. Mahore V., Soni P., Paul A., Patidar P., Machavaram R. Machine learning-based draft prediction for mouldboard ploughing in sandy clay loam soil. *Journal of Terramechanics*, 2024. Vol. 111. PP. 31–40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2023.09.002>.
10. Cheng J., Zheng K., Xia J., Liu G., Jiang L., Li D. Analysis of Adhesion between Wet Clay Soil and Rotary Tillage Part in Paddy Field Based on Discrete Element Method. *Processes*, 2021. Vol. 9(5). P. 845. <http://dx.doi.org/10.3390/pr9050845>.
11. Zhai S., Shi Y., Zhou J., Liu J., Huang D., Zou A., et al. Simulation Optimization and Experimental Study of the Working Performance of a Vertical Rotary Tiller Based on the Discrete Element Method. *Actuators*, 2022. Vol. 11(12). P. 342. <http://dx.doi.org/10.3390/act11120342>.
12. Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Viktor Antoshchenkov, Anton Nykyforov, Liliia Kis-Korkishchenko, Halyna Cherevatenko, Dmytro Smitskov. Measuring system of dynamics and energy of mobile machines: monograph. Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2024. 150 p.
13. Antoshchenkov R. V., Galich I. V., Cherevatenko G. I. Dynamics and energetics of the movement of a machine-tractor unit taking into account the profile of the supporting surface: monograph. Kharkiv: DBTU, 2024. 100 p.

14. Roman Antoshchenkov, Ivan Halych, Anton Nikiforov, Halyna Cherevatenko, Serhii Sheptun. Study of inter-wheel differential influence on dynamics of traction and transport machine. *Engineering for Rural Development*, 2025, 24. 234–241. DOI: 10.22616/ERDev.2025.24.TF046.

15. Volodymyr Bulgakov, Adolfs Rucins, Lucretia Popa, Roman Antoshchenkov, Mykyta Kuskov, Mariia Ruzhylo, Mykhailo Chernovol, Ivan Holovach, Oleksandra Trokhaniak. Experimental and theoretical study on straightness improvement in agricultural machinery movement. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 2025. Vol. 76. No. 2. PP. 1268–1278. DOI: 10.35633/inmateh-76-106.

16. Antoshchenkov R. V., Cherevatenko G. I., Antoshchenkov V. M., Sklyar O. G., Sklyar R. V. Research into the influence of the inter-wheel differential on the dynamic and traction-energy indicators of an all-wheel drive four-wheel tractor. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*, 2025. Vol. 10. No. 2. P. 295–299. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-2-62>.

17. Antoshchenkov, R., Bogdanovich, S., Halych, I., Cherevatenko, H. Determination of dynamic and traction-energy indicators of all-wheel-drive traction-transport machine. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. 1 (7 (121)), 40–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.270988>.

18. R. Antoshchenkov, V. Antoshchenkova, V. Kis, D. Smitskov. Increasing accuracy of measuring functioning parameters of agricultural units. *Engineering for Rural Development*, 2023, 22. pp. 210–215. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2023.22.TF040>.

19. Antoshchenkov R. V., Cherevatenko G. I., Zadorozhnyi V. P., Svitlychnyi O. V., Kuskov M. A. Research on the dynamics of an all-wheel drive traction and transport vehicle. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*, 2023. Vol. 8. No. 4. P. 336 – 341.

Отримано: 08.04.2026. Прийнято: 20.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Гончаренко О. О. ORCID iD: 0000-0002-4325-2705 Зачепило С. В. ORCID iD: 0009-0007-6075-5324 Сівцов Ю. В. ORCID: 0009-0008-6497-955X Лютий Т. Г. ORCID iD: 0009-0005-2257-2995 Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна	ЗАСТОСУВАННЯ GPS-МОНІТОРИНГУ ТА ІoT-СЕНСОРІВ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЮ ТЕХНІКОЮ
--	---

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.109>

УДК 631.3:004.67:004.738.5

Гончаренко О. О., Зачепило С. В., Сівцов Ю. В., Лютий Т. Г. Застосування GPS-моніторингу та ІoT-сенсорів у системах управління сільськогосподарською технікою

Анотація. У статті досліджено сучасні підходи до застосування GPS-моніторингу та ІoT-сенсорів у системах управління сільськогосподарською технікою. Проаналізовано принципи функціонування глобальних навігаційних систем, сенсорних мереж та хмарних платформ у контексті точного землеробства. Розглянуто архітектуру інтегрованих систем моніторингу техніки, включаючи передачу даних, обробку та прийняття управлінських рішень. Наведено результати аналізу ефективності впровадження GPS/IoT-рішень у вигляді таблиць і графіків. Встановлено, що використання таких технологій дозволяє підвищити продуктивність техніки, зменшити витрати палива та оптимізувати агротехнологічні операції.

Ключові слова: GPS-моніторинг, ІoT, точне землеробство, агротехніка, телематика, автоматизація сільськогосподарського виробництва, агротехнологічні показники.

Honcharenko O. O., Zachepyllo S. V., Sivtsov Y. V., Liutyi T. G. Application of GPS monitoring and IoT sensors in agricultural machinery control systems

Abstract. This paper investigates modern approaches to the application of GPS monitoring and IoT sensors in agricultural machinery management systems. The principles of operation of global navigation systems, sensor networks, and cloud platforms in the context of precision agriculture are analyzed. The architecture of integrated machinery monitoring systems is described, including data transmission, processing, and decision-making processes. The effectiveness of implementing GPS/IoT solutions is presented through tables and graphs. The study shows that these technologies improve machinery productivity, reduce fuel consumption, and optimize agricultural operations.

Keywords: GPS monitoring, IoT, precision agriculture, agricultural machinery, telematics, automation of agricultural production, agro-technological indicators.

Вступ. Сільське господарство сьогодні вже не можна розглядати як галузь, що базується виключно на традиційних підходах. Зростання вартості ресурсів, нестабільність кліматичних умов і конкуренція змушують агровиробників шукати більш точні та керовані способи ведення діяльності.

У цьому контексті особливого значення набуває концепція точного землеробства, яка передбачає використання цифрових технологій для прийняття рішень. На практиці це означає перехід від усереднених підходів до управління до більш деталізованого, локалізованого аналізу [2, 3].

Одними з ключових інструментів такого переходу є Global Positioning System (GPS)-моніторинг та технології Інтернету речей. Якщо GPS забезпечує точне позиціонування техніки та контроль її переміщення, то IoT-сенсори дають змогу аналізувати технічний і виробничий процес значно глибше – аж до рівня окремих параметрів роботи вузлів або стану ґрунту [3, 6].

Інтеграція GPS-моніторингу та IoT-сенсорів у єдину інформаційну систему створює основу для побудови інтелектуальних систем управління сільськогосподарською технікою. Такі системи дозволяють не лише здійснювати моніторинг, але й реалізовувати функції прогнозування, автоматизації та підтримки прийняття рішень на основі аналізу великих масивів даних (Big Data). Це, у свою чергу, відкриває нові можливості для підвищення ефективності аграрного виробництва, зниження ризиків та забезпечення сталого розвитку галузі.

Важливо відзначити, що ефект від цих технологій проявляється не окремо, а саме при їх поєднанні [1, 9].

Мета дослідження – підвищення ефективності, точності та рівня автоматизації виробничих процесів у сільському господарстві шляхом визначення впливу інтеграції технологій GPS-моніторингу та IoT-сенсорів у єдину інформаційну систему управління сільськогосподарською технікою в умовах впровадження концепції точного землеробства.

Матеріали і методи досліджень. У наукових і прикладних дослідженнях останніх років інтеграція IoT у аграрний сектор розглядається як один із ключових факторів підвищення ефективності. Водночас варто зазначити, що результати впровадження суттєво залежать від умов експлуатації та рівня технічної готовності господарства.

Цифровізація аграрного сектору сьогодні стає не просто напрямом розвитку, а необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності виробництва. Перехід до технологій точного землеробства передбачає широке використання систем навігації та сенсорного моніторингу, зокрема GPS і IoT-рішень, які дозволяють отримувати детальну інформацію про роботу техніки та стан виробничого середовища.

Попри значний потенціал цих технологій, їх практичне впровадження не є повністю безпроблемним. На рівні господарств часто виникають труднощі із поєднанням різних типів обладнання та програмних платформ у єдину систему, що знижує ефективність використання зібраних даних. Окремим викликом залишається забезпечення стабільності та точності навігаційної інформації, оскільки навіть незначні похибки можуть призводити до перевитрат ресурсів або зниження якості виконання польових робіт.

З огляду на зростання вартості ресурсів і необхідність підвищення продуктивності аграрного виробництва, дослідження можливостей більш ефективного поєднання GPS-моніторингу та IoT-сенсорів набуває особливої ваги. Визначення їх реального впливу на точність, керованість і автоматизацію виробничих процесів є важливим кроком до створення сучасних систем управління сільськогосподарською технікою [4, 5].

Найчастіше виділяють три базові переваги IoT:

- можливість постійного моніторингу техніки та середовища;
- часткову або повну автоматизацію операцій;
- покращення управління на основі даних, а не інтуїції [3, 10].

Проте в реальних умовах ці переваги не завжди реалізуються повною мірою. Наприклад, якість даних може залежати від стабільності зв'язку або правильності налаштування сенсорів.

Що стосується GPS-навігації, то її роль уже давно вийшла за межі простого відстеження координат. Сьогодні це інструмент, який безпосередньо впливає на якість виконання польових робіт.

Зокрема, GPS використовується для автоматичного ведення техніки по заданій траєкторії, створення карт врожайності, оптимізації логістики в межах поля.

Метод картографування врожайності заслуговує окремої уваги. Його суть полягає не просто у зборі даних, а у їх прив'язці до конкретних координат. Це дозволяє виявити неоднорідність поля, яку складно оцінити візуально.

На практиці такі карти часто стають основою для подальших рішень – наприклад, диференційованого внесення добрив. Саме тут поєднання GPS і сенсорів дає найбільший ефект.

Розглянемо архітектуру та функціональні можливості використання GPS та IoT.

Типова система не є складною з точки зору структури, але її ефективність залежить від узгодженості компонентів.

Зазвичай можна виділити такі елементи:

- модуль позиціонування (GPS/GNSS);
- набір сенсорів;
- канал передачі даних;
- сервер або хмарна платформа;
- інтерфейс користувача [1, 3, 9].

На практиці найбільші проблеми виникають не на рівні сенсорів, а на етапі передачі та обробки даних. Наприклад, у польових умовах покриття мережі може бути нестабільним, що впливає на повноту інформації.

Системи супутникового позиціонування на базі Global Positioning System (GPS) та інших глобальних супутникових геодезичних систем (ГНСС) забезпечують визначення координат техніки з точністю від 2 до 5 м, а при використанні Real-Time Kinematic (RTK)-корекції – від 2 до 3 см [1]. Це створює основу для реалізації концепції точного землеробства.

Однак координатна інформація без телеметричних показників не дозволяє оцінити реальний технічний стан агрегатів. Саме тому інтеграція IoT-сенсорів формує багатовимірну модель функціонування машино-тракторного парку [2].

IoT-сенсори забезпечують збір таких груп параметрів:

- енергетичні показники: миттєва та середня витрата пального, рівень у баку, коефіцієнт завантаження двигуна;
- технічні показники: температура охолоджувальної рідини та мастила силового агрегату, тиск у гідросистемі;
- експлуатаційні параметри: оберти ВВП, навантаження на робочі органи, вібрації, пробуксовування;
- агротехнологічні показники: глибина обробітку, норма висіву, норма внесення добрив та ін.

Поєднання просторових (GPS) та технічних (IoT) даних дозволяє перейти від пасивного моніторингу до предиктивного управління та оптимізації технологічних процесів [3].

У рамках експериментального моделювання було проаналізовано роботу 10 одиниць сільськогосподарської техніки протягом 120 календарних днів (весняно-польовий цикл). До вибірки увійшли трактори класу 180–300 к.с., обладнані системами супутникового позиціонування на базі Global Positioning System та телематичними IoT-модулями.

Для забезпечення статистичної достовірності використовувалися метод порівняння середніх значень (до/після впровадження), коефіцієнт варіації, оцінка

відносної економії (у відсотковому відношенні) та кореляційний аналіз між швидкісним режимом і витратами пального.

Базові показники фіксувалися протягом 60 днів до впровадження системи, а контрольні – протягом наступних 60 днів після інтеграції GPS + IoT.

Цікаво, що найбільший ефект спостерігався не одразу, а після періоду адаптації персоналу до системи. Одним з головних чинників що впливають на економічний ефект, виявилось зниження витрат пального, і в середньому становить від 14 до 16%. При цьому дисперсія показників між різними одиницями техніки складала 2,8%, що свідчить про стабільність ефекту.

Основні фактори економії:

- ліквідація несанкціонованих зливів: датчики рівня палива з точністю $\pm 1\%$ дозволили виявляти різкі стрибки зміни об'єму пального;
- оптимізація маршрутів: зменшення непродуктивного пробігу на 8-12%;
- контроль холостого ходу: частка роботи на холостому ходу зменшилась із 18% до 9%;
- стабілізація швидкісного режиму: кореляційний аналіз ($r = 0,62$) показав прямий зв'язок між нерівномірністю швидкості та перевитратою пального.

Економічний ефект визначався за формулою:

$$E_f = (F_0 - F_1)C, \quad (1)$$

де F_0 – середні витрати пального до впровадження, л,
 F_1 – середні витрати пального після впровадження, л,
 C – середня вартість 1 л пального [4, 6].

Для додаткової оцінки ефективності проведено розрахунки показників відносної економії пального [11]:

$$\eta = \frac{F_0 - F_1}{F_0} * 100\% \quad (2)$$

Результати розрахунків (табл. 1, рис. 1) свідчать про зменшення витрат пального при виконання польових операцій.

Таблиця 1

Динаміка витрат пального			
Показник	До впровадження	Після впровадження	Економія, %
Середньодобові витрати, л	210	178	15,2
Частка холостого ходу, %	18	9	50
Непродуктивний пробіг, %	100	91	9

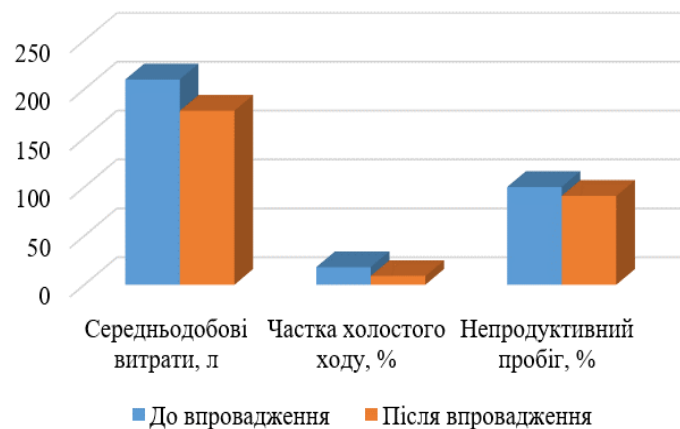


Рис. 1. Динаміка витрат пального при виконанні польових операцій

Також одним із ключових джерел прихованих втрат ресурсів у сільському господарстві є перекриття при посіві та внесенні добрив. Надмірне перекриття призводить до перевитрат насіння, добрив та пального, а також може спричиняти локальне перенасичення ґрунту поживними речовинами, що негативно впливає на екологічний стан агроєкосистеми.

До впровадження інтегрованих систем GPS-моніторингу та IoT-сенсорів середній коефіцієнт перекриття становив 12-15% площі поля. Це значення відповідає типовим показникам для механізованого землеробства без систем точного водіння [3].

Сучасні системи точного землеробства включають два ключових механізми для контролю перекриття посівних площ:

1. Паралельне водіння (Guidance Systems) – технологія, що дозволяє трактору або обприскувачу рухатися по точному маршруту, мінімізуючи перекриття смуг обробки. Використовуються сигнали DGPS або RTK-GPS, що забезпечують точність позиціонування до 2–3 см.

2. Автоматичне відключення секцій (Section Control) – система, яка автоматично відключає окремі секції агрегату (наприклад, штанги обприскувача або секції сіялки) при повторному проході через ту саму ділянку. Це дозволяє уникнути подвійного внесення, добрив, або гербіцидів на одні й ті ж ділянки.

Застосування цих технологій дозволяє зменшити коефіцієнт перекриття до 3-5%, що у середньому знижує перевитрати насіння до 89% та добрив до 90-92% від початкового рівня.

Коефіцієнт перекриття обчислюється за формулою:

$$K_p = \frac{S_{\text{повт}}}{S_{\text{заг}}} * 100\%, \quad (3)$$

де $S_{\text{повт}}$ – площа повторної обробки (м²), (ділянки, оброблені більше одного разу);
 $S_{\text{заг}}$ – загальна площа поля (м²);
 K_p – коефіцієнт перекриття (%).

Ця формула дозволяє кількісно оцінити ефективність застосованих технологій точного водіння та визначити економічний ефект від зменшення перекриття [6]. Дані розрахунків зведені в табл.2. та рис.2.

Таблиця 2

Вплив систем GPS та IoT на перекриття обробки

Показник	До впровадження, %	Після впровадження, %
Перекриття площі	13	4
Перевитрати насіння	100	89
Перевитрати добрив	100	91

Польові випробування свідчать про те, що навіть невелике зниження перекриття (на 1-2%) дозволяє суттєво підвищити економію ресурсів на великих площах.

Зменшення перекриття має позитивний вплив не лише на економіку виробництва, а й на екологічні показники такі, як:

- зниження локального перенасичення ґрунту поживними речовинами;
- зменшення ризику забруднення підземних вод нітратами;
- підвищення рівномірності росту рослин;
- оптимізація використання пального та зниження викидів CO₂ через меншу кількість проходів техніки.



Рис. 2. Вплив системи GPS та IoT при проведенні польових робіт на можливість покриття площ

Таким чином, впровадження інтегрованих GPS- та IoT-систем сприяє формуванню економічно та екологічно збалансованого виробництва [3,4].

Ще однією з основних причин зниження ефективності виробництва є простой сільськогосподарської техніки. Для проведення поглибленого аналізу вони були класифіковані за трьома основними групами:

1. Технічні простой – пов'язані з поломками агрегатів, зносом деталей або несправністю двигунів та робочих органів техніки.
2. Організаційні простой – виникають через очікування завдань, координацію робіт, затримки в плануванні та управлінні логістикою.
3. Технологічні простой – обумовлені порушенням оптимальних режимів роботи техніки, несвоєчасним внесенням добрив або насіння, порушенням швидкісного режиму та інших технологічних параметрів.

Після впровадження інтегрованих систем GPS-моніторингу та IoT-сенсорів спостерігалось значне зниження рівня простой. Технічні простой зменшились на 23%, завдяки використанню систем раннього попередження про перегрів двигуна, перевантаження секцій або відхилення параметрів агрегатів. Це дозволяє проводити предиктивне обслуговування, що відповідає сучасним концепціям Smart Farming, зменшуючи непередбачувані поломки [4]. Організаційні простой скоротились на 18%, оскільки GPS-моніторинг забезпечує реальне відстеження розташування техніки та оптимізацію маршрутів. Інформаційні панелі для диспетчерів та автоматизоване планування дозволяють більш ефективно розподіляти завдання. Загальний рівень простой знизився приблизно на 20% (рис. 3), що демонструє комплексний ефект інтегрованих систем у зменшенні втрат часу та підвищенні продуктивності.



Рис. 3. Діаграма загального рівня простой техніки до та після впровадження технологій

Ці дані демонструють, що переважна частина зниження простоїв припадає на технічні та організаційні фактори, які піддаються цифровій автоматизації та контролю в реальному часі.

Дослідження демонструють, що максимальна ефективність інтегрованих GPS- та IoT-систем досягається після періоду адаптації персоналу, що триває в середньому від 1 до 1,5 місяця. Це пов'язано з тим, що сучасні системи точного землеробства оснащені складними графічними інтерфейсами, що відображають поточне положення техніки на полі в реальному часі, стан кожного робочого агрегату та секції, показники сенсорів (температура двигуна, вологість ґрунту, витрата пального, тиск у робочих механізмах) [9, 10].

Для ефективного використання цих даних персонал повинен не лише знати призначення кожного індикатора, а й уміти швидко інтерпретувати показники, щоб приймати правильні рішення у режимі реального часу. Освоєння цих інтерфейсів вимагає часу на практичні тренування, тестування та відпрацювання алгоритмів реагування на попереджувальні сигнали.

Наприклад, система Section Control автоматично вимикає секції агрегатів для уникнення повторної обробки ділянок. Для оптимальної роботи цієї функції оператори повинні знати, які події та параметри активують автоматичне відключення, розуміти, як зміни налаштувань впливають на точність посіву або внесення добрив, контролювати індикатори стану техніки для своєчасного втручання у випадку помилок або неточностей.

Без достатньої підготовки персоналу автоматичні алгоритми можуть працювати неефективно, що знижує очікуваний економічний ефект та підвищує ризик перевитрат ресурсів.

Цифровізація виробничих процесів змінює традиційні схеми планування та координації:

- диспетчери повинні вчасно реагувати на інформацію від сенсорів та GPS-трекерів;
- оператори техніки мають синхронізувати свої дії з диспетчерським плануванням і алгоритмами Section Control;
- процеси логістики та розподілу завдань на полі потребують нових процедур для інтеграції даних у реальному часі.

Період адаптації дозволяє персоналу виробити стандартизовані дії, які мінімізують ризик людських помилок та забезпечують стійку ефективність системи.

Цей аспект підкреслює важливість людського фактору у цифровізації аграрного сектору. Навіть найсучасніші технології потребують кваліфікованого персоналу, який здатний їх ефективно використовувати [7].

Таким чином, ефективність цифровізації залежить не лише від технічних характеристик систем, але й від ступеня інтеграції технологій із робочими практиками персоналу [5].

Впровадження інтегрованих систем GPS-моніторингу та IoT-сенсорів у сільськогосподарське виробництво забезпечує значні переваги, проте супроводжується низкою системних викликів і обмежень, які можуть впливати на ефективність та економічну доцільність таких рішень.

Передача телеметричних даних від IoT-сенсорів і GPS-пристроїв зазвичай здійснюється через відкриті канали зв'язку (GSM, LTE, Wi-Fi, LPWAN). Це створює потенційні ризики, такі як несанкціонований доступ до даних техніки або координат полів, підміна або спотворення даних, що може призвести до неправильного управління агрегатами, кіберзагрози для хмарних платформ, на яких здійснюється обробка та зберігання даних.

Для мінімізації ризиків необхідне багаторівневе шифрування інформації, впровадження протоколів автентифікації, а також регулярне оновлення програмного забезпечення IoT-пристроїв. Додатково доцільне використання VPN-тунелів та локальних серверів для первинної обробки даних, що зменшує навантаження на відкриті мережі [8].

Одним із вагомих викликів є відсутність єдиного стандарту обміну даними серед виробників агротехніки та IoT-пристроїв. Кожен виробник часто використовує власний формат, що, в свою чергу, викликає складність інтеграції обладнання різних брендів, додаткові витрати на розробку конверторів даних та затримки в реальному часі.

Крім того, передача даних у режимі реального часу значною мірою залежить від якості мобільного зв'язку або інших каналів (LPWAN, супутниковий інтернет). У віддалених або гірських районах можуть спостерігатися обмежена швидкість передачі, втрата сигналу, затримки у прийнятті критично важливих даних для управління технікою [1, 2].

Ці обмеження можуть знижувати ефективність автоматичного водіння та секційного управління агрегатами. Рішення включають використання локальних буферів даних на техніці, супутникові канали передачі або резервні маршрути зв'язку для забезпечення безперервного моніторингу.

При початковій спробі використання GPS + IoT систем може виникнути інвестиційний бар'єр: первинні витрати на їх впровадження можуть становити 600-1500 доларів США на одиницю техніки, включаючи встановлення GPS-приймачів, придбання IoT-сенсорів та контролерів, програмне забезпечення для аналітики та моніторингу.

Це створює значний фінансовий бар'єр для дрібних і середніх господарств та впливає на термін окупності інвестицій. Крім того, вартість обслуговування та навчання персоналу додає додаткові витрати, що треба враховувати при плануванні бюджету.

Для зменшення фінансового навантаження на підприємство має сенс використовувати:

- модульний підхід, коли обладнання встановлюється на частину парку техніки;
- поетапне впровадження, що дозволяє оцінити ефективність перед масштабною інвестицією;
- державні або кредитні програми підтримки цифровізації сільського господарства.

Висновки

Інтеграція GPS-моніторингу та IoT-сенсорів у системи управління сільськогосподарською технікою забезпечує комплексне підвищення ефективності агропромислового виробництва. Вона дозволяє суттєво підвищити продуктивність агрегатів, знизити витрати пального, насіння та добрив, а також оптимізувати агротехнологічні операції за рахунок точного контролю параметрів роботи техніки та умов експлуатації. Зменшення перекриття обробки до 3-5% і скорочення простоїв на 20% демонструють як економічний, так і екологічний ефект впровадження інтегрованих систем, що включають паралельне водіння та автоматичне відключення секцій агрегатів.

Проведене дослідження підтверджує, що інтеграція технологій GPS-моніторингу та IoT-сенсорів у системи управління сільськогосподарською технікою є ефективним інструментом підвищення результативності агровиробництва. На основі експериментального моделювання роботи 10 одиниць техніки протягом 120 днів встановлено, що поєднання просторових (GPS) і телеметричних (IoT) даних дозволяє перейти від традиційного контролю до системи оперативного та предиктивного управління.

Отримані результати свідчать про стійкий економічний ефект від впровадження інтегрованих систем. Зокрема, зафіксовано зниження витрат пального в середньому на 14–16% при низькій дисперсії показників (2,8%), що підтверджує стабільність ефекту незалежно від умов експлуатації техніки. Встановлено, що основними чинниками економії є оптимізація маршрутів руху, зменшення частки холостого ходу (з 18% до 9%), а також контроль несанкціонованих витрат пального.

Аналіз ефективності виконання польових операцій показав, що застосування технологій точного водіння та автоматичного керування секціями агрегатів дозволяє зменшити коефіцієнт перекриття обробки з 12–15% до 3–5%. Це забезпечує суттєве скорочення перевитрат матеріальних ресурсів, зокрема насіння та добрив, а також позитивно впливає на екологічні показники за рахунок зниження антропогенного навантаження на ґрунт.

Додатково встановлено, що впровадження систем моніторингу сприяє зниженню загального рівня простоїв техніки приблизно на 20%. Найбільший ефект досягнуто за рахунок скорочення технічних простоїв (на 23%) завдяки використанню предиктивних механізмів діагностики.

Разом з тим дослідження показало, що максимальний ефект від впровадження цифрових технологій досягається не миттєво, а після періоду адаптації персоналу, який у середньому становить 1–1,5 місяця. Це свідчить про суттєвий вплив людського фактору на ефективність використання інтелектуальних систем управління та необхідність підготовки персоналу як невід'ємної складової цифровізації.

Водночас виявлено ряд обмежень, що стримують повну реалізацію потенціалу GPS та IoT-технологій, зокрема проблеми сумісності обладнання різних виробників, залежність якості даних від стабільності каналів зв'язку, а також додаткові витрати на впровадження та обслуговування систем. Це визначає доцільність застосування поетапного та модульного підходів до цифровізації агровиробництва.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що інтеграція GPS-моніторингу та IoT-сенсорів забезпечує не лише економічний ефект, але й створює передумови для переходу до інтелектуальних систем управління сільськогосподарською технікою, орієнтованих на підвищення точності, автоматизації та сталості аграрного виробництва.

Список використаної літератури

1. Al-Farouni, M., Abed, Z., Venkatraman, A. *Precision Agriculture: Leveraging GPS and IoT for Enhanced Crop Management*. SHS Web of Conferences, 2025, 216-223.
2. Grodzicki, G., Matuszak, P. *Technology for accurate positioning of agricultural machinery in precision agriculture based on GPS and IoT*. Smart Cities International Conference Proceedings, 2023, 7, 235-244.
3. Miller, T., Mikiciuk, G., et al. *The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now. –A Systematic Review of Smart Sensing Technologies*. Sensors, 2025, 25(12), 3583.
4. *Agriculture Vehicles Predictive Maintenance With Telemetry, Maintenance History and Geospatial Data* / Shykhmat Veres. ACPS, 2024, 9(2), 134–139.
5. *Ambient IoT: Communications Enabling Precision Agriculture* / A. Natraj Arun et al.
6. *Automated Work Records for Precision Agriculture Management: A Low-Cost GNSS IoT Solution* / Grosse, Honda et al.
7. Skoblo, T.S., Sidashenko, A.I., Romanyuk, S.P., Goncharenko, A.A., Omel'chenko, L.V., Bantkovskii, V.A. *Specific Features of Structure Formation*. Materials Science, 2020, 55(6).
8. Литвиненко В.О., Коваленко, С.В. *Цифрові технології у точному землеробстві: GPS та IoT в сільському господарстві*. Агроінформатика, 2021, 5(1), 45-53.
9. Петренко, І.М., Сидоренко, О.В. *Використання сенсорних мереж та хмарних платформ*. Вісник Національного аграрного університету, 2020, 2(34), 88-96.

10. Шевченко А.П. *Сучасні системи моніторингу та управління сільськогосподарською технікою*. Техніка і технології АПК, 2019, 7, 15-23.

11. Albatayneh, A., Alterman, D., Jaradat, M. Energy saving potential analysis applying factory scale energy audit: A case study of food production. *Energy Reports*. 2023.

References

1. Al Farouni, M., Abed, Z., Venkatraman, A. Precision Agriculture: Leveraging GPS and IoT for Enhanced Crop Management. *SHS Web of Conferences*, 2025, 216-223.

2. Grodzicki, G., Matuszak, P. Technology for Accurate Positioning of Agricultural Machinery in Precision Agriculture Based on GPS and IoT. *Smart Cities International Conference Proceedings*, 2023, 7, 235-244.

3. Miller, T., Mikiciuk, G., et al. The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now – A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors*, 2025, 25(12), 3583.

4. Shykhmat, A., Veres, O. Agriculture Vehicles Predictive Maintenance with Telemetry, Maintenance History and Geospatial Data. *ACPS*, 2024, 9(2), 134–139.

5. Arun, A. N., et al. Ambient IoT: Communications Enabling Precision Agriculture.

6. Grosse, Honda, et al. Automated Work Records for Precision Agriculture Management: A Low-Cost GNSS IoT Solution.

7. Skoblo, T.S., Sidashenko, A.I., Romanyuk, S.P., Goncharenko, A.A., Omel'chenko, L.V., Bantkovskii, V.A. Specific Features of Structure Formation in the Course of Modification of the Coatings on Products Made of Dispersion-Hardened Steels. *Materials Science*, 2020, 55(6).

8. Lytvynenko, V.O., Kovalenko, S.V. Digital Technologies in Precision Agriculture: GPS and IoT in Agriculture. *Agroinformatics*, 2021, 5(1), 45-53.

9. Petrenko, I.M., Sydorenko, O.V. Use of Sensor Networks and Cloud Platforms in Agriculture. *Bulletin of National Agrarian University*, 2020, 2(34), 88-96.

10. Shevchenko, A.P. Modern Systems of Monitoring and Management of Agricultural Machinery. *Technology and Engineering of Agro-Industrial Complex*, 2019, 7, 15-23.

11. Albatayneh, A., Alterman, D., & Jaradat, M. Energy saving potential analysis applying factory scale energy audit: A case study of food production. *Energy Reports*. 2023.

Отримано: 01.04.2026. Прийнято: 09.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Макаренко О. В.
ORCID iD: 0009-0007-3350-7456
E-mail: A.makarenko@avec.ua
Державний біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЯ
ЗЕРНОВИХ ТА ЗЕРНОБОБОВИХ
КУЛЬТУР ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ
МЕХАНІЧНИХ ІНТЕНСИФІКАТОРІВ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.119>

УДК 631.363.3

Макаренко О. В. Підвищення ефективності процесу розділення насіння зернових та зернобобових культур шляхом застосування механічних інтенсифікаторів

Анотація. Встановлення додаткових сітчастих інтенсифікаторів на робочій поверхні пневмосепарувального столу покращує якісні показники процесу при одночасному збільшенню питомої подачі матеріалу. Для адекватного визначення конструктивних (геометричних) параметрів сітчастого інтенсифікатора використано методику механіко-математичного моделювання процесу розділення насіннєвих матеріалів з урахуванням конструктивних параметрів і кінематичних режимів сепаруючої машини та фізико-механічних властивостей сої та нуту, де насіннєвий матеріал представлено як багатофазне середовище. Наведено результати математичного моделювання, а саме, залежність чистоти основної фракції від визначальних параметрів процесу.

Ключові слова: насіннєвий матеріал, багатофазне середовище, сепаруюча машина, механічні інтенсифікатори.

Makarenko O. V. Improving the Efficiency of the Separation Process of Cereal and Legume Seeds through the Use of Mechanical Intensifiers.

Abstract. The installation of additional mesh intensifiers on the working surface of a pneumatic separation table improves the qualitative indicators of the process while simultaneously increasing the specific feed rate of the material. To adequately determine the structural (geometric) parameters of the mesh intensifier, a method of mechanical-mathematical modeling of the seed material separation process was used, taking into account the structural parameters and kinematic operating modes of the separating machine, as well as the physical and mechanical properties of soybean and chickpea seeds, where the seed material is considered as a multiphase medium. The results of mathematical modeling are presented, namely the dependence of the purity of the main fraction on the determining parameters of the process.

Keywords: seed material, multiphase medium, separating machine, mechanical intensifiers.

Актуальність проблеми

За даними Європейської парламентської дослідницької служби (EPRS) [1], Український банк землі сільськогосподарського призначення до початку повномасштабних бойових дій, становив 41,3 млн. га, з них орної 32,7 млн. га. В той же час, за даними [2], у 2022 році Україна втратила до 20% територій, що еквівалентно 10 млн. га, з них 8 млн. га – орні землі. До додаткових втрат слід віднести забруднення вибухонебезпечними предметами. За інформацією Міністерства оборони України [3] площа, що має потенційне забруднення становить 139 000 км².

Аналіз літературних джерел дозволив встановити: значне зменшення площі орних земель, а у прифронтових областях має місце значне падіння врожайності культур, що в свою чергу, фіксується у зменшеннях об'ємів валового виробництва; економічні втрати у зв'язку з погіршенням логістичних витрат та коливаннями валютних курсів; деградація ґрунтів та екологічні ризики.

За даними FAO [4], відновлення (формування) одного сантиметру верхнього шару може тривати від 100 до 400 років.

Відповідно до положень Стратегії розвитку сільського господарства та сільських територій України до 2030 року, а також затвердженого операційного плану її реалізації на 2025–2027 роки [5], аграрна галузь держави спрямована на активне входження до глобальної продовольчої системи з метою зміцнення продовольчої безпеки як на національному рівні, так і на рівні міжнародних ринків. У цьому контексті сільське господарство визначається одним із ключових пріоритетів економічного розвитку країни та важливим чинником підтримання національної безпеки, збереження державного суверенітету і стабільності. У стратегічних документах також наголошується, що міжнародний ринок зерна відіграє провідну роль у підтриманні рівноваги та стабільності світових продовольчих систем.

З метою зменшення витрат на виробництво зернових і зернобобових культур значна частина середніх та малих агропромислових підприємств використовує насіннєвий матеріал власного виробництва. Водночас отримання насіння з високими посівними якостями та значним біологічним потенціалом можливе лише за умови його якісної підготовки. Одним із ключових етапів такої підготовки є ефективне очищення насіннєвого матеріалу від домішок, присутність яких суттєво погіршує схожість, енергію проростання та загальну життєздатність насіння. Сучасні технологічні лінії підготовки насіння передбачають використання комплексу машин для первинного, вторинного очищення та точного розділення насіннєвих сумішей [6]. Відповідно до вимог нормативних документів, до технологій і технічних засобів підготовки насіння висуваються підвищені вимоги щодо ощадливого поводження з насіннєвим матеріалом, що має забезпечувати збереження його біологічних властивостей і мінімізацію механічних пошкоджень. Особливу роль у технологічному процесі відіграють сепаруючі машини точного розділення, до яких належать фотосепаратори, сепаратори прецизійної обробки, віброфрикційні сепаратори, а також установки для розділення насіннєвого матеріалу в псевдозрідженому шарі за густиною. Серед зазначених технічних рішень найбільшого поширення набули машини, що здійснюють сепарацію насіння за густиною, що пояснюється їх відносно високою продуктивністю, економічною доцільністю та здатністю забезпечувати належну якість очищення.

Разом із тим проведений аналіз наукових публікацій, дослідних зразків та серійно виготовлюваних машин цього класу засвідчив наявність системних науково-технічних недоліків, які призводять до помилок у розрахунках, проектуванні та конструюванні сепаруючих машин і, відповідно, стримують подальший розвиток даного напрямку техніки [7]. Зокрема, у більшості теоретичних моделей процесу розділення насіннєвих матеріалів за густиною розглядається рух окремої частинки матеріалу, без урахування її взаємодії з іншими частинками шару та без врахування конструктивних особливостей робочої поверхні сепаратора.

Підвищення продуктивності або покращення якості розділення в таких системах обмежується площею робочої поверхні та величиною подачі матеріалу. При збільшенні подачі за незмінної площі робочої поверхні спостерігається суттєве погіршення показників якості процесу. Це пояснюється затуханням імпульсу коливань, що передається від робочої поверхні через нижні елементарні шари до частинок, розташованих на значній відстані від неї [8]. У зв'язку з цим доцільним є застосування

додаткових механічних інтенсифікаторів, які здатні активізувати переміщення частинок у шарі та покращити умови їх розшарування [9].

Таким чином, підвищення ефективності технологічного процесу підготовки насіння шляхом обґрунтування раціональних конструктивних параметрів сепаруючої машини для розділення насіннєвого матеріалу за густиною, а також визначення оптимальних параметрів механічних інтенсифікаторів, встановлених на робочій поверхні, і кінематичних режимів роботи машини, є актуальним науково-прикладним завданням. Його вирішення сприятиме підвищенню якості насіннєвого матеріалу, зростанню ефективності виробництва та зміцненню продовольчої безпеки України.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – аналіз впливу механічних інтенсифікаторів на ефективність процесу розділення насіннєвих матеріалів зернових та зернобобових культур.

Результати досліджень

1 Моделювання процесу розділення насіннєвих матеріалів у псевдорозрідженному шарі з використанням механічних інтенсифікаторів

Процес розділення насіннєвих матеріалів на робочих поверхнях пневмосепаруючих столів (ПСС) складається з двох фаз: перша фаза – процес переміщення матеріалу від зони завантаження до зони вивантаження та друга фаза – процес розшарування матеріалу на фракції [10]. Якість процесу розділення залежить від раціонального співвідношення конструктивних параметрів та кінематичних режимів сепаруючої машини і фізико-механічних властивостей матеріалу, що обробляється [11].

Удосконалення технологічних процесів потребує детального аналізу закономірностей переміщення та взаємодії шарів частинок, що створює передумови для вдосконалення методів сепарації та підвищення результативності роботи псевдорозріджених сепараційних систем.

Мінімізація втрат біологічно цінної частини насіннєвого матеріалу значною мірою залежить від раціонального вибору технологічних параметрів процесу, що забезпечує зменшення технологічних втрат і формування рівномірного розподілу частинок за фракціями.

Створення та розвиток математичних моделей технологічних процесів вимагає використання сучасних розрахункових підходів, які дозволяють описати поведінку насіння у робочій зоні обладнання та визначити оптимальні режими функціонування сепаруючих машин [12].

Таким чином, результати проведених досліджень мають подвійне значення – фундаментальне і прикладне, оскільки сприяють більш глибокому розумінню механізмів сепарації сипких матеріалів та можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів у аграрному виробництві.

Під час формування багатовимірних математичних моделей процесу сепарації приймається припущення, що під впливом спрямованого повітряного потоку та коливального руху робочої поверхні відбувається інтенсивне вертикальне розшарування псевдорозрідженого шару насіннєвого матеріалу вздовж осі, перпендикулярної до площини псевдорозрідженого сепараційного столу. У результаті такого процесу формується N шарів частинок, кожен із яких характеризується власними фізико-механічними параметрами, зокрема густиною, аерогравітаційними та гідродинамічними властивостями.

Кінематика кожного з утворених шарів розглядається з позицій механіки багатозначних середовищ, де кожен шар частинок моделюється як окрема

квазібезперервна фаза, а взаємодія між ними визначається граничними умовами на межах їх контакту. У такій постановці задачі динаміка псевдозрідженого шару, розшарованого за висотою, описується як рух багатофазної системи типу $N+1$, яка включає N шарів дискретного зернового матеріалу та одну безперервну газову фазу – повітря.

При моделюванні розподілу частинок за густиною передбачається існування граничних значень густини для різних фракцій матеріалу. До "легкої" фракції відносять домішки, пошкоджені або некондиційні насінини, а також інші компоненти з пониженими значеннями густини. Натомість, "важка" фракція представлена біологічно повноцінним, життєздатним насінням із підвищеними значеннями густини. Між цими крайніми групами формується проміжна – "середня" фракція, до складу якої входять частинки з середніми характеристиками густини.

Для математичного опису процесу припускається, що вертикальний розподіл частинок за густиною підпорядковується нормальному закону, а положення шарів із різними значеннями густини відповідає математичному сподіванню цього розподілу. Оскільки густина частинок змінюється неперервно, а точний розподіл їх кількості за цим параметром зазвичай невідомий, це суттєво ускладнює отримання точного аналітичного розв'язку задачі. Тому для спрощення розрахунків приймається припущення, що функції розподілу формуються для усереднених значень густини трьох основних фракцій – легкої, середньої та важкої, а дисперсія координат відповідних шарів приймається рівною одиниці.

Важливою передумовою ефективного функціонування ПСС є визначення раціональних технологічних параметрів їх роботи. До таких параметрів належать кути нахилу робочої поверхні столу, частота та амплітуда її коливань, а також швидкість і напрямок повітряного потоку. Правильний вибір цих характеристик істотно впливає на кінематику переміщення частинок у шарі, інтенсивність їх розшарування та якість кінцевого поділу матеріалу на фракції.

Разом з тим значна різноманітність фізико-механічних властивостей насіннєвого матеріалу суттєво ускладнює опис процесу сепарації засобами класичних аналітичних методів. Це зумовлює необхідність створення спеціалізованих механіко-математичних моделей, які дають змогу адекватно відобразити поведінку частинок у робочій зоні сепаратора. Використання таких моделей дозволяє не лише підвищити ефективність розділення, але й визначати оптимальні режими роботи обладнання без проведення значної кількості трудомістких експериментальних досліджень. У результаті досягається зниження виробничих витрат, зростання продуктивності та підвищення стабільності технологічного процесу.

У представленому дослідженні для опису процесу застосовано багатофазний підхід, відповідно до якого насіннєвий матеріал розглядається як псевдорідинна система, що складається з декількох шарів частинок. Кожен із цих шарів характеризується власними гідродинамічними та аероґравітаційними властивостями. Така концепція дає можливість врахувати особливості фізичної взаємодії частинок у псевдозрідженому середовищі та описати процес переміщення шарів із різною густиною за відмінними траєкторіями, що сприяє більш глибокому розумінню механізмів сепарації.

Результативність застосування цієї технології значною мірою визначається комплексом робочих параметрів, серед яких найбільший вплив мають кути нахилу робочої поверхні, частота її коливань та швидкість повітряного потоку. Оптимізація цих характеристик дозволяє підвищити якість розділення насіннєвого матеріалу, мінімізувати втрати біологічно повноцінного насіння та збільшити загальну ефективність процесу сепарації.

У межах даної роботи використано сепараційну систему, в якій зерновий матеріал розділяється на шари у псевдорозрідженому середовищі. Загальний вигляд робочої поверхні з встановленим сітчастим інтенсифікатором наведено на рис. 1.

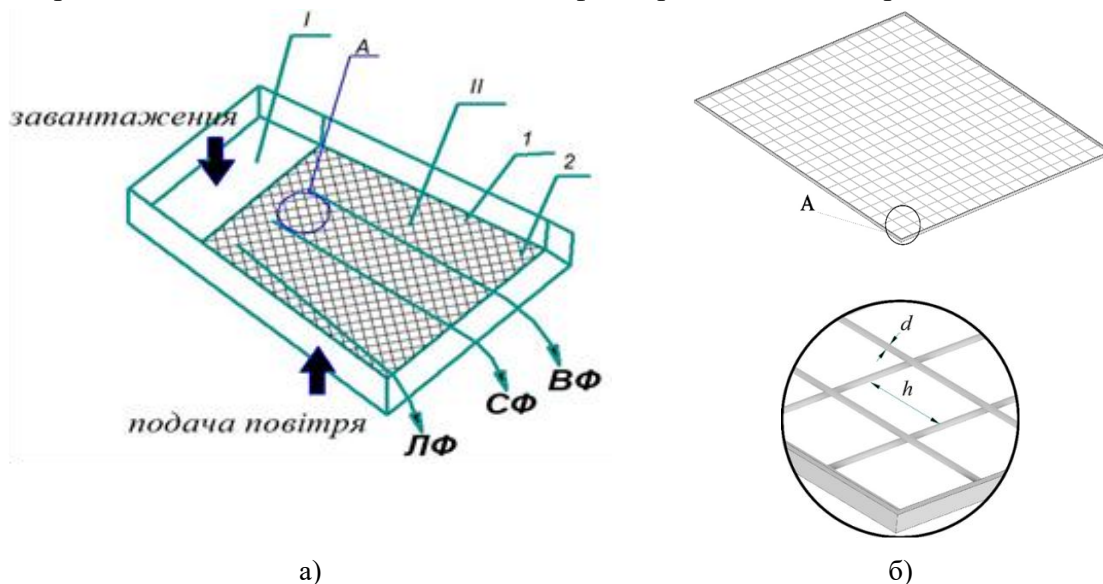


Рис. 1. Загальний вид робочої поверхні пневмосепарувального столу з встановленим сітчастим інтенсифікатором (а): ЛФ – легка фракція, СФ – середня фракція, ВФ – важка фракція; загальний вид інтенсифікатора (б): d – діаметр, h – шаг розташування прутів перетину. Дата подачі заявки на патент України 19.12.2024 р.

Для опису руху рідини використовуються основні рівняння механіки суцільного середовища. Усі моделі суцільного середовища передбачають визначення полів напружень σ_{ij} , деформацій ε_{ij} , переміщень u_i , (швидкостей V_i) а також температури T , тиску p і густини ρ у залежності від часу. Для знаходження цих полів використовують такі співвідношення:

- рівняння руху, за дією зовнішніх навантажень X_i , записані в термінах напружень

$$\sigma_{ij,j} + X_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

- співвідношення Коші, що пов'язують малі деформації та переміщення

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (2)$$

В термінах швидкостей співвідношення Коші мають вигляд:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (V_{i,j} + V_{j,i}). \quad (3)$$

- умови сумісності деформацій

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ik}}{\partial x_j \partial x_l} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jl}}{\partial x_i \partial x_k} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{il}}{\partial x_j \partial x_k} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jk}}{\partial x_i \partial x_l}, \quad (4)$$

- граничні та початкові умови,

- рівняння стану, що пов'язують тиск, густину та температуру середовища.

Однак, вказаних співвідношень недостатньо для однозначного визначення σ_{ij} , ε_{ij} , u_j ($i, j = 1, 2, 3$). Тому в механіці рідини використовують співвідношення між

напруженнями та швидкостями деформацій. Вважаємо, що компоненти тензора напружень лінійно зв'язані з компонентами тензору швидкостей деформацій.

Відмінні типи залежностей відповідають різним моделям рідини. Введемо такі припущення щодо псевдорідкого середовища: вважатимемо рідину такою що стискається та в'язкою; передбачимо, що збурення тиску є незначними, тобто розглядатимемо задачу у лінійному формулюванні; застосовуватимемо фундаментальні закони механіки рідини, зокрема закон збереження маси (рівняння неперервності) у такому вигляді:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho_f \mathbf{V}_f). \quad (5)$$

Далі використовуємо рівняння руху рідини у напруженнях (наслідок закону збереження імпульсу) з врахуванням об'ємних сил $\mathbf{F}$ у вигляді:

$$\rho_f \frac{d\mathbf{V}_f}{dt} = \rho_f \mathbf{F} + \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}_f). \quad (6)$$

Для визначення компонентів тензору напружень приймаємо гіпотезу Стокса:

$$\boldsymbol{\sigma}_f = -\left(P + \frac{2}{3}\mu\right) \mathbf{I} + \dot{\mathbf{S}}, \quad (7)$$

де $\dot{\mathbf{S}}$ – девіатор швидкостей деформації; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

$$\dot{\mathbf{S}} = \begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} - \dot{e}_0 & \dot{\varepsilon}_{12} & \dot{\varepsilon}_{13} \\ \dot{\varepsilon}_{12} & \dot{\varepsilon}_{22} - \dot{e}_0 & \dot{\varepsilon}_{23} \\ \dot{\varepsilon}_{13} & \dot{\varepsilon}_{23} & \dot{\varepsilon}_{33} - \dot{e}_0 \end{pmatrix}, \quad \dot{e}_0 = \frac{1}{3}(\dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33}). \quad (8)$$

Застосовуємо рівняння стану у вигляді $p = p(\rho)$ та співвідношення:

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = c^2, \quad (9)$$

де c – швидкість звуку в середовищі.

Розглянемо рух багаточислової рідини. Нехай кожний шар характеризується такими параметрами: густина ρ_n , μ_n – коефіцієнт динамічної в'язкості, h_n – середня товщина шару. Рівняння руху для кожного шару в інваріантній формі матимуть вигляд:

$$\rho_n \frac{d\mathbf{V}^{(n)}}{dt} = -\nabla P^{(n)} + \mu_n \Delta \mathbf{V}^{(n)} + \rho_n \mathbf{F}^{(n)} \quad (10)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{V}^{(n)} = (\nabla \cdot \mathbf{V}^{(n)}) = 0 \quad (11)$$

В рівняннях (10)-(11) вектор швидкості $\mathbf{V}^{(n)}$ має такі компоненти $\mathbf{V}^{(n)} = (V_1^{(n)}, V_2^{(n)}, V_3^{(n)})$, вектор масових сил $\mathbf{F}^{(n)}$ в координатному вигляді зображується як $\mathbf{F}^{(n)} = (F_1^{(n)}, F_2^{(n)}, F_3^{(n)})$. Диференціальний оператор $\frac{d}{dt}$ має вигляд $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{V}^{(n)} \cdot \nabla)$.

2 Аналітична модель процесу розділення сої за допомогою інтенсифікаторів з урахуванням геометричних параметрів та режиму роботи

Розглянуто сітчастий інтенсифікатор, призначений для розділення НМ за фізико-механічними властивостями (густина, форма, аеродинамічний опір). Конструкція включає: нахилу вібраційну площину та систему перегородок з кроком s і висотою h .

Модель включатиме врахування швидкості повітряного потоку, спрямованого через шар частинок; напрям вібрації уздовж осі x , перпендикулярно до перегородок.

Геометричні параметри сітчастого інтенсифікатора: s – крок встановлення перегородок (м); h – висота перегородки (м); L – довжина робочої частини (м); θ – кут нахилу інтенсифікатора (рад); H – початкова висота шару насіння (м); A – амплітуда вібрації (м); f – частота вібрації (Гц).

Вібрація має визначальний вплив на процес розподілу часток НМ. Математично це можна описати через гармонійні коливання:

$$y(t) = A\varphi(ft + \varphi). \quad (12)$$

Далі наведено фізичні параметри інтенсифікатора:

$V_{\text{вс}}$ - швидкість повітряного потоку, приведена до площі шару;

$V_{\text{кр}}$ - критична швидкість псевдозрідження;

ε - пористість динамічного шару частинок, яка обчислюється за формулою:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1 - \varepsilon_0}{h_1/h_0}, \quad (13)$$

де ε_0 - початкова пористість шару;

h_1/h_0 - ступінь розширення шару.

Величина h_1/h_0 описується таким чином:

$$\frac{h_1}{h_0} = a + b \frac{V_{\text{вс}}}{V_{\text{кр}}}. \quad (14)$$

Тут a, b – сталі, різні для різних матеріалів.

З (13) та (14) маємо таку формулу

$$\varepsilon = 1 - \frac{1 - \varepsilon_0}{a + b V_{\text{вс}}/V_{\text{кр}}}. \quad (15)$$

Початкову пористість ε_0 можна обчислити з урахуванням вібраційного впливу за формулою:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{\infty}(1 - \exp(-k_{\varepsilon} J_{b,\bar{\rho}})) K_y, \quad (16)$$

де: ε_{∞} - максимальна пористість у стаціонарному стані;

k_{ε} - емпіричний коефіцієнт;

$J_{b,\bar{\rho}}$ - вібраційне прискорення, яке обчислюється за формулою:

$$J_{b,\bar{\rho}} = \frac{(2\pi f)^2}{A}; \quad (17)$$

K_y - коефіцієнт ущільнення шару (відношення питомої ваги частинок до ваги у псевдозрідженому стані), що обчислюється за формулою:

$$K_y = \frac{G}{G_y}. \quad (18)$$

З урахуванням дії сітчастого інтенсифікатора в рівняннях руху НМ вводиться модифікована сила опору руху через НМ за формулою:

$$F_{\text{опір}} = \mu_f mg \cos \theta (1 - \varepsilon). \quad (19)$$

Знайдемо далі умову переходу частинки через перегородку. Частинка може подолати перегородку висотою h , якщо її вертикальна швидкість достатньо велика. Це накладає таку умову на амплітуду A :

$$A \cdot 2\pi f > \sqrt{2gh}. \quad (20)$$

З (20) маємо

$$A > \frac{\sqrt{2gh}}{2\pi f}. \quad (21)$$

Умова (21) задає мінімальну амплітуду для забезпечення ефективного переміщення частинок через перегородки інтенсифікатора.

З формули (21) можемо також знаходити висоту перегородки інтенсифікатора за заданою амплітудою.

Крім того, враховуємо швидкісний поріг V_{th} , пов'язаний із геометрією кроку S та вібраційним імпульсом f , за формулою:

$$V_{th} = \frac{s}{T} = sf. \quad (22)$$

Якщо $V > V_{th}$, то ефективність використання інтенсифікатора суттєво зменшується.

3 Обговорення отриманих результатів

Комп'ютерне моделювання чистоти розділення фракцій на пневмосортувальному столі з урахуванням сітчастого інтенсифікатора

За результатами розв'язання рівнянь механіко-математичної моделі побудовано графічні залежності зміни чистоти основної фракції від визначальних параметрів процесу (рис. 2).

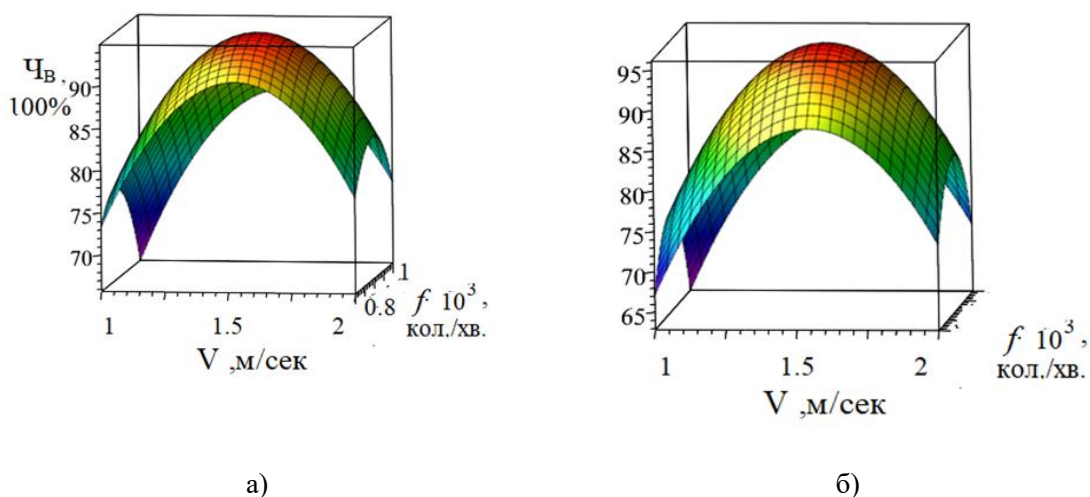


Рис. 2. Зміна чистоти основної фракції НМ сої (а) та нуту (б) від частоти коливань (f) та швидкості (V) повітряного потоку

При цьому крок встановлення перегородок інтенсифікатора має визначатись:

$$0.06t < s < 0.16t. \quad (23)$$

Далі переходимо до вивчення січних отриманих поверхонь $\text{Ч}_в(A, f)$.

На рис.3 та 4 наведено січні поверхонь для сої та нуту в залежності від різних параметрів.

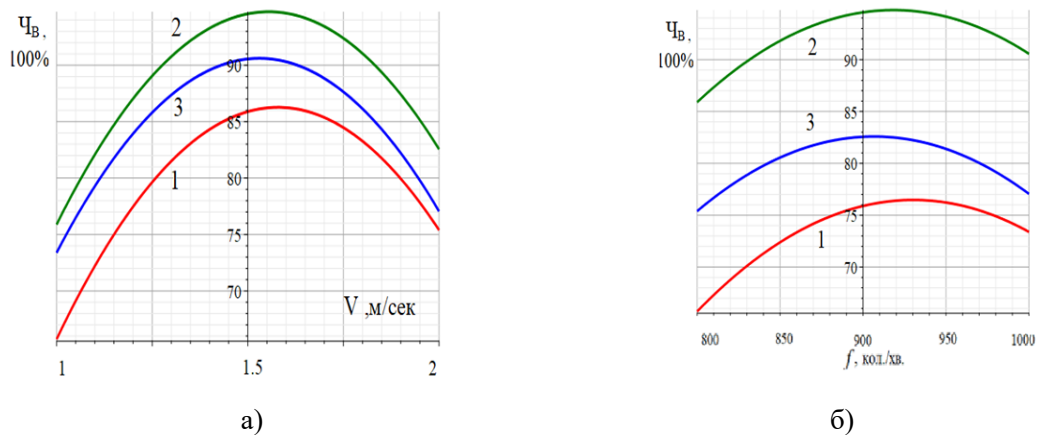


Рис. 3. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої в залежності від частоти (а) (1 – 800 кол./хв.; 2 – 900 кол./хв.; 3 – 1000 кол./хв.) коливань ПСС та швидкості повітряного потоку (б): (1 – 1м/с, 2– 1.5 м/с, 3– 2 м/с)

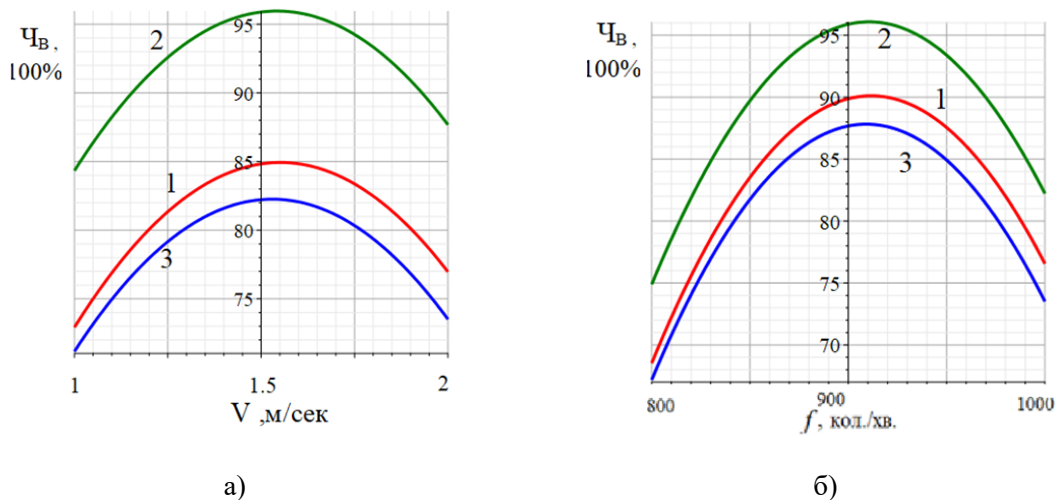


Рис. 4. Зміна чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ нуту в залежності від частоти (а) (1 – 800 кол./хв.; 2 – 900 кол./хв.; 3 – 1000 кол./хв.) коливань ПСС та швидкості повітряного потоку (б): (1 – 1м/с, 2 – 1.5 м/с, 3 – 2 м/с) з урахуванням дії інтенсифікатора

Досліджені залежності чистоти основної фракції від частоти (а) та швидкості повітря (б).

Вивчались зміни чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ сої та нуту в залежності від вказаних параметрів з урахуванням дії інтенсифікатора.

Далі проведено порівняння даних розрахунків для зміни чистоти основної фракції, отриманої розділенням НМ нуту та сої з урахуванням та без урахуванням дії інтенсифікатора з такими параметрами $h = 0.0085$ м та $s = 0.16$ м. На рис. 5. наведені результати цього порівняння.

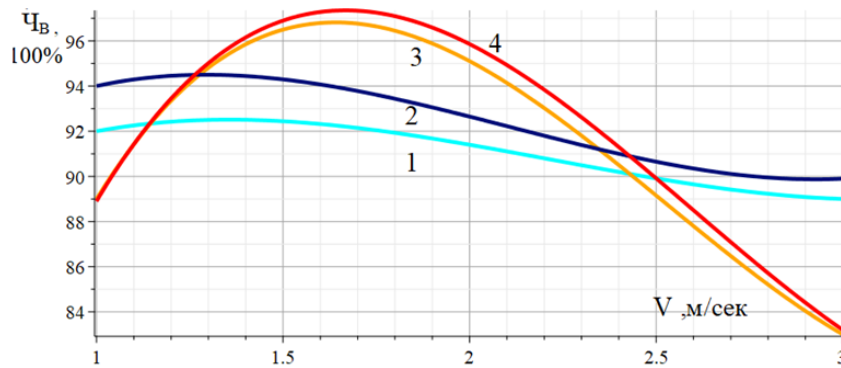


Рис.5. Чистота важкої фракції, отриманої розділенням НМ на ПСС, в залежності від швидкості повітряного потоку для матеріалів сої та нуту в залежності від швидкості повітря (1 – соєва, без інтенсифікатора, 2 – соєва, з інтенсифікатором, 3 – нут, без інтенсифікатора, 4 – нут, з інтенсифікатором)

З цих даних можна зробити висновок, що наявність інтенсифікатора за заданих параметрах приводить до підвищення чистоти важкої фракції.

При швидкості повітря більш, ніж 2м/с відбувається погіршення якості сортування.

Висновки

1. За результатами критичного аналізу ефективності роботи ПСС встановлено, що збільшення продуктивності сепаруючої машини обмежено геометричними розмірами робочої поверхні, а збільшення подачі матеріалу знижує якісні показники процесу. Встановлено, що використання додаткових механічних інтенсифікаторів на робочій поверхні має позитивний ефект.

2. Механіко-математичний метод моделювання процесу розділення НМ у псевдорозрідженому середовищі, в якому НМ представлено як багатофазне середовище та враховує конструктивні параметри, кінематичні режими ПСС і фізико-механічні властивості матеріалу є дієвим та адекватним.

3. Виходячи з (22) та (23) можна визначити раціональні геометричні параметри сітчастого інтенсифікатора з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу. Встановлено підвищення ефективності процесу розділення НМ при використанні сітчастого інтенсифікатора, який становлено на робочій поверхні ПСС. Подано заяву на корисну модель.

Список використаних джерел

1. Дані Європейського парламентського вісника. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/760432/EPRS_BRI%282024%29760432 (дата звернення 04.03.2026 р.)

2. KSE. AGRICULTURE IN UKRAINE: PRE-WAR, STATUS QUO AND A LOOK AHEAD. July, 2023. P. 78. <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/03/Market-analysis-and-Outlook-of-Ukraine-2023> (дата звернення 05.03.2026 р.)

3. <https://mod.gov.ua/en/news/the-area-of-ukrainian-territories-potentially-contaminated-by-mines-and-explosive-hazards-decreased-by-17-000-km-in-2024> (дата звернення 05.03.2026 р.)

4. <https://www.fao.org/newsroom/story/Cherishing-the-ground-we-walk-on/en?utm> (дата звернення 06.03.2026 р.)

5. <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhhvalennia-stratehii-rozvytku-silskoho-hospodarstva-ta-silskykh-terytorii-v-ukraini-na-period-i151124-1163> (дата звернення 06.03.2026 р.)
6. Бредихін В.В., Богомолов О.В., Кісь-Коркіщенко Л.В., Сліпченко М.В., Іващенко С.Г., Ірклієнко В.І., Черняєв О.О., Тікунов С.Р. Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом: монографія. Харків, Діса+, 2023. 401 с.
7. Ольшанський В.П., Бредихін В.В., Лук'яненко В.М., Півень М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Теорія сепарування зерна: монографія. Харків, 2017. 802 с.
8. Bredykhin Vadym, Tikunov Stanislav, Slipchenko Maksim, Aifyorov Oleksiy, Bogomolov Alexey, Shchur Taras, Kocira Slawomir, Kiczorowski Piotr, Paslavskyy Rostyslav (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciend. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018>
9. Vadym Bredykhin, Taras Shchur, Stanislav Tikunov, Oleksandr Makarenko, Vladyslav Mezentshev, Weronika Kruszelnicka. Evaluation of maize seed sieving performance using sieves with cassini oval shape openings. Journal of Agricultural Engineering. 2024. V. 61. P. 666-674. DOI: <https://doi.org/10.52151/jae2024615.1875>
10. Slipchenko Maksym, Bredykhin Vadym, Kis-Korkishhenko Liliia, Pak Andrey, Aifyorov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European Journal of Enterprise Technologies. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425>
11. Алієв Елічин Бахтияр огли. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
12. Степаненко С.П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 05.05.11, Глеваха, 2020. 48 с.
13. Sinha J. P., et al. Seed processing for quality upgradation // Seed Processing: Principles and Practices. – Singapore: Springer, 2023. – P. 183–208. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_10
14. Rojas-Yana D., et al. Machine vision system for sorting lentils using deep learning // Computers and Electronics in Agriculture. – 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.108693>

References

1. Data from the European Parliamentary Gazette. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/760432/EPRS_BRI%282024%29760432 (date of application: March 4, 2026)
2. KSE. AGRICULTURE IN UKRAINE: PRE-WAR, STATUS QUO AND A LOOK AHEAD. July, 2023. P. 78. <https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/03/Market-analysis-and-Outlook-of-Ukraine-2023> (date of application: March 5, 2026)
3. <https://mod.gov.ua/en/news/the-area-of-ukrainian-territories-potentially-contaminated-by-mines-and-explosive-hazards-decreased-by-17-000-km-in-2024> (date of application: March 5, 2026)
4. <https://www.fao.org/newsroom/story/Cherishing-the-ground-we-walk-on/en?utm> (date of application: March 6, 2026)
5. <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhhvalennia-stratehii-rozvytku-silskoho-hospodarstva-ta-silskykh-terytorii-v-ukraini-na-period-i151124-1163> (date of application:

March 6, 2026)

6. Bredykhin V.V., Bogomolov O.V., Kis-Korkishchenko L.V., Slipchenko M.V., Ivashchenko S.G., Irkliyenko V.I., Chernyaev O.O., Tikunov S.R. Scientific foundations of economical seed preparation with improved biological potential: monograph. Kharkiv,

7. Olshansky V.P., Bredykhin V.V., Lukyanenko V.M., Piven M.V., Slipchenko M.V., Kharchenko S.O. Theory of grain separation: monograph. Kharkiv, 2017. 802 p.

8. Bredykhin Vadym, Tikunov Stanislav, Slipchenko Maksim, Aifyorov Oleksiy, Bogomolov Alexey, Shchur Taras, Kocira Slawomir, Kiczorowski Piotr, Paslavskyy Rostyslav (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0018>

9. Vadym Bredykhin, Taras Shchur, Stanislav Tikunov, Oleksandr Makarenko, Vladyslav Mezentsev, Weronika Kruszelnicka. Evaluation of maize seed sieving performance using sieves with cassini oval shape openings. Journal of Agricultural Engineering. 2024. V. 61. P. 666-674. DOI: <https://doi.org/10.52151/jae2024615.1875>

10. Slipchenko Maksym, Bredykhin Vadym, Kis-Korkishhenko Liliia, Pak Andrey, Aifyorov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European Journal of Enterprise Technologies. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425>

11. Aliyev Elichin Bakhtiyar ogly. Physical and mathematical models of precision separation processes for sunflower seed material: monograph. Zaporizhia: STATUS, 2019. 196 p.

12. Stepanenko S.P. Mechanical and technological justification of processes and equipment for screenless fractionation of grain materials: abstract of dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 05.05.11, Hlevakha, 2020. 48 p.

13. Sinha J. P., et al. Seed processing for quality upgradation // Seed Processing: Principles and Practices. – Singapore: Springer, 2023. – P. 183–208. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5888-5_10

14. Rojas-Yana D., et al. Machine vision system for sorting lentils using deep learning // Computers and Electronics in Agriculture. – 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.108693>

Отримано: 10.04.2026. Прийнято: 21.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Марченко М. М.
ORCID iD: 0009-0004-1099-6822
E-mail:
kmmarchenko1208@gmail.com

Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПОЛІТЕТРАФТОРЕТИЛЕНУ У ФІЛЬТРАЦІЇ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ОЛИВ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.131>

УДК 678.746.22:620.179.4:66.067.3

Марченко М. М. Моделювання деградації та регенерації пористих матеріалів на основі політетрафторетилену у фільтрації трансформаторних оли

Анотація. Розглянуто проблему деградації та регенерації пористих фільтрувальних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ), що застосовуються для очищення трансформаторних оли в процесі експлуатації силового електрообладнання. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю забезпечення стабільних діелектричних та експлуатаційних характеристик трансформаторних оли, які з часом погіршуються внаслідок накопичення механічних домішок, продуктів окиснення та вологи.

Метою роботи є розробка математичної моделі багатоциклової роботи ПТФЕ-фільтра з урахуванням процесів накопичення забруднень, зростання гідравлічного опору, деградації структури матеріалу та зниження ефективності регенерації. Об'єктом дослідження є синтерований ПТФЕ, отриманий методом вилуговування пороутворювача NaCl, що формує бімодальну камерно-каналъну структуру порового простору.

Запропонована модель базується на використанні закону Дарсі для опису фільтраційного потоку та вводить безрозмірний параметр ступеня заповнення пор, який пов'язує масу накопичених забруднень із брудоемкістю матеріалу. Нелінійна залежність гідравлічного опору від ступеня кольматації враховує різні механізми заповнення великих каверн і вузьких міжпорових каналів. При моделюванні врахована деградація ефективності регенерації у багатоцикловому режимі, а також накопичення незворотних залишків, які зменшують доступну брудоемкість та збільшують базовий опір фільтра.

Проведено числове моделювання 10 робочих циклів фільтрації-регенерації при заданих технологічних параметрах. Встановлено, що ресурс роботи фільтра зменшується більш ніж у 3 рази (з 8,64 до 2,80 год), а початковий гідравлічний опір зростає у 2,44 рази. Показано, що сукупний об'єм відфільтрованої оливи за багатоциклової експлуатації у 6,3 рази перевищує ресурс одноразового використання, що підтверджує доцільність регенерації, незважаючи на її деградацію.

Встановлено домінуючий вплив початкової брудоемкості матеріалу та ефективності регенерації на ресурс роботи фільтра. Показано, що збільшення брудоемкості шляхом оптимізації гранулометричного складу пороутворювача забезпечує суттєве зростання ресурсу фільтра, тоді як підвищення ефективності регенерації (зокрема за рахунок ультразвукової обробки та застосування розчинників) дозволяє збільшити кількість робочих циклів та сумарний об'єм очищеної оливи.

Ключові слова: політетрафторетилен (ПТФЕ), пористі матеріали, трансформаторна олива, мікрофільтрація, математичне моделювання, деградація, регенерація, кольматація, гідравлічний опір, брудоемкість, фільтраційні процеси.

Marchenko M. M. Modeling of degradation and regeneration of porous materials based on polytetrafluoroethylene in transformer oil filtration

Abstract. The paper addresses the problem of degradation and regeneration of porous filtering materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) used for purification of transformer oils during the operation of power electrical equipment. The relevance of the study is обусловлена the need to ensure stable dielectric and эксплуатационные properties of transformer oils, which deteriorate over time due to the accumulation of mechanical impurities, oxidation products, and moisture.

The aim of the work is to develop a mathematical model of multi-cycle operation of a PTFE filter, taking into account contaminant accumulation, increase in hydraulic resistance, structural degradation of the material, and reduction in regeneration efficiency. The object of the study is sintered PTFE obtained by leaching a NaCl pore-forming agent, which results in a bimodal cavity-channel pore structure.

The proposed model is based on Darcy's law for describing fluid flow in porous media and introduces a dimensionless pore filling factor that relates the mass of accumulated contaminants to the dirt-holding capacity of the material. The nonlinear dependence of hydraulic resistance on the degree of clogging accounts for different mechanisms of filling of large cavities and narrow inter-pore channels. Particular attention is paid to modeling the degradation of regeneration efficiency under multi-cycle operation, as well as to the accumulation of irreversible residues that reduce the available dirt-holding capacity and increase the initial hydraulic resistance of the filter.

Numerical simulation of 10 filtration–regeneration cycles was carried out under specified operating parameters. It was established that the filter lifetime decreases by more than three times (from 8.64 to 2.80 hours), while the initial hydraulic resistance increases by a factor of 2.44. It is shown that the total volume of filtered oil in multi-cycle operation is 6.3 times higher than that of single-use operation, confirming the feasibility of regeneration despite its gradual degradation.

Sensitivity analysis revealed the dominant influence of two key factors: the initial dirt-holding capacity and the regeneration efficiency. It is shown that increasing the dirt-holding capacity through optimization of the pore-former granulometry significantly enhances the filter lifetime, while improving regeneration efficiency (e.g., by ultrasonic treatment combined with heated solvents) increases the number of operating cycles and the total volume of purified oil.

Keywords: polytetrafluoroethylene (PTFE), porous materials, transformer oil, microfiltration, mathematical modeling, degradation, regeneration, fouling, hydraulic resistance, dirt-holding capacity, filtration processes.

Вступ

Тривала надійна робота силових трансформаторів у значній мірі визначається якістю трансформаторної оливи, яке одночасно виконує функції рідкої ізоляції та теплоносія. В процесі експлуатації олива піддається термічному окисненню, зволоженню та накопиченню механічних домішок (продуктів зносу конструкційних матеріалів, оксидів металів і смолистих компонентів), що призводить до погіршення її діелектричних характеристик [1]. Вміст механічних частинок понад 20 мг/л або їх розмір більш ніж 10 мкм є критичним для надійності трансформаторної ізоляції [2].

Мікрофільтрація трансформаторних олив із застосуванням фільтрувальних елементів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) є перспективним методом відновлення якості оливи безпосередньо у системі трансформаторного вузла [2]. Синтерований ПТФЕ, виготовлений методом вилугування твердих пороутворювачів (зокрема NaCl, NaHCO₂), поєднує унікальну хімічну інертність до вуглеводневих

середовищ, широкий робочий температурний діапазон ($-200...+260\text{ }^{\circ}\text{C}$) та регульовану пористість від 60 до 80 % із розміром пор 0,3–200 мкм [3].

Проте питання кількісної оцінки деградації фільтрувальних властивостей матеріалу в процесі багатоциклової експлуатації із регенерацією залишається мало дослідженим. Safiddine та ін. [2] дослідили регенерацію трансформаторних ізоляційних рідин з використанням мембранної технології, але математичне моделювання багатоциклової деградації не було проведено. Zhang та ін. [4] оптимізували умови очищення ПТФЕ-мембран для обробки нафтових стічних вод, але особливості камерно-канальної структури, об'ємних фільтрів, та їх вплив на ефективність регенерації не враховано.

Важливим є розуміння того, як специфічна бімодальна камерно-канальна архітектура порової структури, що утворюється при NaCl-вилуговуванні, обумовлює механізми незворотної кольматації та обмежує ефективність відновлення.

Метою роботи є розробка математичної моделі багатоциклової роботи ПТФЕ-фільтра, реалізація кількісного моделювання та аналізу чутливості, а також формулювання рекомендацій щодо раціональних методів регенерації.

Математична модель

Розглянемо об'ємно-пористий ПТФЕ-фільтрувальний елемент, виготовлений методом холодного одновісного пресування суміші порошку ПТФЕ та пороутворювача NaCl із подальшим спіканням та вилуговуванням солі у воді. Мікроструктура такого матеріалу має бімодальний характер: великі ізодіаметричні каверни (100–500 мкм), що відтворюють форму кристалів солі, з'єднані між собою вузькими міжпоровими каналами (5–30 мкм), утвореними контактами частинок полімеру [4].

Модель базується на наступних допущеннях:

1. Фільтр розглядається як пористе середовище із бімодальною поровою структурою (каверни + канали).
 2. Потік рідини описується законом Дарсі для ламінарної течії у пористому середовищі.
 3. Накопичення забруднень відбувається рівномірно за часом при сталій концентрації на вході.
 4. Зміна проникності описується через безрозмірний ступінь заповнення пор.
 5. Ефективність регенерації знижується лінійно відносно номера циклу.
 6. Температура та в'язкість оливи вважаються сталими протягом експлуатації.
- Введемо наступні змінні та параметри моделі (табл. 1).

Таблиця 1

Основні змінні та параметри моделі

Змінна	Фізичний зміст	Одиниця вимірювання
Φ	Ступінь заповнення пор	-
$m_{\text{забр}}$	Маса накопичених забруднень	г
$m_{\text{емк}}$	Брудоемкість фільтра	г
ΔP	Гідравлічний опір	Па
Q	Витрата фільтрації	$\text{м}^3/\text{с}$
K	Проникність	м^2
$\eta_{\text{ф}}$	Ефективність фільтрації	-
$\eta_{\text{рег}}$	Ефективність регенерації	-
N	Номер циклу	-

Безрозмірний ступінь заповнення пор визначається як:

$$\varphi = \frac{m_{\text{забр}}}{m_{\text{смк}}}$$

де $m_{\text{забр}}$ - маса вже накоплених забруднень; $m_{\text{смк}}$ - максимальна маса забруднень, яку може вмістити фільтр (брудоемкість). Фізичний зміст: $\varphi = 0$ - фільтр чистий, $\varphi = 1$ - фільтр повністю заповнений.

Гідравлічний опір описується функцією:

$$\Delta P(\varphi) = \Delta P_0 \cdot F(\varphi)$$

$$F(\varphi) = 1 + \alpha_1 \varphi^2 + \frac{\alpha_2 \varphi^4}{(1 - \varphi)^{\frac{3}{2}}}$$

Перший доданок $(1 + \alpha_1 \varphi^2)$ відповідає заповненню великих каверн при малих φ - опір зростає квадратично ($\alpha_1 = 2,5$). Другий доданок $(\frac{\alpha_2 \varphi^4}{(1 - \varphi)^{\frac{3}{2}}})$ описує катастрофічний зріст опору при наближенні до повної кольтатації при заповненні вузьких каналів ($\alpha_2 = 3,0$). Фізичний зміст полягає у тому, що спочатку забруднення заповнюють великі порожнини - опір зростає плавно, потім починають перекриватися вузькі канали - і опір різко зростає через кубічну залежність втрат від діаметра каналу (аналог закону Гагена-Пуазейля: $\Delta P \sim 1/r^4$).

При сталих витратах Q та середній концентрації забруднень на вході $C_{\text{вх}}$ швидкість накопичення забруднень:

$$\dot{m} = \frac{dm_{\text{забр}}}{dt} = \eta_{\text{ф}} \cdot C_{\text{вх}} \cdot Q = \text{const}$$

При базових параметрах ($\eta_{\text{ф}} = 0,85$; $C_{\text{вх}} = 12$ мг/л; $Q = 300$ л/год) отримуємо $\dot{m} = 3,06$ г/год.

Лінійний ріст забруднень у часі описується як:

$$m_{\text{забр}}(t) = \dot{m} \cdot t$$

Тоді ступінь заповнення у часі визначається за формулою:

$$\varphi(t) = \frac{\dot{m} \cdot t}{m_{\text{смк}}}$$

Цикл закінчується, коли ΔP досягає граничного значення $\Delta P_{\text{гр}} = 0,25$ МПа:

$$F(\varphi^*) = \frac{\Delta P_{\text{гр}}}{\Delta P_0}$$

де φ^* - граничний ступінь заповнення.

Оскільки функція $F(\varphi)$ монотонно зростає від 1 (при $\varphi = 0$) до ∞ (при $\varphi \rightarrow 1$), для будь-якого $R = \Delta P_{\text{гр}}/\Delta P_0 > 1$ існує єдине розв'язання $\varphi^* \in (0, 1)$, яке знаходиться методом бісекції.

Час роботи циклу:

$$t_{\text{pec}} = \frac{\varphi^* \cdot m_{\text{смк}}}{\dot{m}}$$

З кожним циклом промивка працює гірше, в зв'язку з деградацією ефективності регенерації:

$$\eta_{\text{рег}}(n) = \eta_{\text{рег}}(0) \cdot (1 - k_{\eta}(n - 1))$$

де $\eta_{\text{рег}}(0) = 0,88$ — початкова ефективність; $k_{\eta} = 0,020$ — швидкість деградації (2 % за цикл); n — номер циклу. Причина деградації полягає у тому, що вузькі канали звужуються, розчинник гірше проникає, смоли, що важко видаляються, накопичуються.

Залишкове забруднення після регенерації визначаються як:

$$\Delta m_{\text{ост}}(n) = (1 - \eta_{\text{рег}}(n)) \cdot m_{\text{забр}}(n)$$

Кумулятивне залишкове забруднення:

$$M_{\text{ост}}(n) = \sum_{k=1}^n \Delta m_{\text{ост}}(k)$$

Деградація початкового опору:

$$\Delta P_0(n) = \Delta P_{0,\text{ref}} \cdot (1 + k_{\text{стр}})^{n-1} \cdot \left(1 + k_{\text{пор}} \cdot \frac{M_{\text{ост}}(n-1)}{m_{\text{емк},0}}\right)$$

де $(1 + k_{\text{стр}})^{n-1}$ описує структурну деградацію ПТФЕ-матриці при термоциклюванні та ультразвуці ($k_{\text{стр}} = 0,020$); другий множник враховує вплив залишкових забруднень на базовий опір ($k_{\text{пор}} = 1,5$).

Зниження брудоемкості:

$$m_{\text{емк}}(n) = m_{\text{емк},0} - f_{\text{емк}} \cdot M_{\text{ост}}(n-1)$$

де $f_{\text{емк}} = 0,80$ — коефіцієнт зниження ємкості. Залишкові забруднення «забивають» частину об'єму каверн назавжди, зменшуючи корисний об'єм для наступних циклів.

Фільтр вважається непридатним, якщо виконується хоча б одна з умов: $\Delta P_0(n) \geq \Delta P_{\text{пр}}$ (базовий опір досяг границі — цикл триває нуль часу), або $m_{\text{емк}}(n) \leq 0$ (брудоемкість вичерпана).

Для циклу n виконується наступна послідовність кроків:

1. Визначення початкових параметрів: суха маса ПТФЕ + залишки $m_{\text{сух}} = m_{\text{PTFE}} + M_{\text{зал}}(n-1)$; початковий опір $\Delta P_0(n)$; доступна брудоемкість $m_{\text{емк}}(n)$.
2. Перевірка придатності: якщо $\Delta P_0(n) \geq \Delta P_{\text{пр}}$ або $m_{\text{емк}}(n) \leq 0$ - фільтр непридатний.
3. Знаходження граничного ступеня заповнення:

$$R_n = \frac{\Delta P_{\text{пр}}}{\Delta P_0(n)} \cdot \varphi_n^*$$

Знаходимо φ_n^* (граничний ступінь заповнення) методом бісекції для R_n

4. Розрахунок ресурсу циклу:

- Маса забруднень у циклі:

$$m_{\text{загр}} = \varphi_n^* \cdot m_{\text{емк}}(n)$$

- Час роботи:

$$t_{\text{рес}} = \frac{\dot{m}_{\text{загр}}}{\dot{m}}$$

- Об'єм відфільтрованої оливи:

$$V = Q \cdot t_{\text{рес}}$$

5. Реєстрація мас до та після фільтрації:

$$m_1 = m_{\text{сух}} + m_{\text{загр}}$$

6. Регенерація з ефективністю $\eta_{\text{рег}}(n)$:

- Вилучені забруднення:

$$m_{\text{вил}} = \eta_{\text{рег}}(n) \cdot m_{\text{загр}}$$

- Маса після регенерації:

$$m_2 = m_1 - m_{\text{вил}}$$

- Нові залишки:

$$\Delta m_{\text{зал}} = m_{\text{загр}} - m_{\text{вил}}$$

7. Оновлення кумулятивних залишків $M_{\text{зал}}(n)$

$$M_{\text{зал}}(n) = M_{\text{зал}}(n-1) + \Delta m_{\text{зал}}$$

8. Розрахунок ступеня відновлення робочого діапазону:

$$\psi = \frac{\Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_0(n+1)}{\Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_{0,\text{ref}}} \cdot 100\%$$

Числове моделювання 10 робочих циклів виконано за таких базових параметрів:
 $Q = 300$ л/год, $C_{\text{вх}} = 12$ мг/л, $\eta_{\text{ф}} = 0,85$, $\eta_0 = 0,88$, $k_{\eta} = 0,02$ цикл⁻¹, $\Delta P_{0,\text{ref}} = 0,050$ МПа, $\Delta P_{\text{гр}} = 0,250$ МПа, $m_{\text{смк},0} = 40$ г, $k_{\text{стр}} = 0,02$, $k_{\text{пор}} = 1,5$, $f_{\text{смк}} = 0,80$.

Результати моделювання наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати числового моделювання 10 робочих циклів

n	ΔP_0 , МПа	$m_{\text{смк}}$, Г	$m_{\text{забр}}$, Г	$t_{\text{рес}}$, ГОД	$V_{\text{фільт}}$, Л	$\eta_{\text{рег}}$, %	Ψ , %
1	0,0500	40,00	26,44	8,64	2592	88,0	96,4
2	0,0571	37,46	23,94	7,82	2347	86,2	92,7
3	0,0646	34,82	21,52	7,03	2109	84,5	88,7
4	0,0726	32,15	19,29	6,30	1891	82,7	84,6
5	0,0808	29,49	16,90	5,52	1657	81,0	80,5
6	0,0891	26,91	14,83	4,85	1454	79,2	76,3
7	0,0974	24,45	13,01	4,25	1275	77,4	72,2
8	0,1057	22,10	11,40	3,73	1118	75,7	68,1
9	0,1139	19,88	10,00	3,27	980	73,9	64,0
10	0,1220	17,79	8,57	2,80	840	72,2	60,1

Ресурс першого циклу становить $t_1 = 8,64$ год при відфільтрованому об'ємі $V_1 = 2592$ л. До десятого циклу ресурс скорочується до $t_{10} = 2,80$ год, тобто у 3,1 рази, що відображає кумулятивний характер деградації. Початковий гідравлічний опір зростає нелінійно від $\Delta P_0(1) = 0,050$ МПа до $\Delta P_0(10) = 0,122$ МПа, тобто у 2,44 рази за 10 циклів.

Суттєво, що ступінь відновлення робочого діапазону Ψ знижується значно швидше, ніж масова ефективність регенерації $\eta_{\text{рег}}$: до 10-го циклу $\eta_{\text{рег}} = 72,2$ %, тоді як $\Psi = 60,1$ %. Це пояснюється кубічною залежністю гідравлічних втрат від діаметра каналу (аналог закону Гагена-Пуазейля): навіть незначні незмивні залишки, локалізовані у вузьких каналах, справляють непропорційно великий вплив на опір.

Кумулятивна маса незмивних залишків зростає з 3,27 г (цикл 1) до 30,15 г (цикл 10), тоді як доступна брудоемкість скорочується з 40 г до 17,79 г — менше половини початкового значення. Загальний об'єм відфільтрованої оливи за 10 циклів становить $V_{\Sigma} = 16263$ л, що у 6,3 рази перевищує ресурс одноразового використання (2592 л).

Аналіз чутливості виявив ієрархію впливу параметрів на сукупний ресурс. Результати наведено у таблиці 3 та на рис. 1.

Таблиця 3

Вплив ефективності регенерації η_0 на ресурс фільтра

Показник	$\eta_0 = 0,75$	$\eta_0 = 0,88$ (базовий)	$\eta_0 = 0,95$
Ресурс 1-го циклу, год	8,64	8,64	8,64
Ресурс 5-го циклу, год	3,80	5,52	7,14
Ресурс 10-го циклу, год	0,95	2,80	5,30
Число придатних циклів ($t > 2$ год)	~8	~12	~18
V_{Σ} за 10 циклів, л	10 840	16 263	20 950
Кратність продовження ресурсу	×4,2	×6,3	×8,1

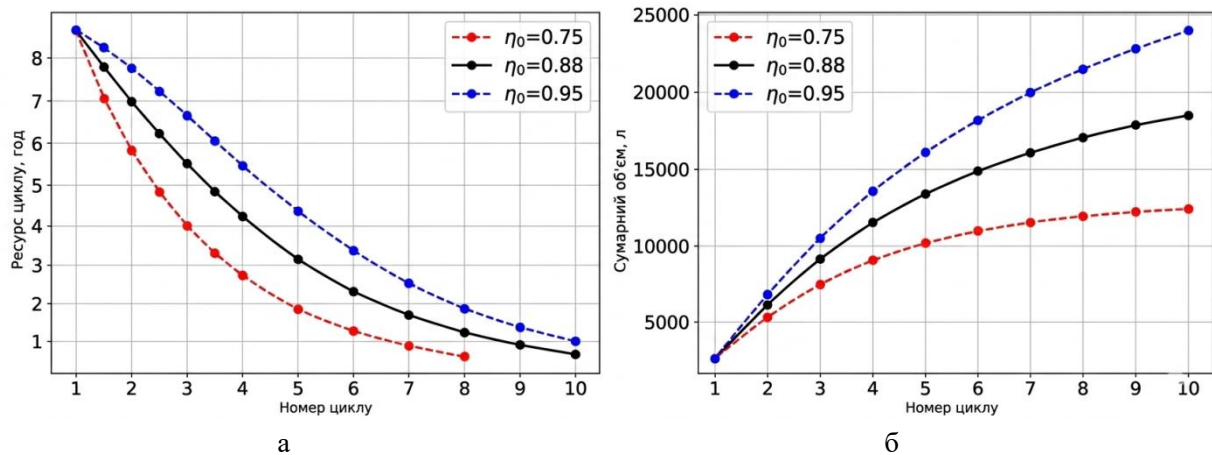


Рис. 1. Залежність чутливості від $\eta_{\text{рег}}$:

а - ресурс роботи (год) залежно від номера циклу для трьох значень η_0 (0,75; 0,88; 0,95);
 б - сумарний відфільтрований об'єм (л) залежно від номера циклу

Як видно з рис. 1а, ресурс роботи циклу монотонно зменшується з номером циклу для всіх значень η_0 , проте темп зменшення суттєво залежить від ефективності регенерації. При $\eta_0 = 0,75$ ресурс 10-го циклу становить лише 0,95 год, тоді як при $\eta_0 = 0,95$ — 5,30 год. Рис. 1б показує, що сумарний відфільтрований об'єм зростає сублінійно через накопичення незмивних залишків. Кожні 10 відсоткових пунктів приросту η_0 дають приблизно 2–3 додаткових робочих цикли та 25–30 % приросту сукупного ресурсу.

При $C_{\text{вх}} = 5, 12, 25$ мг/л сумарний об'єм за 10 циклів однаковий (16263 л), але часовий ресурс скорочується пропорційно концентрації. Висока концентрація потребує частіших регенерацій, прискорюючи деградацію.

Найсильніший вплив справляє початкова брудоемкість $m_{\text{емк},0}$, яка визначається пористістю та архітектурою структури: її збільшення з 25 до 55 г підвищує сукупний ресурс у 2,8 рази та число придатних циклів — понад удвічі (табл. 4). Це вказує на пріоритет технологічної оптимізації пористої структури через підбір гранулометрії пороутворювача.

Таблиця 4

Вплив початкової брудоемкості $m_{\text{емк},0}$ на ресурс фільтра

$m_{\text{емк},0}$	Ресурс 1-го циклу, год	Ресурс 10-го циклу, год	Придатних циклів	V_{Σ} , л
25 г	5,48	0,74	~7	8910
40 г	8,64	2,80	~12	16 263
55 г	11,80	5,23	~16	25 100

Висновки

1. Бімодальна камерно-канална структура, утворена вилуговуванням NaCl, забезпечує у 3–10 разів вищу брудоемкість порівняно із класичним синтерованим ПТФЕ, однак принципово змінює стратегію регенерації: зворотне промивання втрачає роль основного методу очищення, а домінуючим стає розчинникова дифузійна екстракція.

2. Числове моделювання прогнозує, що при базовій ефективності регенерації $\eta_0 = 0,88$ сукупний ресурс за 10 циклів становить 16 263 л, що у 6,3 рази перевищує ресурс одноразового використання (2592 л).

3. Деградація має виражений нелінійний кумулятивний характер: ступінь відновлення робочого діапазону тиску Ψ до 10-го циклу знижується до 60,1 %, що значно більше, ніж спад масової ефективності регенерації $\eta_{\text{рег}} = 72,2$ %. Основним обмежувальним чинником є накопичення незмивних залишків у вузьких міжпорових каналах, а не механічне руйнування матриці.

4. Проведений аналіз показав пріоритет двох параметрів впливу: початкова брудоемкість (оптимізація через гранулометрію пороутворювача) та ефективність регенерації (підвищення ультразвуковою обробкою у поєднанні із підігрітим розчинником). Збільшення $m_{\text{смк},0}$ з 25 до 55 г підвищує сукупний ресурс у 2,8 рази.

5. Моніторинг ΔP_0 після кожної регенерації є найінформативнішим індикатором стану фільтра. Перевищення ΔP_0 понад 50 % від $\Delta P_{\text{гр}}$ (у досліджуваній моделі — 0,125 МПа, досягається на ~10-му циклі) є сигналом для виведення елемента з експлуатації.

6. Отримані результати мають практичне значення для проектування та експлуатації фільтрувальних елементів у системах очищення трансформаторних олив і можуть бути використані для оптимізації режимів регенерації та підвищення ресурсу роботи фільтрів.

Список використаних джерел

1. Siva Sai, R., Suresh, P., Prasad, M. N. V. V. S. & Raju, I. Degradation studies of electrical, physical and chemical properties of aged transformer oil. J. Phys.: Conf. Ser. 2020, 1706(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012056>
2. Safiddine, L., Ghomari, A., Flazi, A., Seladji, M., Derdour, A. & Hamou, A. Regeneration of transformer insulating fluids using membrane separation technology. Energies. 2019, 12(3), 368. <https://doi.org/10.3390/en12030368>
3. Kaliuzhnyi, O. B. & Platkov, V. Ya. The structure and properties of porous poly(tetrafluoroethylene). J. Polym. Res. 2022, 29, 32. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-02887-w>
4. Zhang, J., Li, Y., Zhang, X., Wang, Y., Liu, Y. & Zhang, Q. A robust copper oxide-based superhydrophobic microfiltration membrane for moisture-proof treatment of trace water in transformer oil. Colloids Surf. A. 2021, 625, 126843. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126843>

Отримано: 03.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Свіргун В. П.¹

ORCID iD: 0000-0001-5413-9428

Свіргун О. А.²

ORCID iD: 0000-0001-6069-8269

E-mail:

dmgal1963@btu.kharkov.ua

¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

² Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ КРАНОМ МОСТОВОГО ТИПУ ЗА УМОВ ОБМЕЖЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ ВАНТАЖУ В ПРОЦЕСІ РУХУ І ПОВНЕ УСУНЕННЯ ЙОГО КОЛИВАНЬ ПІСЛЯ ЗУПИНКИ КРАНУ В ЗАДАНІЙ ТОЧЦІ

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.139>

УДК 631.362

Свіргун В. П., Свіргун О. А. Оптимальне керування краном мостового типу за умов обмеження відхилення вантажу в процесі руху і повне усунення його коливань після зупинки крану в заданій точці

Анотація. В роботі наведено результати досліджень руху двомасової моделі «візок-вантаж», яка відповідає більшості кранів мостового типу. Під час руху візка природньо виникають коливання вантажу, які мають бути усунені після зупинки візка в заданій точці. Але найважливішою умовою є максимальне скорочення тривалості перевантажувального циклу. Тому критерієм оптимальності закону керування візком є максимальна швидкодійність. Саме такий критерій дозволить у подальшому, коли ці закони керування будуть реалізовані на реальному крані за допомогою мікропроцесорної техніки, досягти максимальної продуктивності, що актуально для перевантажувальних кранів, які використовуються на великих вантажних потоках. Під час дослідження встановлено, що для досягнення поставленої мети - максимальної продуктивності, на перехідних етапах мають бути застосовані максимальне прискорення або гальмування. При значній довжині канату це може призвести до недопустимої амплітуди коливань вантажу під час руху. Саме тому розглядається постановка задачі із обмеженням на максимальне відхилення вантажу при збереженні всіх інших критеріїв і обмежень. Принциповою відмінністю запропонованого підходу від відомих рішень є відмова від усунення коливань вантажу після розгону візка з тим, що має місце у багатьох роботах. Це робиться для того, щоб отримати однакову фазову картину перед початком гальмування в не залежності від пройденого візком шляху. Тільки це вже скорочує перевантажувальний цикл тому, що не треба гаяти час на усунення коливань вантажу при розгоні візка. Такий підхід значно ускладнює поставлену задачу через необхідність знаходити оптимальне рішення на кінцевій ділянці циклу (зупинка візка), коли початкові фазові координати будуть різні і залежать від відстані на яку має переміститися візок. Коливання вантажу відсутні тільки після зупинки візка. Застосування простої двомасової моделі крану дає можливість проведення аналітичних досліджень руху візка і вантажу. Використання більш складних розрахункових схем змушує застосовувати чисельні методи, що значно зменшує можливості аналізу. І це не дає жодних переваг, тому що досліджуються низькочастотні коливання вантажу, на які інші фактори, наприклад, процеси в приводі впливають не суттєво.

Важливо раціонально вибрати керуючий параметр. Їм може бути прискорення візка або рушійна сила. Вибір рушійної сили в якості керуючого параметру більш раціонально. Це дозволяє використовувати на деяких ділянках циклу кінетичну енергію вантажу при гальмуванні або прискоренні візка і виключає перевантажування приводу.

Дослідження показали, що процес розгону візка при дотримуванні зазначених обмежень виглядає так: вантаж двома короткими керуючими діями «розгін-гальмування» виводиться на максимально допустиме відхилення (позаду візка) і далі рухається прискорено разом з візком у відхиленому стані до досягнення візком сталої швидкості, далі, під час сталого руху, вантаж вільно коливається, а на ділянці зупинки візка, вантаж виводиться на максимально допустиме відхилення (попереду візка), починається гальмування вантажу і візка як одне ціле у відхиленому стані до певного значення і фінальна зупинка візка. Певною мірою ділянки розгону і гальмування візка схожі, але при розгоні вантаж утримується у відхиленому стані позаду візка, а на ділянці гальмування – попереду

Ключові слова: оптимальне керування, усунення коливань вантажу, точне позиціювання, кран, мікропроцесор, перевантажувальний цикл.

Svirgun V. P., Svirgun. O. A. **Optimal control of an overhead crane with a constraint on load deviation during motion and complete suppression of load oscillations after stopping at a prescribed point**

Abstract. This work presents the results of a study of the motion of a two mass “trolley-load” model representative of most overhead cranes. During trolley motion, load oscillations naturally arise and must be eliminated after the trolley stops at a prescribed position. The primary objective, however, is to minimize the duration of the handling cycle. Therefore, the optimality criterion for the trolley control law is maximum speed of operation. Such a criterion will enable, when these control laws are implemented on a real crane using microprocessor control, attainment of maximal throughput—an important requirement for handling cranes operating under high cargo flow.

The study shows that to achieve the objective of maximal throughput, maximum acceleration or braking must be applied during transient phases. For long hoist ropes this may produce unacceptable load oscillation amplitudes during motion. Consequently, the problem formulation considered here includes a constraint on the maximum allowable load deviation while preserving all other criteria and constraints. A principal distinction of the proposed approach from many known solutions is the deliberate omission of eliminating load oscillations immediately after the trolley acceleration phase. This omission is intended to produce a consistent phase state prior to the onset of braking, independent of the distance traveled by the trolley. Omitting oscillation suppression during acceleration shortens the handling cycle because time is not spent damping load oscillations during acceleration.

This approach complicates the problem substantially because the optimal control must be found on the terminal segment of the cycle (trolley stop), when the initial phase coordinates vary and depend on the travel distance. Load oscillations are absent only after the trolley comes to rest. Use of a simple two mass crane model enables analytical investigation of trolley and load motion. Employing more complex numerical models forces reliance on numerical methods, which significantly reduces analytical insight and offers no advantage here, since the studied phenomena are low frequency load oscillations that are not strongly affected by other factors (for example, drive dynamics).

It is important to choose the control variable rationally. The control input may be trolley acceleration or the driving force. Selecting the driving force as the control variable is more rational because it allows kinetic energy of the load to be utilized during braking or acceleration on certain cycle segments and prevents drive overload.

The analysis demonstrates that, under the stated constraints, the trolley acceleration process proceeds as follows: with two short control actions (“accelerate-brake”) the load is brought to the maximum allowable deflection behind the trolley and then moves together with the trolley in the deflected state under accelerated motion until the trolley reaches steady speed.

During steady motion the load oscillates freely. On the trolley stopping segment the load is brought to the maximum allowable deflection ahead of the trolley; braking of the load and trolley as a single unit then begins in the deflected state down to a prescribed value, followed by the final trolley stop. The acceleration and braking segments are similar in structure, but during acceleration the load is held deflected behind the trolley, whereas during braking it is deflected ahead.

Keywords: *optimal control, suppression of load oscillations, precise positioning, crane, microprocessor control, handling cycle.*

Постановка проблеми

Відомо, що для підвищення продуктивності та ефективності перевантажувальних робіт треба використовувати сучасну мікропроцесорну техніку і переходити в автоматичний режим роботи [1-5]. Особливістю крана-перевантажувача є те, що наявність гнучкого підвісу вантажу призводить до виникнення значних його коливань, які недопустимі в момент завантаження або розвантаження. При ручному керуванні краном задача усунення коливань вантажу при зупинці крана покладена на оператора крана, який, керуючись своїм досвідом, шляхом зміни швидкості вантажного візка досягає цієї мети за декілька маніпуляцій швидкістю. Це вимагає значного напруження уваги і не дозволяє максимально швидко усунути коливання вантажу в заданій точці. Втома оператора від напруженої роботи може призвести до аварійних ситуацій. При переході на автоматичний режим роботи перш за все треба розробити такі закони керування, що дозволять здійснити перевантажувальний цикл у найкоротший термін з усуненням коливань вантажу і точним позиціонуванням. Потрібна ціла система датчиків, яка буде надавати повну інформацію про хід виконання операцій. Математичний аналіз руху кранового візка з вантажем, що на гнучкому канаті, показав необхідність використовувати максимальні прискорення на перехідних ділянках циклу, щоб досягти максимальної швидкодійності. Якщо довжина каната значна, то такий режим роботи однозначно призведе до сильного розгойдування вантажу під час руху візка, що може бути небезпечно і є сенс ввести ще одне обмеження - на максимальне відхилення вантажу від вертикальної осі. Це дещо збільшить тривалість перевантажувального циклу, але система буде більш керованою.

Розроблена програма синтезу оптимальних законів керування для будь-якого крана мостового типу. На виході ми отримуємо в розгортці за часом основні параметри (графіки) пересування і швидкість візка та вантажу. При подальшому програмуванні мікроконтролера логічно взяти один з цих параметрів, а саме, швидкість візка під час руху і зробити його управляючим. Інші параметри достатньо контролювати за допомогою датчиків. Сучасні мікропроцесорні системи здатні точно реалізувати переміщення будь якої матеріальної точки за заданим графіком швидкості і досягти поставленої мети – ефективного переходу в автоматичний режим роботи. Саме такий підхід дозволить досягти максимальної продуктивності крану, усунення фактору втоми кранівника, покращення безпеки перевантажувальних робіт тощо.

Формулювання мети досліджень

Метою роботи є розробка ефективних законів керування вантажним візком крана мостового типу з усуненням коливань вантажу після зупинки крана і точним позиціонуванням при дотримуванні обмеження на максимальне відхилення вантажу під час руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Автоматизація кранів стала актуальною задачею з появою на ринку компактних мікропроцесорних приладів. Але застосування засобів автоматики на крані стикається з великим масивом проблем і перш за все це наявність гнучкого підвісу вантажу, що не дозволяє застосовувати прості алгоритми керування по причині виникнення значних коливань вантажу під час руху кранового візка або самого крану. Також можна зазначити як проблему це агресивне середовище для стабільної роботи електронних елементів, але для механіків головне що треба зробити для успішної роботи системи керування краном це ефективне усунення коливань вантажу в точці завантаження/розвантаження. Дослідники з багатьох країн запропонували різні способи вирішення цієї проблеми. Всі варіанти можна розкласти на декілька груп [6-19]:

- плавний розгін або гальмування візка завдяки сучасним регульованим приводам. При незначній довжині канату і на невеликих вантажних потоках це може бути достатнім для організації нормального перевантажувального процесу, але виробність крана не може бути високою;

- застосування різноманітних просторових конструкцій підвісу вантажу з демпфуючими елементами. Конструкції виходять складними та коштовними і майже не працюють на підвісах великої довжини;

- усунення коливань вантажу виключно засобами електроніки, використовуючи зворотній зв'язок з датчиками. Алгоритм керування доволі простий – в точці зупинки візок рухається слідом за вантажем і через декілька ітерацій вантаж заспокоюється. Це теж не швидкий спосіб і потребує додаткових маніпуляцій для точного позиціонування;

- усунення коливань вантажу змінюючи швидкість візка. Це найбільш популярний спосіб і зокрема оператор крану при ручному керуванні саме так і робить. Розроблено багато різноманітних алгоритмів зміни швидкості вантажу при яких не буде коливань вантажу після зупинки. Деякі з них вже реалізовані на практиці. Але у всіх них є одна вада – вони не дозволяють скоротити перевантажуваний цикл до мінімуму і програють досвідченому оператору кран. Причина в тому, що всі відомі рішення робочі тільки, коли усунені коливання вантажу при розгоні, на що витрачається зайвий час.

Зробивши аналіз відомих рішень, прийнята концепція подальших досліджень, а саме, отримати оптимальні за швидкодією закони керування, які не передбачують усунення коливань вантажу при розгоні, а тільки після зупинки крану в кінцевій заданій точці. В такій постановці задача значно ускладнюється тому що перед початком гальмування вантаж здійснює вільні коливання. Додатково накладені обмеження на максимальне відхилення вантажу від вертикальної осі. В такій постановці ця задача ще не розглядалася.

Результати досліджень.

Розглянемо двомасову модель крана (рис.1), яка складається з візка масою m_1 і вантажу масою m_2 , підвішеного на гнучкому канаті довжиною l . На візок діє рушійне зусилля $F(t)$ і зусилля статичного опору W .

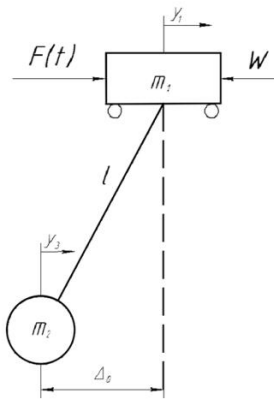


Рис. 1. Розрахункова схема

Рух такої моделі описується системою диференціальних рівнянь

$$\dot{y}_1 = y_2, \dot{y}_2 = \frac{(y_2 - y_1)m_2 g}{m_1 l} + U(t), \dot{y}_3 = y_4, \dot{y}_4 = \frac{(y_1 - y_2)g}{l}, \quad (1)$$

де $U(t) = (F(t) - W)/m_1$; y_1, y_2 - переміщення і швидкість візка; y_3, y_4 - переміщення і швидкість вантажу; g - гравітаційна константа.

В якості керуючого параметру вибрано рушійне зусилля $F(t)$. Але у подальшому керуючим параметром будемо рахувати параметр $U(t)$, який є пропорційний $F(t)$.

Оптимізаційна задача формулюється наступним чином: необхідно знайти закон керування $U(t)$, який має мінімальну кількість перемикачів і при цьому візок з вантажем, що висить на канаті, переміститься на визначену відстань S з повним гасінням коливань вантажу наприкінці руху. При цьому мають виконуватися наступні обмеження:

$$|F(t)| \leq K, \quad y_2 \leq v_0, \quad |y_3 - y_1| \leq \Delta_0, \quad (2)$$

де K – максимально можливе рушійне зусилля, v_0 - номінальна швидкість візка, Δ_0 – максимально можливе відхилення вантажу від вертикальної осі.

Було встановлено, що оптимальний закон керування згідно принципу максимуму Л.С.Понтрягіна [5]: має релейний вид. Тому на кожній ділянці перевантажувального циклу $U(t) = U_0 = \text{const}$. Враховуючи це, рішення системи рівнянь (1) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} y_1 &= b_1 + b_2 t - b_3 \frac{m_2}{m_1} \cos \lambda t - b_4 \frac{m_2}{m_1} \sin \lambda t + \frac{U_2}{\lambda^2} \left[\frac{g t^2}{2l} + \left(1 - \frac{g}{l \lambda^2}\right) (1 - \cos \lambda t) \right], \\ y_3 &= b_1 + b_2 t + b_3 \cos \lambda t + b_4 \sin \lambda t + \frac{g U_0}{l \lambda^2} \left[\frac{t^2}{2} - \frac{1}{\lambda^2} (1 - \cos \lambda t) \right] \\ y_2 &= \dot{y}_1 \\ y_4 &= \dot{y}_3 \end{aligned} \quad (3)$$

де $b_1 = (m_1 y_{01} + m_2 y_{03})/m$, $b_2 = (m_1 y_{02} + m_2 y_{04})/m$, $b_3 = m_1 (y_{03} - y_{01})/m$, $b_4 = \lambda^{-1} m_1 (y_{04} - y_{02})/m$, $\lambda = \sqrt{g/l\mu}$, $\mu = m_1/(m_1 + m_2)$, $m = m_1 + m_2$.

Процес руху моделі зручно досліджувати на фазовій площині (ξ_1, ξ_2) : $\xi_1 = (y_3 - y_1)\lambda$, $\xi_2 = y_4 - y_2$.

Фазові траєкторії на перехідних ділянках виглядають як концентричні кола з центром в точці $O_1(-(K-W)/m_1\lambda)$ при розгоні і з центром в точці $O_2((K+W)/m_1\lambda)$ при гальмуванні (рис.2).

Рівняння цих кіл має вигляд

$$(\xi_1 + U_0/\lambda)^2 + \xi_2^2 = (U_0/\lambda)^2 + \frac{b_3^2 \lambda^2}{\mu^2} + \frac{b_4^2 \lambda^2}{\mu^2} + \frac{2U_0 b_3}{\mu^2}$$

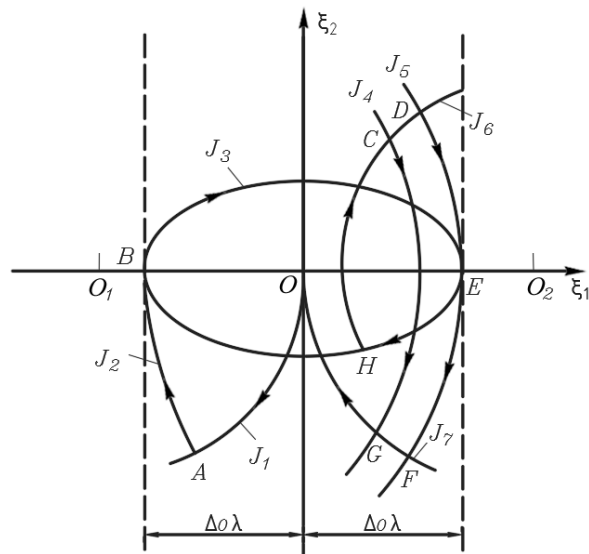


Рис. 2. Фазові траєкторії, коли $\Delta_0 \leq (K-W)/m_1 \lambda$

Рух по траєкторії здійснюється за годинною стрілкою і радіус кола залежить від початкових фазових координат. Час руху по будь-якій траєкторії

$$t_i = \varphi_i / \lambda \quad (4)$$

де φ_i – величина центрального кута, на який спирається дуга кола; $i=1,2,\dots$ – номер етапу.

Оскільки фазова координата ξ_1 пропорційна величині відхилення вантажу, на площині (ξ_1, ξ_2) можна легко показати область допустимих значень, обумовлену третьою нерівністю з (2). Вона обмежена двома вертикальними осями, що рівно віддалені від початку координат на величину $\Delta_0 \lambda$ (рис.2).

Розглянемо окремо всі етапи перевантажувального циклу.

Розгін візка. Будемо вважати, що номінальна швидкість v_0 достатньо велика і досягнути її у межах області допустимих значень неможливо якщо рухатись по траєкторії J_1 (рис.2). Тоді розгін візка буде здійснюватися наступним чином: необхідно вивести вантаж на максимальне допустиме значення Δ_0 і подальший розгін здійснювати з відхиленням вантажом. Як видно з рис.2, положенню, коли вантаж відхилен на величину Δ_0 відповідає точка B, в яку можна потрапити найкоротшим шляхом по траєкторії OAB. Вирішуючи рівняння $u_3 - u_1 = \Delta_0$ відносно U_0 , можна отримати його значення для утримання вантажу у відхиленому стані $U_0 = \Delta_0 \lambda^2$. Таке керування справедливо для $\Delta_0 \leq (K-W)/m_1 \lambda^2$, якщо навпаки, то буде порушено обмеження на рушійне зусилля.

Тривалість перших двох ділянок визначаються за формулою (4), а тривалість ділянки утримання вантажу у відхиленому стані $t_6 = l(v_0 - v_6) / \Delta_0 g$, де v_6 – швидкість візка після перших двох ділянок.

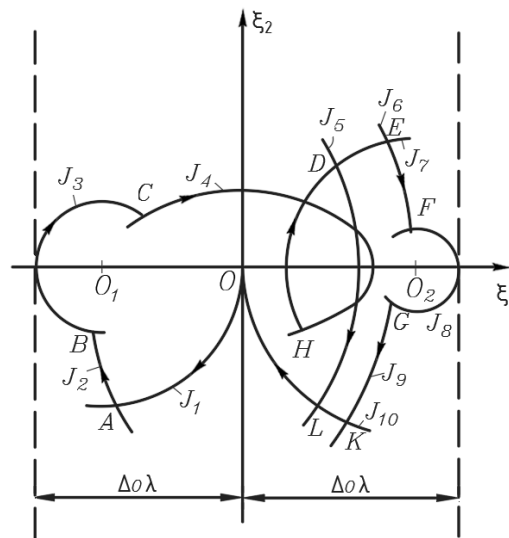


Рис. 3. Фазові траєкторії, коли $\Delta_0 > (K-W)/m_1\lambda$

Тепер знайдемо керування у випадку, коли $\Delta_0 > (K-W)/m_1\lambda^2$. Для того, щоб досягти номінальної швидкості і не порушувати обмеження (2), необхідно перейти з траєкторії J_1 , (рис.3) на найближчу траєкторію розгону типу J_2 . Необхідно із безліч траєкторій типу J_2 вибрати таку, у якій ділянка AB була б мінімальною. Тому тривалість першої ділянки визначається з умови мінімальної тривалості другої ділянки, яка визначається за формулою (4). Для визначення тривалості третього етапу необхідно розв'язати трансцендентне рівняння $y_2 = v_0$, використовуючи формулу y_2 з (3).

Рух візка з номінальною швидкістю. Для забезпечення сталої швидкості руху візка з урахуванням коливань вантажу був отриманий закон керування

$$U(t) = -\frac{m_2 g}{m_1 l} [((y_{03} - y_{01}) \cos \mu t + (y_{04} - y_{02}) \sin \mu t),$$

де $\mu = \sqrt{g/l}$

В цьому випадку фазова точка рухається у напрямку годинної стрілки по еліпсу J_3 (Рис.2), або по еліпсу J_4 (Рис.3). Його рівняння записується наступним чином

$$\frac{\xi_1^2}{\xi_{10}^2 + (\lambda \mu^{-1} \xi_{20})^2} + \frac{\xi_2^2}{(\xi_{10} \mu \lambda^{-1})^2 + \xi_{10}^2} = 1$$

Тривалість етапу рівномірного руху визначається в залежності від відстані на яку має переміститися візок.

Гальмування візка. Процес гальмування є найскладнішим етапом тому що треба повністю усунути коливання вантажу в заданій точці після зупинки візка і з дотриманням обмежень (2). Основні труднощі пов'язані з тим, що на початку процесу гальмування фазовий стан системи «візок-вантаж» може бути будь-який. На фазовій площині (ξ_1, ξ_2) це теж саме як потрапляння з будь-якої точки фазового простору в початок координат, де швидкість візка має дорівнювати нулю.

В залежності від Δ_0 процес гальмування може здійснюватися двома способами.

1). Випадок, коли $\Delta_0 \leq (K+W)/(m_1\lambda^2)$. Якщо серед траєкторій типу $HCGO$ (рис.2) не буде знайдено рішення, тоді гальмування буде здійснюватися по траєкторії $HDEFO$, де в точці E з'явиться етап утримання вантажу у відхиленому стані за допомогою керування $U_0 = -\Delta_0\lambda^2$. При цьому швидкість візка буде рівномірно зменшуватися з початкової v_1 до такого значення v_2 , щоб при подальшому русі по EFO швидкість візка в точці O мала

бути нуль. Тривалість цього етапу визначається за формулою $t_E = l(v_1 - v_2) / \Delta_0 g$. Значення v_2 легко знайти якщо рухатись з початку координат по OFE при зворотному відліку часу.

2). Випадок, коли $\Delta_0 > (K + W) / (m_1 \lambda^2)$. Якщо серед траєкторій типу HDLO (рис.3) не буде знайдено рішення, то за логікою з етапом розгону, необхідно здійснити перехід з кола J_7 на коло J_8 , яке лежить повністю в області допустимих значень. Це можна зробити по колу J_6 , причому з безліч траєкторій типу HFE треба вибрати таку, у якій дільниця EF мінімальний. Тривалість руху по J_8 визначається з умови, щоб швидкість візка в точці O була нулю.

Тривалість інших етапів процесу аналогічно тому, як це робилось на стадії розгону.

На основі викладених вище досліджень були розроблені алгоритми пошуку закону керування і складений пакет програм для ПК.

На рис.4 показані графіки перехідних процесів, де $F(t)$ – рушійне зусилля, y_2 – швидкість руху візка, Δ – відхилення вантажу від вертикальної осі. Розрахунок зроблений для таких параметрів крана: $m_1 = 7425$ кг, $m_2 = 6200$ кг, $K = 22620$ Н, $W = 13070$ Н, $\Delta_0 = 0,55$ м, $S = 14$ м, $l = 6,2$ м, $v_0 = 1,77$ м/с.

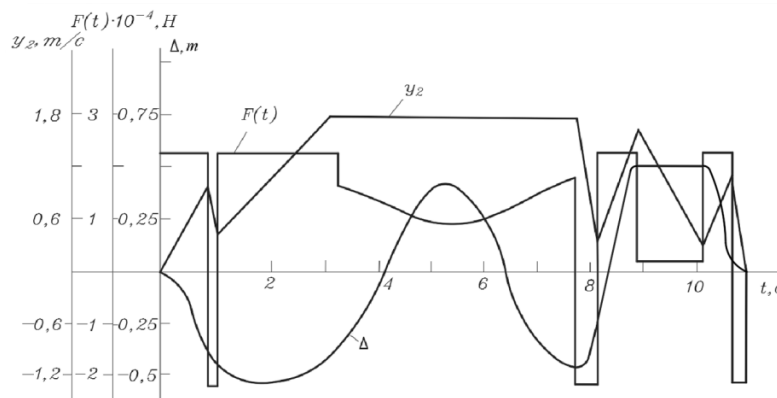


Рис. 4. Графіки перехідних процесів

Цей варіант відноситься до випадку, коли

$$(K - W) / (m_1 \lambda^2) < \Delta_0 < (K + W) / (m_1 \lambda^2)$$

Отриманий закон керування може бути реалізований на крані за допомогою системи автоматичного керування на базі мікропроцесорної техніки. Виходячи з характеру зміни рушійної сили можна зробити висновок, що найкращими приводами для реалізації отриманих законів керування є частотний, тиристорний або гідрооб'ємний.

Список використаних джерел

1. Свіргун В.П., Свіргун В.В., Антощенко Р.В. Мікропроцесорна система керування мостовим краном на базі Ардуіно. . «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» № 23, 2022. - С. 87-91.
2. Свіргун В.П., Свіргун О.А. Проблеми, що виникають при автоматизації кранів мостового типу. «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» № 21, 2020. - С. 92-96.
3. Григоров О.В., Свіргун В.П., Аніщенко Г.О. Оптимальне керування підйомно-транспортними машинами - Optimale Steuerung für Hebe- und Fördermaschinen : навч. посіб. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – 240 с.
4. Антощенко Р. В., Свіргун В. П., Свіргун О. А., Свіргун В. В. Аналіз роботи мікропроцесорної системи керування мостовим краном з використанням оптимальних

законів керування. Український журнал прикладної економіки та техніки. 2024. Том 9. № 2. С. 107 – 112.

5. Gamkrelidze R. V. L. S. Pontryagin selected works volume 4: The Mathematical Theory of Optimal Processes. CRC Press, 2019. 519 p.

6. Рижков О.М., Кондратенко І.П., Толочко О.І., Стяжкін В.П. Шляхи побудови системи автоматичного керування краном-маніпулятором. XXIV міжнародна конференція з автоматичного керування: Автоматика-2017, м. Київ, Україна, 13-15 вересня, 2017. С. 104-105.

7. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. Динамічна оптимізація механізму підйому вантажу мостових кранів: монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2015. 197 с.

8. Aksjonov A., Vodovozov V., Petlenkov E., Three-Dimensional Crane Modelling and Control Using Euler-Lagrange State-Space Approach and Anti-Swing Fuzzy Logic. Electrical, Control and Communication Engineering. 2015. №9(1). С. 5-13.

9. Kwon D., Eom M., Chwa D. Anti-Sway Control of the Overhead Crane System using HOSM Observer. J Electr Eng Technol. 2016. №11, С. 1921-1928.

10. Habibi, H., O'Connor, W.: Payload motion control of rotary gantry and luffing cranes using mechanical wave concepts. Transactions of the Institute of Measurement and Control, Vol. 39 (11), 1649-1662, 2017.

11. Liyana, R. Control strategies for crane systems: A comprehensive review / R. Liyana, Z. Mohamed, M.A. Auwalu, H.I. Jaafar, I. M. Lazim // Mechanical Systems and Signal Processing. Volume 95, 2017. P. 1-23.

12. Fang, Y.; Ma, B.; Wang, P.; Zhang, X. A Motion Planning-Based Adaptive Control Method for an Underactuated Crane System. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2012, 20, 241–248.

13. Pezeshki, S.; Badamchizadeh, M.A.; Ghiasi, A.R.; Ghaemi, S. Control of Overhead Crane System Using Adaptive Model-Free and Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controllers. J. Control Autom. Electr. Syst. 2015, 26, 1–15.

14. Sun, N.; Wu, Y.; Chen, H.; Fang, Y. An energy-optimal solution for transportation control of cranes with double pendulum dynamics: Design and experiments. Mech. Syst. Signal Process. 2018, 102, 87–101.

15. Shi, H.; Li, G.; Bai, X.; Huang, J. Research on Nonlinear Control Method of Underactuated Gantry Crane Based on Machine Vision Positioning. Symmetry 2019, 11, 987.

16. Kolar B., Rams H., and Schlacher K. "Time-optimal flatness based control of a gantry crane," Control Engineering Practice, vol. 60, pp. 18–27, 2017.

17. Kimmerle, S-J. Gerds, M., Herzog, R.: Optimal control of an elastic crane trolley load system a causes study for optimal control of coupled ode pde systems. Mathematical and Computer Modelling of Dynamic Systems, Vol. 24, 182-206, 2018.

18. Smoczek J., Szpytko J., Particle swarm optimization-based multivariable generalized predictive control for an overhead crane, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 22, 1, 258-268 (2017)

19. Muhammad A. K. Modeling and a Control Strategy for Gantry Crane Systems J. Teknologi 13 No. 4 2011.

References

1. Svirhun V.P, Svirhun V.V., Antoshchenkov R.V. Mikroprotsesorna systema keruvannia mostovym kranom na bazi Arduino. . «Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv» № 23, 2022. - S. 87-91.

2. Svirhun V.P., Svirhun O.A. Problemy, shcho vynykaiut pry avtomatyzatsii kraniv mostovoho typu. «Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv» № 21, 2020. - S. 92-96.

3. Hryhorov O.V., Svirhun V.P., Anishchenko H.O. Optymalne keruvannia pidiomno-transportnymy mashynamy - Optimale Steuerung für Hebe- und Fördermaschinen : navch. posib. – Kh. : NTU «KhPI», 2014. – 240 s.
4. Antoshchenkov R. V., Svirhun V. P., Svirhun O. A., Svirhun V. V. Analiz roboty mikroprotsesornoï systemy keruvannia mostovym kranom z vykorystanniam optymalnykh zakoniv keruvannia. Ukrainskyi zhurnal prykladnoï ekonomiky ta tekhniky. 2024. Tom 9. № 2. S. 107 – 112.
5. Gamkrelidze R. V. L. S. Pontryagin selected works volume 4: The Mathematical Theory of Optimal Processes. CRC Press, 2019. 519 r.
6. Ryzhkov O.M., Kondratenko I.P., Tolochko O.I., Stiazhkin V.P. Shliakhy pobudovy systemy avtomatychnoho keruvannia kranom-manipulatorom. XXIV mizhnarodna konferentsiia z avtomatychnoho keruvannia: Avtomatyka-2017, m. Kyiv, Ukraina, 13-15 veresnia, 2017. S. 104-105.
7. Loveikin V.S., Romasevych Yu.O. Dynamichna optymizatsiia mekhanizmu pidiomu vantazhu mostovykh kraniv: monohrafiia. Kyiv : TsP «Komprynt», 2015. 197 s.
8. Aksjonov A., Vodovozov V., Petlenkov E., Three-Dimensional Crane Modelling and Control Using Euler-Lagrange State-Space Approach and Anti-Swing Fuzzy Logic. Electrical, Control and Communication Engineering. 2015. №9(1). S. 5-13.
9. Kwon D., Eom M., Chwa D. Anti-Sway Control of the Overhead Crane System using HOSM Observer. J Electr Eng Technol. 2016. №11, S. 1921-1928.
10. Habibi, H., OConnor, W.: Payload motion control of rotary gantry and luffing cranes using mechanical wave concepts. Transactions of the Institute of Measurement and Control, Vol. 39 (11), 1649-1662, 2017.
11. Liyana, R. Control strategies for crane systems: A comprehensive review / R. Liyana, Z. Mohamed, M.A. Auwalu, H.I. Jaafar, I. M. Lazim // Mechanical Systems and Signal Processing. Volume 95, 2017. P. 1-23.
12. Fang, Y.; Ma, B.; Wang, P.; Zhang, X. A Motion Planning-Based Adaptive Control Method for an Underactuated Crane System. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2012, 20, 241–248.
13. Pezeshki, S.; Badamchizadeh, M.A.; Ghiasi, A.R.; Ghaemi, S. Control of Overhead Crane System Using Adaptive Model-Free and Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controllers. J. Control Autom. Electr. Syst. 2015, 26, 1–15.
14. Sun, N.; Wu, Y.; Chen, H.; Fang, Y. An energy-optimal solution for transportation control of cranes with double pendulum dynamics: Design and experiments. Mech. Syst. Signal Process. 2018, 102, 87–101.
15. Shi, H.; Li, G.; Bai, X.; Huang, J. Research on Nonlinear Control Method of Underactuated Gantry Crane Based on Machine Vision Positioning. Symmetry 2019, 11, 987.
16. Kolar B., Rams H., and Schlacher K. “Time-optimal flatness based control of a gantry crane,” Control Engineering Practice, vol. 60, pp. 18–27, 2017.
17. Kimmerle, S-J. Gerds, M., Herzog, R.: Optimal control of an elastic crane trolley load system a causes study for optimal control of coupled ode pde systems. Mathematical and Computer Modelling of Dynamic Systems, Vol. 24, 182-206, 2018.
18. Smoczek J., Szpytko J., Particle swarm optimization-based multivariable generalized predictive control for an overhead crane, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 22, 1, 258-268 (2017)
19. Muhammad A. K. Modeling and a Control Strategy for Gantry Crane Systems J. Teknologi 13 No. 4 2011.

Отримано: 02.04.2026. Прийнято: 13.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Мітяшкіна Т. Ю.

ORCID iD: 0000-0001-8281-702X

E-mail: tatiana1971@ukr.net

Міленін А. М.

ORCID iD: 0000-0003-3521-1652

Кісь-Коркіщенко Л. В.

ORCID iD: 0000-0001-5380-8052

Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ ТА STEM- ТЕХНОЛОГІЇ В НАВЧАННІ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.149>

УДК: 378.147:004:62

Мітяшкіна Т. Ю., Міленін А. М., Кісь-Коркіщенко Л. В. **Інноваційні методи та STEM-технології в навчанні студентів інженерних спеціальностей**

Анотація. Система інженерної освіти на сучасному етапі зазнає істотних змін, зумовлених інтенсивним розвитком цифрових технологій, автоматизацією виробничих процесів і трансформацією вимог ринку праці в умовах Індустрії 4.0. Традиційні освітні моделі не завжди забезпечують формування у здобувачів освіти комплексу професійних, цифрових і міждисциплінарних компетентностей, необхідних для успішної професійної діяльності.

У статті розглянуто інноваційні та інтерактивні методи навчання, STEM-технології й сучасні цифрові інструменти як дієвий механізм підготовки майбутніх інженерів.

Проаналізовано можливості проєктного та проблемно-орієнтованого навчання, гейміфікації, використання віртуальної й доповненої реальності, систем управління навчанням та інструментів штучного інтелекту.

Доведено, що впровадження зазначених підходів позитивно впливає на рівень мотивації студентів, розвиток критичного мислення, практичних умінь і готовність до професійної самореалізації.

Ключові слова: інженерна освіта, інноваційні методи навчання, STEM-освіта, інтерактивне навчання, цифрові технології, Індустрія 4.0.

Mitiashkina T. Y., Milenin A. M., Kis-Korkishchenko L. V. **Innovative methods and STEM technologies in advanced engineering students**

Abstract. At the present stage, engineering education is undergoing significant transformations driven by rapid digitalization, automation of production processes, and changes in labor market requirements under Industry 4.0. Traditional educational models often fail to ensure the development of a full range of professional, digital, and interdisciplinary competencies required for successful engineering practice.

This article examines innovative and interactive teaching methods, STEM technologies, and modern digital tools as effective means of training future engineers. Particular attention is paid to project-based and problem-based learning, gamification, the use of virtual and augmented reality, learning management systems, and artificial intelligence tools. It is substantiated that the implementation of these approaches enhances student motivation, promotes critical thinking, develops practical skills, and increases readiness for professional self-realization.

Keywords: *engineering education, innovative teaching methods, STEM education, interactive learning, digital technologies, Industry 4.0.*

Постановка проблеми

Підготовка висококваліфікованих фахівців інженерних спеціальностей є стратегічним завданням системи вищої освіти. Сучасний інженер повинен не лише володіти фундаментальними теоретичними знаннями, а й бути здатним застосовувати їх у практичній діяльності, працювати з цифровими технологіями, аналізувати складні технічні ситуації та приймати обґрунтовані інженерні рішення.

Особливою актуальністю в сучасній інженерній освіті відзначається питання кількісної оцінки ефективності впровадження інтерактивних та STEM-орієнтованих методів навчання. Незважаючи на численні теоретичні обґрунтування переваг активних методів, відсутні чіткі кількісні критерії, що дозволили б обґрунтовано оцінювати вплив конкретних педагогічних технологій (зокрема VR/AR, гейміфікації, проектного навчання) на розвиток ключових компетентностей майбутніх інженерів. Встановлення таких критеріїв є необхідною умовою для планування освітнього процесу, оптимізації методологічних підходів і підвищення результативності підготовки фахівців, що відповідають вимогам ринку праці в умовах Індустрії 4.0.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Останні наукові дослідження доводять, що інтерактивне навчання та впровадження цифрових освітніх технологій суттєво підвищують рівень засвоєння знань та розвиток практичних навичок студентів технічних спеціальностей. Зокрема, PISA та ін. продемонстрували статистично значущу перевагу активних методів над традиційними формами навчання у розвитку критичного мислення та аналітичних умінь студентів у STEM-предметах. Аналогічно, дослідження OECD показують, що інтеграція VR/AR-технологій у навчальний процес дозволяє моделювати складні інженерні ситуації та покращує мотивацію до навчання. Проте, попри позитивні результати, відсутні узгоджені наукові підходи до кількісної оцінки ефективності таких технологій у систематичному освітньому процесі [1,6,7]. Це визначає наукову новизну та практичну значущість подальших досліджень у цій сфері.

Формування мети дослідження

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та аналіз ефективності інноваційних методів навчання і STEM-технологій у формуванні професійних компетентностей студентів інженерних спеціальностей, а також визначення умов їх результативного впровадження в освітній процес.

Досягнення поставленої мети передбачає дослідження впливу цифрових технологій (зокрема віртуальних лабораторій, онлайн-платформ і мобільних застосунків), проектних і кейс-орієнтованих підходів, змішаного навчання, а також групових та інтерактивних форм організації освітньої діяльності на розвиток практичних навичок, комунікативних компетентностей і здатності до командної роботи студентів.

Результати досліджень

STEM включає знання, вміння та навички, які виробляються спільно на перетині декількох предметних областей.

Дослідження показують, що використання елементів STEM-технологій надає можливості для більш актуального, менш фрагментованого та стимулюючого досвіду для студентів [1,3]. Інші переваги, які можна відзначити, полягають у тому, що

використання елементів STEM-технологій орієнтоване на те, що у студентів покращуються навички мислення на рівні, пов'язаному із реальним вирішенням проблем. Деякі переваги використання елементів STEM-технологій включають те, що студенти можуть краще вирішувати завдання, використовуючи при цьому різні технології.

Подолання окреслених викликів вимагає переходу від фрагментарного використання технологій до системних моделей навчання. У зв'язку з цим зростає роль інноваційних методів навчання, що передбачають активну участь студентів у пізнавальному процесі. STEM-освіта як інтегрований підхід об'єднує природничі науки, технології, інженерію та математику, створюючи умови для формування цілісного професійного мислення й наближення навчання до реальних умов майбутньої професійної діяльності.

Існує безліч проблем [2], з якими стикаємося під час підготовки студентів до використання елементів STEM-технологій у педагогічній діяльності: по-перше, підготовка студентів, заснована на вирішенні стандартизованих тестів, які не готують їх до реального світу; по-друге, викладання з використанням STEM-технологій вимагає великої кількості матеріалів, для яких у процесі навчання не завжди буде місця; також, можливість знаходження різних ресурсів для використання STEM-технологій у своїй педагогічній практиці; складність у використанні STEM-технологій при створенні зручної та ефективної системи роботи, яка б представляла соціально-інтерактивний та захоплюючий навчальний процес.

Теоретичні засади STEM-освіти:

STEM-освіта базується на міждисциплінарній інтеграції знань і орієнтується на практичне застосування теоретичних положень. На відміну від традиційної предметної моделі навчання, STEM-підхід передбачає розв'язання реальних або наближених до професійної практики завдань, що стимулює розвиток інженерного мислення.

До ключових принципів STEM-освіти належать інтеграція теорії та практики, дослідницька діяльність, проєктна робота та командна взаємодія. Реалізація цих принципів забезпечує формування у студентів навичок аналізу, експериментування, комунікації та колективного прийняття рішень.

Інтерактивні методи навчання в інженерній підготовці:

Інтерактивні методи навчання спрямовані на активізацію пізнавальної діяльності студентів і створення умов для їхньої залученості до освітнього процесу. Під час використання діалогічних, проєктних методів і кейс-стадії форм навчання студенти мають можливість обмінюватися думками, аргументувати власну позицію, аналізувати альтернативні підходи та спільно знаходити оптимальні рішення.

Особливістю інтерактивного навчання є зміна ролі викладача, який виконує функції координатора й наставника, створюючи умови для розвитку самостійності та ініціативності студентів, як це відбувається на індивідуально-практичних заняттях з САД-системами у ДБТУ.

Кожне завдання організовано у вигляді наборів комплексних заходів, які мають бути виконані протягом певного періоду часу у процесі навчання. До кожного завдання включаємо: Брифінг (На цій зустрічі учасників проєкту формуємо цілі та завдання проєкту, позиціонування, висловлюються побажання до кінцевого результату, обговорюються та затверджуються правила та вимоги, готуємо референси). Роботу з інформацією (Кожне завдання має унікальний інформаційний текст). Дослідження (Студенти проводять дослідження та представляють їх за допомогою онлайн-контенту. Інструкції, фотографії та відео допомагають виконувати практичні завдання. Обов'язковою умовою є застосування математичних, інженерних та художніх принципів у всіх дослідженнях.) Оцінювання (Кожне завдання супроводжується пакетом оцінювальних процедур).

Визначення проблеми дослідження (Це конкретне завдання, яке вирішуватимуть студенти. Введення критеріїв та обмежень.) Проектування (Члени команди проводять мозковий штурм обґрунтованих ідей про те, як вирішити проблему, і пропонують низку можливих рішень. Заохочуються творчі та нестандартні ідеї). Створення ескізів прототипу.

Сучасні STEM-технології та цифрові інструменти:

Застосування віртуальної та доповненої реальності відкриває нові можливості для візуалізації складних інженерних об'єктів і процесів. Такі технології сприяють кращому розумінню навчального матеріалу та дозволяють відпрацьовувати практичні навички в безпечному середовищі.

Інтеграція платформ штучного інтелекту та систем управління навчанням забезпечує персоналізацію освітнього процесу, адаптацію навчального контенту до індивідуальних потреб студентів і підвищення ефективності самостійної роботи.

Переваги та проблеми впровадження інноваційних підходів:

До основних переваг упровадження інноваційних методів і STEM-технологій належать підвищення мотивації студентів, розвиток практичних і міждисциплінарних компетентностей, а також наближення навчання до реальних умов професійної діяльності.

Водночас процес їх реалізації супроводжується певними труднощами, зокрема потребою в оновленні матеріально-технічної бази, підвищенні цифрової компетентності викладачів і адаптації навчальних програм до сучасних вимог.

Методика оцінювання ефективності STEM-орієнтованого навчання [2, с.353-356, 6, 7, 8]:

Оцінювання ефективності впровадження інтерактивних та STEM-технологій у навчальний процес здійснюється на основі комплексного підходу, що поєднує кількісні та якісні методи аналізу результатів навчальної діяльності студентів.

1. Формування вибірки

Дослідження проводиться на групах студентів інженерних спеціальностей, які навчаються за традиційною методикою (контрольна група) та з використанням інтерактивних і STEM-технологій (експериментальна група).

2. Збір емпіричних даних

Збір даних здійснюється шляхом:

- аналізу результатів поточного та підсумкового контролю знань;
- оцінювання виконання лабораторних і проєктних робіт;
- використання анкетування та самооцінювання студентів;
- експертного оцінювання рівня сформованості професійних компетентностей.

3. Кількісна оцінка

Для кожного критерію визначається середнє значення показників у контрольній та експериментальній групах. Рівень ефективності STEM-технологій оцінюється шляхом порівняльного аналізу отриманих результатів та визначення приросту показників.

4. Інтегральний показник ефективності

Загальна ефективність впровадження STEM-технологій визначається на основі інтегрального показника, який формується шляхом зваженого сумування нормалізованих значень окремих критеріїв. Вагові коефіцієнти визначаються з урахуванням пріоритетності компетентностей для інженерної підготовки.

5. Інтерпретація результатів

Отримані результати дозволяють:

- оцінити вплив окремих освітніх технологій на навчальні досягнення;
- визначити найбільш ефективні методи для формування професійних компетентностей;

• обґрунтувати доцільність подальшого впровадження STEM-підходів у навчальний процес інженерних спеціальностей.

На підставі аналізу даних та результатів індивідуально-практичних робіт студентів ДБТУ було розроблено бальну шкалу оцінювання критеріїв ефективності впровадження інтерактивних та STEM-технологій:

Критерій оцінювання	Показники вимірювання	Метод збору даних	Одиниці оцінювання
Навчальна активність студентів	Частота участі в обговореннях, кількість виконаних інтерактивних завдань, участь у командних проєктах	Спостереження, LMS-аналітика, чек-листи	% активних студентів, бал
Академічна успішність	Результати тестування, контрольних робіт, лабораторних та проєктних завдань	Поточний та підсумковий контроль	Середній бал, % успішності
Розвиток практичних навичок	Якість виконання лабораторних робіт, моделювання, симуляцій	Практичні роботи, VR/AR-тренажери	Бал, % виконання
Самостійність у навчанні	Здатність планувати та виконувати індивідуальні завдання	Аналіз самостійних робіт	Бал

Висновки

Інноваційні методи навчання та STEM-технології відіграють ключову роль у модернізації інженерної освіти. Результати дослідження засвідчують, що сучасна професійна освіта потребує комплексного поєднання різних інноваційних підходів. Зокрема, використання цифрових технологій, таких як віртуальні лабораторії, онлайн-платформи та мобільні застосунки, суттєво підвищує ефективність навчання, особливо у технічних спеціальностях.

Доведено ефективність проєктних методів і кейс-стадії у формуванні практичних навичок студентів, тоді як змішане навчання забезпечує оптимальне поєднання традиційних та цифрових освітніх форматів. Важливу роль відіграють групові та інтерактивні форми навчання, що сприяють розвитку комунікативних компетентностей, критичного мислення та здатності до командної роботи. Встановлено, що комплексне використання індивідуальних, групових і фронтальних методів створює найбільш сприятливі умови для формування професійних компетентностей майбутніх фахівців інженерного профілю.

Запропоновані підходи дозволяють урахувувати специфіку різних спеціальностей і індивідуальні освітні потреби студентів. Наведені у дослідженні приклади впровадження інноваційних методів можуть слугувати ефективною моделлю для модернізації освітнього процесу.

Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні можливостей використання штучного інтелекту у професійній освіті, розробці критеріїв оцінювання ефективності інноваційних методів у довгостроковій перспективі, а також у дослідженні впливу гейміфікації на мотивацію та навчальні результати студентів. Подальший розвиток STEM-освіти потребує системного підходу, спрямованого на вдосконалення методичного забезпечення, розширення практики використання сучасних освітніх технологій та інтеграцію інновацій у підготовку конкурентоспроможних фахівців.

Список використаних джерел

1. Міленін А.М., Мітяшкіна Т.Ю. Роль графічних і геометричних дисциплін у підготовці фахівців архітектурно-будівельного профілю// Scientific research: modern challenges and future prospects. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Munich, Germany. 2024. pp. 392-401. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-research-modern-challenges-and-future-prospects-16-18-12-2024-myunhen-nimechchina-arhiv/>
2. Міленін А.М., Мітяшкіна Т.Ю., Денисенко С.А. Роль дисципліни "Інженерна графіка" у закладах вищої освіти та пошук інноваційних методів її викладання // Topical aspects of modern scientific research. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2023. p. 353-357. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-23-25-11-2023-tokio-yaponiya-arhiv/>
3. OECD. Innovating Education and Educating for Innovation. Paris: OECD Publishing, 2016. https://www.oecd.org/en/publications/innovating-education-and-educating-for-innovation_9789264265097-en.html
4. Prince M. Does Active Learning Work? Journal of Engineering Education, 2004. 1-9 https://engr.ncsu.edu/wp-content/uploads/drive/1smSpn4AiHSh8z7a0MHDBwhb_JhcoLQmI/2004-Prince_AL.pdf
5. Іваній, І.В., Мехед, О.Д. Використання STEM технологій та засобів навчання у професійній освіті. Наукові записки. Серія: Педагогічні науки, 215, (2024). 42–45. <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2024-1-215-42-45>
6. Остапко, Л.О., Тройніна, С.О., Коробко, Ю.В. Роль інноваційних методів навчання в покращенні якості професійної освіти. Перспективи та інновації науки. Серія «Педагогіка», Серія «Психологія», Серія «Медицина», 15(33), (2023). 424–435.
7. Sikandar, A. John Dewey and His Philosophy of Education. Journal of Education and Educational Developmen, 2(2), (2016). 191 – 201. https://www.researchgate.net/publication/314967156_John_Dewey_and_His_Philosophy_of_Education
8. B.J. Morris, W. Owens, K. Ellenbogen, et al. Measuring informal STEM learning supports across contexts and time. IJ STEM Ed 6, 40, 2019. doi:10.1186/s40594-019-0195-y https://www.researchgate.net/publication/337557725_Measuring_informal_STEM_learning_supports_across_contexts_and_time
9. Annemie Struyf, Haydée De Loof, Jelle Boeve-de Pauw & Peter Van Petegem. Students' engagement in different STEM learning environments: integrated STEM education as promising practice? Published online: 09 May 2019. PP.1387-1407. <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1607983>
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09500693.2019.1607983>
10. Nayif Awad Exploring STEM integration: assessing the effectiveness of an interdisciplinary informal program in fostering students' performance and inspiration // Research in Science and Technological Education June 2021 41(3):1-25 DOI:10.1080/02635143.2021.1931832
https://www.researchgate.net/publication/352121976_Exploring_STEM_integration_assessing_the_effectiveness_of_an_interdisciplinary_informal_program_in_fostering_students_performance_and_inspiration

References

1. Milenin, A. M., Mitiashekina, T. Y. (2024). Rol hrafichnykh i heometrychnykh dystsyplin u pidhotovtsi fakhivtsiv arkhitekturnoho ta budivelnoho [The role of graphic and

geometric disciplines in the training of specialists in architecture and construction]. Scientific research: modern challenges and future prospects. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Munich, Germany. pp. 392-401. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-research-modern-challenges-and-future-prospects-16-18-12-2024-myunhen-nimechchina-arhiv/>

2. Milenin, A. M., Mitiashkina, T. Y., Denysenko, S. A. (2023). Rol dystsypliny "Inzhenerna hrafika" u zakladakh vyshchoi osvity ta poshuk innovatsiynykh metodiv yii vykladannia [The role of the "Engineering Graphics" discipline in higher education institutions and the search for innovative methods of its teaching]. Topical aspects of modern scientific research. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. pp. 353-357. URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-topical-aspects-of-modern-scientific-research-23-25-11-2023-tokio-yaponiya-arhiv/>

3. OECD. Innovating Education and Educating for Innovation. Paris: OECD Publishing, 2016. https://www.oecd.org/en/publications/innovating-education-and-educating-for-innovation_9789264265097-en.html

4. Prince M. Does Active Learning Work? Journal of Engineering Education, 2004. 1-9 https://engr.ncsu.edu/wp-content/uploads/drive/1smSpn4AiHSh8z7a0MHDBwhb_JhcoLQmI/2004-Prince_AL.pdf

5. Ivaniy, I.V., Mehed, O.D. The use of STEM technologies and teaching aids in vocational education. Scientific notes. Series: Pedagogical sciences, 215, (2024). 42–45. <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2024-1-215-42-45>

6. Ostapko, L.O., Troinina, S.O., Korobko, Y.V. The role of innovative teaching methods in improving the quality of vocational education. Prospects and innovations of science. Series "Pedagogy", Series "Psychology", Series "Medicine", 15(33), (2023). 424–435.

7. Sikandar, A. John Dewey and His Philosophy of Education. Journal of Education and Educational Developmen, 2(2), (2016). 191 – 201. https://www.researchgate.net/publication/314967156_John_Dewey_and_His_Philosophy_of_Education

8. B.J. Morris, W. Owens, K. Ellenbogen, et al. Measuring informal STEM learning supports across contexts and time. IJ STEM Ed 6, 40, 2019. doi:10.1186/s40594-019-0195-y https://www.researchgate.net/publication/337557725_Measuring_informal_STEM_learning_supports_across_contexts_and_time

9. Annemie Struyf, Haydée De Loof, Jelle Boeve-de Pauw & Peter Van Petegem. Students' engagement in different STEM learning environments: integrated STEM education as promising practice? Published online: 09 May 2019. PP.1387-1407. <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1607983>
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09500693.2019.1607983>

10. Nayif Awad Exploring STEM integration: assessing the effectiveness of an interdisciplinary informal program in fostering students' performance and inspiration // Research in Science and Technological Education June 2021 41(3):1-25 DOI:10.1080/02635143.2021.1931832

https://www.researchgate.net/publication/352121976_Exploring_STEM_integration_assessing_the_effectiveness_of_an_interdisciplinary_informal_program_in_fostering_students_performance_and_inspiration

Отримано: 01.04.2026. Прийнято: 13.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Поляшенко С. О.

ORCID iD: 0000-0003-0133-4902

E-mail: s.polyashenko@gmail.com

Єсіпов О. В.

ORCID iD: 0000-0002-7395-2892

Манойло В. М.

ORCID iD: 0000-0003-2208-4404

Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЗАГЛИБЛЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ КОРЕНЕЗБИРАЛЬНОЇ МАШИНИ В ПРОЦЕСІ ЗБИРАННЯ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.156>

УДК 631.356

Поляшенко С. О., Єсіпов О. В., Манойло В. М. Дослідження системи автоматичного регулювання заглиблення робочих органів коренезбиральної машини в процесі збирання

Анотація. Розвиток сучасного машинобудування характеризується підвищенням потужностей коренезбиральних машин, що призводить до інтенсифікації виконання технологічного процесу і більш жорстких умов експлуатації самих машин. Окрім того, достатньо актуальною залишається проблема зменшення втрат та пошкоджень коренеплодів і забезпечення надійності виконання операції викопуючими органами коренезбиральних машин, серед яких особливе місце займають диски копачів. Обґрунтована функціональна схема системи автоматичного регулювання заглиблення робочих органів. Визначені і обґрунтовані раціональні параметри системи. Система стійка при робочій швидкості машини в діапазоні 6 – 8 км/год і заданій глибині ходу викопуючих органів в діапазоні 6 – 9 см. Час запізнювання системи 0,1 с, середня споживана потужність від гідросистеми машини 2,2 кВт, середньоквадратичне відхилення глибини ходу викопуючих органів від заданої склало 0,6 см. Агротехніческая оцінка показала зменшення кількості втрат коренів на 1,5% в порівнянні з серійною коренезбиральною машиною.

Ключові слова: коренезбиральна машина, система автоматичного регулювання заглиблення робочих органів., глибина ходу робочих органів, зменшення втрат коренеплодів.

Polyashenko S. O., Yesipov O. V., Manoilo V. M. Research on the system of automatic regulation of the deepening of the working parts of the root harvesting machine during the harvesting process

Abstract. The development of modern mechanical engineering is characterized by an increase in the capacity of root harvesting machines, which leads to an intensification of the technological process and more stringent operating conditions for the machines themselves. In addition, the problem of reducing losses and damage to root crops and ensuring the reliability of the operation by the digging bodies of root harvesting machines, among which the digging disks occupy a special place, remains quite relevant. The functional scheme of the system for automatic regulation of the deepening of the working bodies is substantiated. The rational parameters of the system are determined and substantiated. The system is stable at the operating speed of the machine in the range of 6 - 8 km/h and the specified depth of the digging tools in the range of 6 - 9 cm. The system delay time is 0,1 s, the average power consumption from the machine's hydraulic system is 2,2 kW, the root mean square deviation of the digging

tools' depth from the specified one was 0,6 cm. The agrotechnical assessment showed a reduction in the number of root losses by 1,5% compared to the serial root harvester.

Keywords: root harvester, system for automatic adjustment of the working tools' depth, depth of the working tools' depth, reduction of root crop losses.

Постановка проблеми

Збирання коренеплодів цукрових буряків є одним з найбільш трудомістких агротехнічних процесів сільського господарства. Удосконалення технологічного процесу і машин для збирання цукрових буряків є комплексною науково-технічною проблемою, вирішення якої повинно базуватися не тільки на підставі пошуку нових технічних рішень, а й теоретичному і експериментальному моделюванні технологічних і робочих процесів викопуючих робочих органів з метою аналізу і синтезу їх оптимальних параметрів.

Якісні показники збирання коренеплодів цукрових буряків коренезбиральними машинами в значній мірі залежать від досконалості виконання ними робочих процесів в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

В силу недосконалості процесу їх вилучення з ґрунту втрати можуть перевищувати межі, встановлені агротехнічні вимоги в 3 ... 5 разів, пошкодження - в 4 ... 5 разів [1]. Все це викликає необхідність подальшого пошуку і вдосконалення технологічних і робочих процесів та застосування різних типів викопуючих робочих органів бурякозбиральних машин в різних ґрунтово-кліматичних умовах.

Аналіз публікацій

Важливим фактором, який оказує значний вплив на якісні та енергетичні характеристики роботи коренезбиральних машин є підтримання встановленої глибини ходу робочих органів з заданою точністю. Зменшення глибини ходу робочих органів призводить до збільшення пошкодження і втрат збираемого врожаю. Пошкодження і втрати коренеплодів залежать від глибини ходу копачів [1, 2]. Це свідчить про те, що конструкція існуючих кореневикопуючих робочих органів сприяє заклинюванню коренеплодів в звужуючому руслі між дисками (КС-6Б) або вилками (РКС-6 і інші модифікації) і зумовлює їхнє пошкодження. З викопаними коренеплодами поступає значна маса землі, яку необхідно відділити за допомогою сепаруючих пристроїв, що також приводить до додаткових пошкоджень коренеплодів і втрат їхньої маси. У зв'язку з цим необхідне вдосконалення і розробка нових кореневикопуючих робочих органів, застосування яких дозволить наблизитися до нормативних вимог (5%) до сильнопошкоджених коренеплодів. У роботах [3, 4, 5] розглядаються гідравличні схеми пристроїв для автоматичного підтримання встановленої глибини ходу робочих органів, що дозволяють знизити втрати сировини.

Мета і постановка задачі

З метою зниження втрат коренеплодів цукрового буряку та зменшення його пошкодження створена система автоматичного регулювання заглиблення викопуючих органів для автоматичного підтримання заданої глибини ходу робочих органів коренезбиральної машини і отримані раціональні параметри системи.

Рішення задачі

Важливим фактором, який значно впливає на якісні та енергетичні показники роботи коренезбиральних машин є підтримка встановленої глибини ходу робочих органів із заданою точністю. Зменшення глибини ходу робочих органів викликає

збільшення втрат і пошкоджень зібраного врожаю. При збільшенні глибини ходу робочих органів збільшується навантаження на сепаруючих органах коренезбиральних машин, а також збільшується завантаження двигуна в зв'язку зі збільшенням завантаження сепаруючих органів коренезбиральної машини і опору з боку ґрунту на викопуючі органи.

На коренезбиральних машинах найбільше розповсюдження отримали механічні системи копіювання. Широке розповсюдження цих систем пояснюється їх відносною простотою і дешевизною в виготовленні та експлуатації. При цьому збільшення продуктивності збиральних машин можливо за рахунок збільшення ширини захвату і робочої швидкості. Механічні системи копіювання не в змозі забезпечити необхідні якісні та енергетичні показники роботи. Це пояснюється рядом особливостей механічних систем копіювання, які в основному обумовлені тим, що копіючі катки розташовані на значній відстані від робочих органів і на них прикладена велика частина ваги робочих органів. Отже, виникає необхідність створення систем копіювання, які забезпечують підтримку заданої глибини ходу робочих органів з більшою точністю при підвищених робочих швидкостях і збільшенні ширини захвату.

При аналізі систем автоматичного регулювання заглиблення (САРЗ) робочих органів коренезбиральної машини КС-6В враховано конструктивне виконання. В результаті аналізу варіантів можливого виконання САРЗ було виявлено, що кращим є гідромеханічне виконання системи, система повинна мати два незалежних контури регулювання, живлення яких здійснюється від одного джерела, а управління здійснюється від одного командного елемента.

Схема одного з контурів САРЗ приведена на рис. 1. Другий контур симетричний і розташований на протилежному боці рами копачів.

САРЗ містить датчик 1, гідророзподільник 2, силовий гідроциліндр 3, джерело гідралічного живлення 4, раму робочих органів 5, раму машини 6. На чутливий елемент (датчик) впливає випадкова функція $f(t)$, що визначається зміною рельєфу в зоні датчика по відношенню до положення рами машини. Вихідним сигналом є глибина ходу робочих органів по відношенню до рельєфу H , пов'язана лінійною залежністю зі зміщенням поршня гідроциліндра S . На датчику відбувається порівняння встановленої глибини H_0 , дійсної глибини ходу робочих органів H і вхідного сигналу $f_1(t)$, в результаті чого сигнал неузгодженості надходить на золотник гідророзподільника. Потік рідини Q від гідророзподільника викликає зміщення штока гідроциліндра S , завдяки чому відбувається зміщення робочих органів у вертикальній площині.

$f(t)$ – поточне значення рельєфу поверхні;

$H(t)$ – дійсне значення глибини ходу робочих органів;

H_0 – встановлена глибина ходу робочих органів;

ΔH – сигнал неузгодженості;

D – датчик;

Δh – переміщення золотника гідророзподільника;

$G.P.$ – гідророзподільник;

Q – подача робочої рідини до гідроциліндра;

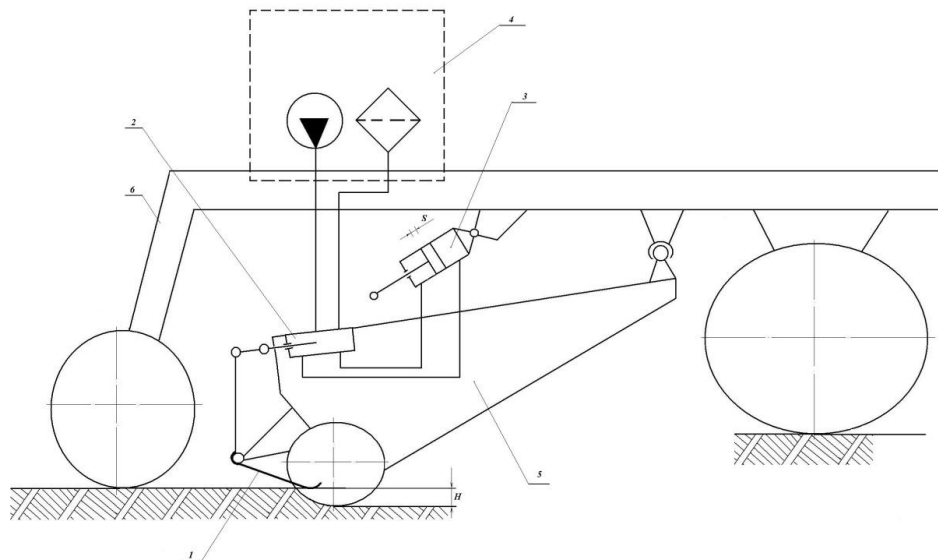


Рис. 1. Схема САРЗ на машині КС-6

На рис. 2 представлена функціональна схема САРЗ. На схемі наведено такі позначення:

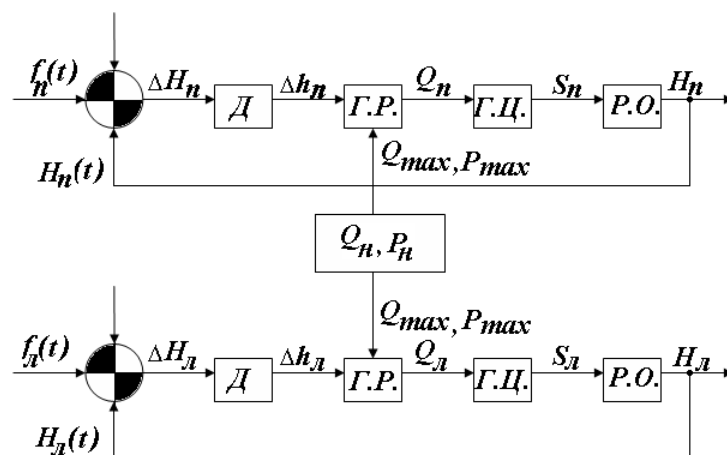


Рис. 2. Функціональна схема САРЗ:

$G.C.$ – силовий орган (гідроциліндр);

S – зміщення штока гідроциліндра;

$P.O.$ – робочий орган;

Q_{max} – максимальна продуктивність насоса джерела гідравлічного живлення;

P_{max} – максимальний тиск, що розвивається насосом.

Індексми n і l при перехідних величинах відзначаються відповідно правий і лівий контури.

Так як правий і лівий контури працюють незалежно один від одного і не кажуть взаємовпливу, при розробці алгоритму гідропідсилювачу САРЗ розглянемо роботу лише одного контуру. На суматор датчика одночасно надходять поточні значення рельєфу $f(t)$, дійсної глибини ходу робочих органів $H(t)$ і фіксоване значення заданої глибини ходу робочих органів H_o , тобто сигнал неузгодженості суматора визначається виразом:

$$\Delta H = H_0 + f(t) - H(t) \quad (1)$$

При $\Delta H = 0$ золотник гідророзподільника знаходиться в нейтральному положенні і, отже, робочі органи знаходяться на заданій глибині. Так як чутливий елемент здійснює жорстке копіювання рельєфу і вплив пружності тяг датчика дуже мало, можна сказати, що рівняння датчика є кинематическим і для малих відхилень має вигляд:

$$\Delta h = k_1 \cdot \Delta H \quad (2)$$

Відповідно до схеми, наведеної на рис.1, при збільшенні глибини ходу робочих органів щуп датчика по відношенню до рами копіїв переміщається вгору, а золотник гідророзподільника – вліво від нейтрального. Для відновлення заданої глибини ходу робочих органів раму копіїв необхідно підняти вгору, для чого робоча рідина подається в штокову порожнину. При зменшенні глибини ходу робочих органів золотник гідророзподільника переміщається вправо, а рідина для відновлення глибини ходу необхідно подати в безштокові порожнини. Домовимося переміщення від нейтрального положення золотника гідророзподільника вліво вважати негативним, а переміщення вправо - позитивним.

Отже:

$$k_3^- = \frac{1}{\Pi_{\text{эф}}} = \frac{4}{\pi(D^2 - d^2)} n p u - \Delta h \quad (3)$$

$$k_3^+ = \frac{1}{\Pi_{\text{эф}}} = \frac{4}{\pi D^2} n p u + \Delta h$$

З виразів (2) і (3) слід:

$$\frac{dS}{dt} = k_3 k_2 h_2, \quad (4)$$

$$k_2 k_3 = \frac{Q_{\text{max}}}{h_1 - \Delta h_1} \cdot \frac{\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{max}}}{Q_{\text{max}}} = \frac{\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{max}}}{h_1 - \Delta h_1} \quad (5)$$

Отже:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{max}}}{h_1 - \Delta h_1} \cdot h_2 \quad (6)$$

Помножимо обидві частини (6) на $\frac{S_{\text{max}}}{\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{max}}}$:

$$\frac{S_{\text{max}}}{\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\text{max}}} \cdot \frac{dS}{dt} = \frac{S_{\text{max}}}{h_1 - \Delta h_1} \cdot h_2, \quad (7)$$

де S_{max} – максимальний хід поршня при зміщенні золотника гідророзподільника на величину $h_1 \cdot S_{\text{max}} = \text{const}$, так як в САРЗ є зворотний зв'язок, завдяки якому переміщення рами копачів у вертикальній площині відбувається до тих пір, поки золотник

гідророзподільника встановиться в нейтральному положенні. У той же час $\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\max}$ має два фіксованих значення, так як практично постійно і визначається продуктивністю насоса гідросистеми, тобто $Q_{\max}$, а рідина подається або в штокову, або в безштокову порожнину гідроциліндра.

Вираз (7) можна представити у вигляді:

$$T_{1,2} \cdot \frac{dS}{dt} = k_1 h_2 \quad (8)$$

де $T_{1,2}$ – постійна часу; k_1 – коефіцієнт усилення.

З (5) випливає:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{\max} = \frac{Q_{\max}}{P_{\text{эф}}} \quad (9)$$

Тому:

$$T_{1,2} = \frac{S_{\max} \cdot P_{\text{эф}}}{Q_{\max}} \quad (10)$$

Для двостороннього гідроциліндра при виглиблених робочих органах

$$P_{\text{эф}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4},$$

а при заглибленні $P_{\text{эф}} = \frac{\pi D^2}{4}$, де D – діаметр поршня і d – діаметр штока.

З урахуванням знака переміщення штока золотника і $Q_{\max} \cong Q_n$

$$T_{1,2} = F_1(\Delta h) = \begin{cases} \frac{S_{\max} \cdot \pi D^2}{4Q_n} n \mu + \Delta h \\ \frac{S_{\max} \cdot \pi(D^2 - d^2)}{4Q_n} n \mu - \Delta h \end{cases} \quad (11)$$

На підставі отриманих співвідношень гідропідсилювач, що включає гідророзподільник і двосторонній гідроциліндр, буде описуватися наступною системою рівнянь:

$$h_2 = F(\Delta h),$$

$$T_{1,2} \cdot \frac{dS}{dt} = k_1 h_2 \quad (12)$$

Розрахунок і обґрунтування параметрів САРЗ

Для визначення величини вертикальної складової взаємодії копачів з ґрунтом в якості вихідних використовувалися дані, наведені у [6]. Сила реакції ґрунту з копачами залежить від окружної швидкості дисків, поступальної швидкості агрегату і фактичної

глибини ходу копачів і знаходиться в межах 2,2 – 2,9 кН для однієї пари копачів при щільності ґрунту 1,66 МПа і вологості 21,13%.

Отже, для викопуючої рами машини КС-6 ця величина буде знаходитися в межах 12 – 17 кН. Вага викопуючої рами близько 30 кН.

Характер зміни вертикальної складової взаємодії копачів з ґрунтом в залежності від глибини ходу представлений на графіку, наведеної на рис. 3. По осі ординат відкладена величина $R_k \cdot \frac{V_q}{V_a}$,

де R_k – реакція ґрунту на копачі, V_q – окружна швидкість диска, V_a – поступальна швидкість агрегату. По осі абсцис відкладена глибина копачів ходу h .

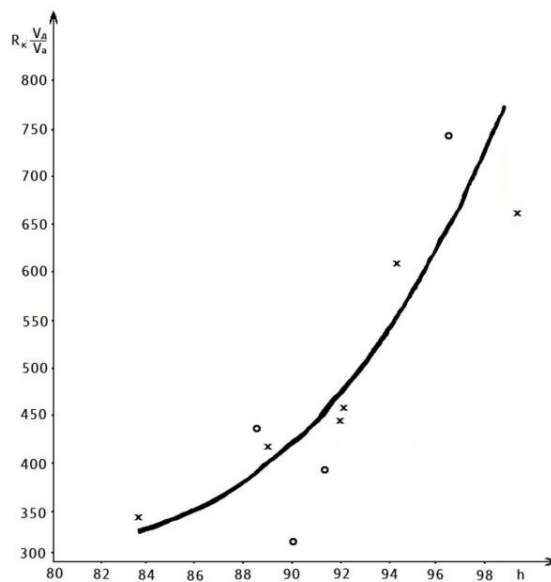


Рис. 3. Графік зміни вертикальної складової взаємодії копачів з ґрунтом в залежності від глибини ходу

З графіка видно, що при постійному відношенні $\frac{V_q}{V_a}$ величина вертикальної складової взаємодії копачів з ґрунтом зростає зі збільшенням глибини ходу копачів, що відповідає фізичному змісту характеру взаємодії копачів з ґрунтом.

Швидкість обробки сигналу від датчика робочим органом визначалася з урахуванням швидкості машини і максимального ухилу ґрунту, який має опрацювати система. Коренезбиральна машина працює на швидкості близько 7 км/год (1,94 м/с). За результатами польових досліджень виявлено, що максимальний кут нахилу ґрунту, який має відстежувати система, становить 10%. На підставі цього максимальна швидкість переміщення робочих органів у вертикальній площині складає 0,33 м/сек.

Тип гідроциліндра для САРЗ визначається з урахуванням продуктивності насоса гідросистеми, зусиль, які необхідно розвивати гідроциліндром для переміщення робочих органів, і швидкості переміщення робочих органів. У гідросистемі машини КС-6 застосований насос НШ-32У, продуктивність якого складає 47 л/хв. З урахуванням вищевказаних чинників в САРЗ застосований гідроциліндр Ц 100-13130011.

Розрахунок параметрів гідрокеруючого вентиля проводився наступним чином. Найбільша площа поперечного перерізу вікна:

$$f = \frac{Q}{\mu \cdot v \sqrt{\zeta}},$$

де Q – витрата через золотник, $Q = 47_{(\text{ном})} \div 57_{(\text{мах})}$ л/хв;
 μ – коефіцієнт витрати, 0,57-0,65;
 v – середня швидкість течії рідини в золотнику, практично $v = 4 \div 8$ м/с;
 ζ – коефіцієнт місцевого опору, для розподільників, $\zeta = 2 \div 4$

Найбільша площа поперечного перерізу вікна $f = 295 \text{ мм}^2$
Діаметр паска плунжера:

$$d = \frac{f}{\pi h},$$

де h – максимальний хід плунжера від відкриття вікна.
Для $h = 4$ мм діаметр паска плунжера складає $d = 25$ мм.
Діаметр шийки плунжера визначається зі співвідношення:

$$f \leq \frac{\pi}{4} (d^2 - d_1^2);$$
$$d_1 = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi d^2}{4} - f \right) \cdot 4}{\pi}} = 15,78 \text{ мм},$$

Діаметр шийки плунжера складає $d_1 = 15$ мм
Час перемикання розподільника Δt при $d = 25$; $2h = 8$;
 $Q_{\text{ном}} = 47 \text{ л/мин} = 783 \text{ см}^3/\text{сек}$; $\Delta t = 0,005 \text{ сек}$.

Зусилля, що розвивається джерелом гідроживлення для переміщення плунжера при $d = 25$ мм:

$F = 196,25 \text{ кгс}$ при $P = 4,0 \text{ МПа}$;
 $F = 294 \text{ кгс}$ при $P = 6,0 \text{ МПа}$.

У САРЗ застосований гідророзподільник ГА-34.000 з переливною і запобіжною секціями, номінальна витрата якого складає 50 л/хв. Зона нечутливості по переміщенню золотника становить ± 4 мм. Зона нечутливості САРЗ по переміщенню датчика для забезпечення якісної характеристики роботи системи повинна становити $\pm 2 \div 4$ мм. Отже, коефіцієнт передачі сигналу в прямому зв'язку повинен складати $K_{np} = 1 \div 2$.

Під час стендових випробувань зняті пролівовні характеристики гідравлічних елементів, застосованих в САРЗ. Перепад тиску для зворотного клапана в прямому напрямку складає $0,3 \div 0,4$ МПа. Перепад тиску на страгивання поршня силового гідроциліндра становить $0,5 \div 1,5$ МПа. Перепад тиску для гідрораспределителя ГО-34.000:

- при нейтральному положенні золотника гідророзподільника між входом і виходом $0,1 \div 0,15$ МПа;
- при зміщенні золотника в крайнє положення між входом і керуючим каналом $0,1 \div 0,15$ МПа.

Проведено порівняльні випробування двох варіантів систем: з гідрокеруючим клапаном в ланцюзі зв'язку гідророзподільників автоматичного регулювання та з використанням гідравлічних замків між гідророзподільниками автоматичного регулювання та відповідними гідроциліндрами. В результаті випробувань виявлено, що кращою є САРЗ з використанням гідравлічних замків.

Висновок

Випробування макетних зразків САРЗ підтвердили правильність обраних параметрів. Характер перехідного процесу системи апериодический. Система стійка при робочій швидкості машини в діапазоні 6 – 8 км/год і заданій глибині ходу викопуючих органів в діапазоні 6 – 9 см. Час запізнювання системи 0,1 с, середня споживана потужність від гідросистеми машини 2,2 кВт, середньоквадратичне відхилення глибини ходу викопуючих органів від заданої складо 0,6 см. Агротехніческая оцінка показала зменшення кількості втрат коренів на 1,5% в порівнянні з серійною коренезбиральною машиною.

Список використаних джерел

1. Поляшенко С.О. Підвищення якості коренеплодів цукрового буряка в технологічному процесі збирання / Поляшенко С. О., Єсіпов О.В., Жихарев М.В., Поляшенко В.С. // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХДТУСГ – Харків: ХДТУСГ, 2007. – Вип. 59. – т.2. – С. 35 – 41.
2. Механизация производства сахарной свеклы / под ред. Л.В. Погорелого. – 2-е изд., перераб. и доп. – К: Урожай, 1991. – 184 с.
3. Парфенов В.Я. К вопросу разработки модели объекта для системы автоматического регулирования заглубления выкапывающих органов корнеуборочной машины / В.Я. Парфенов // Сб. науч. трудов ВИСХОМ – М.: 1987. – С. 22 – 31.
4. Устройство для автоматического копирования рельефа грядки рабочими аппаратами А.с. № 307764 СССР, МКИ А01d 45/18; Заявлено 29.01.1968; Опубл. 01.06.1971, Бюл. № 21.
5. Устройство для автоматического поддержания заданой глубины хода рабочих органов корнеклубнеуборочной машины А.с. № 1136756 СССР, МКИ А01В 63/111; Заявлено 20.08.1982; Опубл. 30.01.1985, Бюл. № 4.
6. Звіт по темі № 13-36-80 (Розділ Б «Дослідження викопуючих робочих бурякозбиральних машин з метою вдосконалення і поліпшення якості їх роботи») – Харків, УкрНІСГОМ, 1985. – 132 с.
7. Калинин Є.І. Динаміка коренезбиральної машини з системою підтримання заданої глибини ходу робочих органів / Калинин Є.І., Поляшенко С.О., Єсіпов О.В. // 36. н. пр. - Інженерія природокористування № 2, Харків: ХДТУСГ, 2017. – С. 63 – 68.
8. Polyashenko S., Iesipov O., Manoylo V., Shushlyapin S., Horuzhenko T. Research of the system of automatic regulation of the deeping of the working bodies of the root harvesting machine in the harvesting process // Science, technology and global challenges. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2026. Pp. 155-165. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-technology-and-global-challenges-5-7-03-2026-tokio-yaponiya-arhiv>

References

1. Polyashenko S.O. Improving the quality of sugar beet roots in the technological process of harvesting / Polyashenko S. O., Iesipov O. V., Zhikharev M. V., Polyashenko V. S. // Mechanization of agricultural production: Bulletin of the KhDTUSG – Kharkiv: KhDTUSG, 2007. – Issue 59. – Vol. 2. – P. 35 – 41.
2. Mechanization of sugar beet production / edited by L. V. Pogorely. – 2nd ed., revised and supplemented – K: Urozhay, 1991. – 184 p.
3. Parfenov V. Ya. On the issue of developing an object model for a system of automatic regulation of the deepening of the excavating organs of the root harvester machine / V. Ya. Parfenov // Collection of scientific. of works of VYSHOM - M.: 1987. - C. 22 - 31.

4. Device for automatic copying of the relief of the bed by working devices A.s. № 307764 USSR, MKY A01d 45/18; Proclaimed on January 29, 1968; Publ. 01.06.1971, Bull. № 21.

5. Device for automatic maintenance of the specified depth of movement of the working bodies of the root-knot harvesting machine A.S. № 1136756 USSR, MKY A01B 63/111; Announced on August 20, 1982; Publ. 30.01.1985, Bull. № 4.

6. Report on the topic № 13-36-80 (Section B “Research on digging working beet harvesting machines with the aim of improving and improving the quality of their work”) – Kharkiv, UkrNIISGOM, 1985. – 132 p.

7. Kalinin E.I. Dynamics of a root harvesting machine with a system for maintaining a given depth of travel of working bodies / Kalinin E.I., Polyashenko S.O., Iesipov O.V. // Collection of scientific works - Environmental engineering № 2, Kharkiv: KhDTUSG, 2017. – P. 63 – 68.

8. Polyashenko S., Iesipov O., Manoylo V., Shushlyapin S., Horuzhenko T. Research of the system of automatic regulation of the deeping of the working bodies of the root harvesting machine in the harvesting process // Science, technology and global challenges. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2026. Pp. 155-165. URL: <https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-technology-and-global-challenges-5-7-03-2026-tokio-yaponiya-arhiv>

Отримано: 07.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Мигаль В. Д.¹

ORCID iD: 0000-0002-2308-760X

E-mail: prof.myhal@gmail.com

Аргун Ш. В.^{2,3}

ORCID iD: 0000-0001-6098-8661

E-mail: shasyana@gmail.com

Шевченко І. О.¹

ORCID iD: 0000-0002-1280-5290

E-mail: igorshvchnk@gmail.com

¹ Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

² Харківський національний
автомобільно-дорожній університет,
м. Харків, Україна

³ The Bartlett School of Sustainable
Construction, University College
London, London, United Kingdom

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ, ВИГОТОВЛЕННЯ Й ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАКТОРІВ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.166>

УДК 631.372:658.5

Мигаль В. Д., Аргун Ш. В., Шевченко І. О. Розробка методів підвищення якості проєктування, виготовлення й експлуатації тракторів

Анотація. Не зважаючи на те, що протягом останніх десятиліть вживаються різноманітні науково обґрунтовані заходи для підвищення якості вітчизняних тракторів, їх ресурс, технічна й екологічна надійність недостатні для забезпечення конкурентоздатності. Вирішення цих питань в існуючих дослідженнях здійснювалося з недостатнім урахуванням впливу всіх зовнішніх і внутрішніх факторів на ресурс тракторів. Проєктувальники тракторів не мають у своєму розпорядженні ефективних методів і рекомендацій щодо прийняття оптимальних рішень при конструюванні агрегатів і трактора в цілому на заданий ресурс. Одним із напрямків розв'язання цієї проблеми є використання діагностичної інформації, отриманої при дослідженні вібраційних параметрів тракторних механізмів. Такі параметри можуть служити універсальним показником технічного рівня проєктування і стану тракторів на всіх стадіях їх життєвого циклу. Це принципово новий підхід до комплексного розв'язання важливої наукової проблеми управління якістю проєктування й виготовлення тракторів, підвищення ефективності їх експлуатації.

У роботі детально розглядаються теоретичні, експериментальні та практичні аспекти визначення допустимої вібрації механізмів трактора і методи їх досягнення. Розроблені класи вібрації проєктованих тракторів з урахуванням заданого ресурсу, контролю вібрації тракторів на відповідність нормам вібрації при виробництві й експлуатації трактора.

Ключові слова: трактор, вібрація, оцінка якості, надійності, проєктування, виготовлення, експлуатація.

Mygal V. D., Agrun Shch. V., Shevchenko I. O. Development of methods to improve the quality of tractor design, manufacturing and operation

Abstract. Despite the fact that in recent decades various scientifically based measures have been taken to improve the quality of domestic tractors, their service life, technical and environmental reliability are insufficient to ensure competitiveness. The solution of these issues in existing studies was carried out with insufficient consideration of the influence of all external

and internal factors on the service life of tractors. Tractor designers do not have at their disposal effective methods and recommendations for making optimal decisions when designing units and the tractor as a whole for a given service life. One of the directions for solving this problem is the use of diagnostic information obtained when studying the vibration parameters of tractor mechanisms. Such parameters can serve as a universal indicator of the technical level of design and the condition of tractors at all stages of their life cycle. This is a fundamentally new approach to a comprehensive solution to the important scientific problem of managing the quality of design and manufacturing of tractors, increasing the efficiency of their operation.

The paper examines in detail the theoretical, experimental and practical aspects of determining the permissible vibration of tractor mechanisms and methods for achieving them. Vibration classes of designed tractors have been developed taking into account the specified resource, control of tractor vibration for compliance with vibration standards during tractor production and operation.

Keywords: tractor, vibration, quality assessment, reliability, design, manufacturing, operation.

Актуальність проблеми

В сільському господарстві трактори виконують до 80 % технологічних операцій. Від якості і надійності тракторів залежить собівартість продукції рослинництва і ефективності агропромислового виробництва. Порівняльний аналіз даних контрольних випробувань на машинно-випробувальних станціях [1-3] показав, що рівень безвідмовності європейських та американських тракторів в кілька разів вище, ніж вітчизняних і російських. Так, у російських тракторів напрацювання на складну відмову знаходяться в діапазоні 415-470 мотогодин., тоді як у зарубіжних тракторів аналогічні показники – в діапазоні 1480-5500 мотогодин. Ці дані свідчать про необхідність підвищення якості проєктування і технології виробництва вітчизняних тракторів з врахуванням збільшення транспортної швидкості підвищення надійності і динамічних властивостей тракторів.

Рішення цих задач вимагає оптимізації податливості та контактної жорсткості зачеплень деталей, крутильних і згинних резонансних коливань зубчастих передач, валів, підшипникових вузлів, які діагностуються вібраційними методами.

В цілому підвищення надійності та ресурсу трактора можна визначати комплексом фактичних станів (K), удосконаленням якості проєктування (Π) і доводки (D), якістю виготовлення і складання (I), введенням в експлуатацію (B) і складністю умов експлуатації (E):

$$K = f(\Pi, D, I, B, E) \pm F. \quad (1)$$

Фактично кожна складова якості трактора (K) має n діючих невідомих структурних параметрів стану та похибок їх визначення (F).

Таким чином, властивості структури механізмів конкретного трактора на стадіях Π , D , I , B можуть бути охарактеризовані великим набором конструктивних, технологічних і функціональних параметрів фактичного стану виготовленого трактора.

Складна система механізмів трактора, зв'язків, робочих процесів, різноманітні складальних і геометричних параметрів, умови експлуатації визначають власні частоти та динамічний стан механізмів і можуть надавати кожному трактору індивідуальних властивостей. Ідентифікація цих властивостей, при проєктуванні, доводка і виготовлення тракторів вимагають проведення багатьох видів діагностики, але найбільш ефективним з яких є комплексний показник, вібраційні характеристики, допустимі вібрації трактора [3, 4].

Аналіз останніх досліджень

Вібраційні методи контролю і діагностування енергетичного обладнання широко використовуються. Теорія і практика вивчення і нормування вібрації за критеріями віброміцності та вібростійкості енергетичного обладнання має більш ніж сторічний досвід. Для ефективної оцінки якості проектування і експлуатації електричних машин, газоперекачувального обладнання, корабельного обладнання, станків, зубчатих передач і підшипників кочення розроблені стандарти на норми вібрації [4-12]. Установленням критеріїв допустимої вібрації в цих стандартах слугує статистичне збирання відомостей про події, розгляд аварій спричинених вібрацією, а також швидкої відмови механізмів аналогів. За норми і класи вібрації енергетичного обладнання приймалося як зниження досягнутих значень вібрації в певній смузі частот.

Трактор багаторежимна машина зі складними системами механізмів, джерел вібрації і умов експлуатації. Розробка вібраційних методів діагностування трактора вимагає значного удосконалення досягнутого досвіду [4-12]. Таким розробкам присвячені роботи [3-4, 13-16].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка методів оцінки якості тракторів за їх вібраційними характеристиками шляхом контролю вібрації під час проектування, виготовлення й експлуатації, що дає можливість забезпечити заданий ресурс і надійність тракторів.

Результати досліджень

1 Методи досліджень

Вібрація трактора є природною реакцією на реально діючі внутрішні та зовнішні збуджувальні сили. Тому вібраційна діагностика стає ключовим інструментом оцінювання технічного стану трактора на стадіях проектування і доводки технологій виробництва та експлуатації [3-4].

Для оцінки технічного стану трактора використані основні характеристики вібраційних сигналів [1]:

- пропорційна залежність зміни вібрації від навантаження і частоти обертання;
- зазорів;
- значень кінематичних і геометричних параметрів погрішностей;
- збудження і швидкого поширення вібрації. У вібраційному сигналі міститься

вся об'єктивна інформація про всі компоненти, що визначають структурні, функціональні та динамічні характеристики трактора. Ці властивості вібраційних сигналів дають можливість з використанням віброаналізаторів і комп'ютерної техніки спостерігати у реальному часі й порівнювати реакцію всіх компонентів структурних, функціональних і динамічних властивостей усіх механізмів трактора, пов'язаних кореляційною залежністю, на зміну конструкції, технології виготовлення, робочих процесів, режимів роботи, навантажень, швидко отримувати інформацію про вихідний чи технічний стан трактора.

Методологія системного підходу до підвищення якості тракторів на базі єдиного показника (їх вібраційних характеристик) ґрунтується на нормуванні вібрації трактора за критерієм забезпечення заданого ресурсу і надійності на стадіях проектування і, згідно з критерієм отримання запроєктованої якості, на стадіях доводки конструкції, виготовлення й експлуатації.

Основним критерієм прогнозування якості проектування є клас вібрації трактора, а доказами якості доведення – усунення нестабільності вібрації і резонансних явищ,

забезпечення контролепридатності до вібраційного діагностування на стадіях виготовлення й експлуатації.

Збереження проектної якості трактора на стадії виготовлення шляхом забезпечення індивідуального вібраційне, доведення технічного стану до вимог норм вібрації виготовлення, а при експлуатації та ремонті – контролем вібрації на відповідність вимогам експлуатаційних норм зміни вібрації для прогнозування залишкового ресурсу й обслуговування за технічним станом.

Вібраційні принципи створення тракторів дають можливість на стадії проектування в лабораторних і заводських умовах виявити резонансні явища в конструкції, доопрацювати конструкцію трактора до заданих рівнів вібрації і, відповідно до заданої надійності, і цим зменшити трудомісткість експлуатаційних доводочних випробувань тракторів.

За об'єкт досліджень вібраційних процесів прийнято трактор Т-150К. За параметри вимірної вібрації прийняті середньоквадратичні значення у децибелах (дБ), у смузі третьоктавних частот від 5 Гц до 10000 Гц. Застосовані апаратні засоби вимірювання: віброаналізатори 2031, 2034; акселерометр 437 і самописець 306; спосіб кріплення сталевую шпилькою або магнітом UA0642. За нульовий рівень вібрації прийнято $3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$.

2 Розробка норм вібрації тракторів

2.1 Моделі визначення допустимих і граничних параметрів вібрації трактора

Теорія і практика вивчення і нормування вібрації за критеріями віброміцності та вібростійкості енергетичного обладнання має сторічний досвід. Найбільш надійним і простим методом установлення критеріїв допустимої вібрації є статистичне збирання відомостей про неї, розгляд аварій, спричинених нею, а також випадків швидкої відмови механізмів аналогів. Таким шляхом були розроблені норми і класи вібрації енергетичного обладнання. Як зниження досягнутих значень вібрації у певній смузі частот, переважно від 250 Гц до 10000 Гц, ISO 20816-1:2016, ISO 2373-87 та інші стандарти [6-11].

Для визначення допустимих і граничних станів діагностичних параметрів нами розроблені математичні моделі на базі знайденого співвідношення між значеннями граничних структурних і вібраційних параметрів та їх вихідними станами. Граничні значення збільшення вібраційного параметра (ΔL) над вихідним (L_{II}) для функціональних і ресурсних (ΔL_{II}) елементів підшипникових вузлів і зубчастих передач отримані із співвідношення

$$\Delta L_{\Phi} = \frac{\delta_{\Phi}}{\delta_{II}} = \frac{L_{\Phi}}{L_{II}} = 20 \lg(2 \dots 2,5) = 6 - 8 \text{ дБ}; \quad (2)$$

$$\Delta L_{II} = \frac{\delta_{II}}{\delta_{II}} = \frac{L_{II}}{L_{II}} = 20 \lg 10 = 20 \text{ дБ}. \quad (3)$$

Граничні збільшення вібрації ресурсних елементів над вихідними значеннями при контролі вібрації на резонансній частоті (ΔL_P) визначаються зі співвідношення

$$\Delta L_P = K \frac{L_{II}}{L_{II}} = 20 \lg(20 \dots 35) = 26 - 30 \text{ дБ}. \quad (4)$$

У формулах (2-4) $\delta_{\Phi}(\Delta L_{\Phi})$, $\delta_{II}(\Delta L_{II})$ – зазори (рівні вібрації) функціональних і ресурсних параметрів елементів граничного стану, а $\delta_{II}(\Delta L_{II})$ – вихідного стану, K – коефіцієнт підсилення вібрації, який дорівнює 2-3,5.

Із залежностей (2-3) випливає, що зміна діагностичного параметра за зазором і вібрацією при переході механізму з одного класу технічного стану в інший відповідає збільшенню вихідного зазору в 2,5 рази, вібрації – на 8 дБ, а збільшення їхніх значень у 10 разів (20 дБ), стосовно вихідних, є граничною величиною.

2.2 Моделі оцінки якості проектування тракторів на заданий рівень вібрації

Першим завданням проєктантів та конструкторів надійних тракторів є визначення допустимої вібрації для кожного вузла й агрегату трактора в цілому, при яких рівнях вібрації немає загрози трактору, людині та довкіллю.

Запропоновано оцінювати якість проектування механізмів трактора за третьоктавним спектром їх вібрації. Критерієм оптимальності закладеної вібрації при проектуванні трактора є спектральна вібраційна характеристика, яка за максимальними значеннями рівнів віброприскорень (АБ) усіх джерел вібрації фактичного спектра механізмів трактора апроксимується прямою лінією АБ з різницею $P=40$ дБ між значеннями рівнів вібрації на частотах 5 Гц і 10000 Гц (рис. 1).

Допустимі вібрації (АБ) у низькочастотній області спектра визначають розрахунковим методом, а на середніх і високих частотах до 10 кГц, на базі існуючих експериментальних і статистичних даних допустимої вібрації механізмів-аналогів [наша]. Для низькошвидкісних агрегатів трактора за допустимі вібрації у низькій області частот (точка А, рис. 1) можна приймати розрахункові допустимі віброприскорення, які збуджуються статичним дисбалансом.

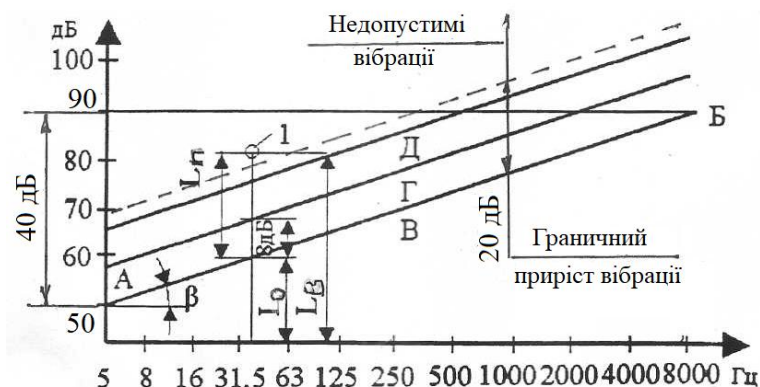


Рис. 1. Класи вібрації тракторів: В – допустима вібрація; Г – нормальна вібрація; Д – підвищена вібрація

Для вітчизняних тракторів сімейства Т-150К допустимими вібраціями (АБ) є значення 50 дБ на частоті 5 Гц і 90 дБ на частоті 10000 Гц (рис. 1). Розроблено три класи вібрації В, Г, Д тракторів з діапазонами вібрації 8 дБ між класами вібрації, які побудовані відносно допустимої вібрації з урахуванням їх граничного приросту 20 дБ.

Рівні вібрації (L_{Π}) у точці 1 спектра, рис. 1), що перевищують допустимі рівні (L_O) прямої АБ, прискорюють спрацювання й ушкодження деталей, знижуючи ресурс у пропорційній залежності від величини перевищення вібрації над допустимою.

Вплив перевищення L_{Π} допустимої вібрації L_O на зниження ресурсу елементів трактора оцінюється коефіцієнтом:

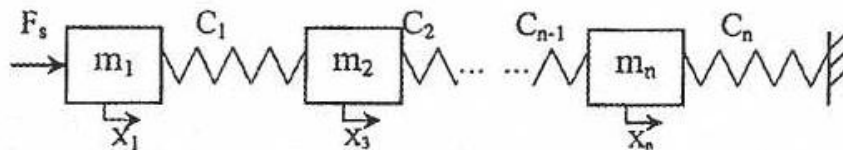
$$K_p = \frac{L_{\Pi}}{L_O}. \quad (5)$$

Визначення норм вібрації тракторів відносно допустимої вібрації (рис. 1, пряма АБ) дозволяє за запасом вібрації до граничного її збільшення, яке дорівнює 20 дБ (для тракторів типу Т-150К) оцінювати експлуатаційну придатність проєктованих механізмів тракторів, рівень їхньої конструктивно-технологічної досконалості, прогнозувати ресурс тракторів і визначати прогресивні вимоги до вібраційних характеристик тракторів з урахуванням підвищення їх надійності та конкурентоздатності. Запас роботоzдатності за класами вібрації: $B > 2,5$; $\Gamma = 2,5-1,5$; $D = 1,5-0,2$.

Для проєктування тракторів заданого рівня вібрації запропоновано метод оцінки рівня вібрації, що базується на визначенні збуджувальних сил і частот, які збуджуються амплітудами зміщень геометричних осей обертання і геометричними похибками розмірів і форм контактуючих пар, з урахуванням умов, за яких ці процеси відбуваються, – маси деталей, частоти обертання, навантаження і динамічної жорсткості елементів конструкції. Рух кінематичних елементів (x_i) вузла трактора представлено аналітичною моделлю (рис. 2), описаною диференційними рівняннями

$$m_s \cdot \ddot{x}_s + \sum_{j=1}^n R_{s,j} \dot{x}_j = F_s ; (s=1, \dots, n), \quad (6)$$

де R_{sj} – передаточне відношення (реакція додаткового зв'язку на масі m_s при дії зусилля на масу m_j , що дорівнює реакції додаткового зв'язку на масі m_j при дії зусилля на масу m_s).



$F_s = F_{s0} \cdot \cos \omega t$ – збуджувальна сила; $m_1, m_2, \dots, m_n$ – маси; $C_1, C_2, \dots, C_{n-1}, C_n$ – статичні жорсткості

Рис. 2. Аналітична модель вузла трактора

Для можливості використання системи диференційних рівнянь уведена еквівалентна збуджувальна сила $F_s = -m_s \cdot \ddot{e}$, де $\ddot{e}$ – задане переміщення, м. Амплітуда, еквівалентна збуджувальній силі, визначається за формулою:

$$F_i = m_i \cdot w_i^2 \cdot e_i, \quad (7)$$

де m_i – маса, кг;

e_i – величина амплітуди зміщення геометричної осі або геометричних погрішностей будь-якого елемента в кінематичній парі, м;

w_i – частота обертання, c^{-1} .

Амплітуда коливань (α) і рівні вібрації (L_i) у дБ для кожної збуджувальної сили визначаються за формулами:

$$\alpha_i = \frac{F_i}{K_{Ai}}, \quad L_i = 20 \lg \frac{\alpha_i \cdot w_i^2}{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot 10^{-2}} \leq L_s. \quad (8)$$

Далі наведені математичні вирази і приклади оцінки рівнів вібрації, що збуджуються кінематичними процесами в підшипникових вузлах і валах механізмів трактора, які дозволяють при закладених параметрах конструктивних елементів, геометричних похибках розмірів і форм кінематичних пар, визначати збуджувані рівні

вібрації механізмів і оцінювати обсяг і види зміни конструкції та доводочних робіт для одержання необхідного спектра (рис. 2) заданого класу вібрації трактора (рис. 1).

Оцінку експериментальних рівнів вібрації (L_ϕ) аналога або макета, що перевищують задані L_3 для кожної збуджувальної сили, дістають із співвідношення:

$$\Delta L_{np} = L_\phi - L_3 = 20 \lg \frac{L_\phi}{L_3}. \quad (9)$$

Приріст вібрації при зміні амплітуди геометричних похибок і зазорів (L_ϕ) кінематичних пар порівняно з необхідними або вихідними значеннями похибок (L_o) визначається зі співвідношення

$$\Delta L_{np} = L_\phi - L_o = 20 \lg \frac{e_\phi}{e_o}. \quad (10)$$

За розрахунково-експериментальними даними рівні віброприскорень ($W_{ж}$), що збуджуються статичним дисбалансом (e_Σ) при жорсткому валові, і віброприскорення (W_Π), які викликаються зміщенням центра ваги вала від геометричної осі обертання на величину ($e_{\Sigma 3}$) в підшипниковому вузлі, визначаються за формулами:

$$W_{ж} = \frac{\omega^2}{\sqrt{2}} \cdot e_\Sigma \cdot \frac{G_B}{G_{K\Sigma}} \cdot 10^{-6}, \text{ м/с}^2; \quad (11)$$

$$W_\Pi = \frac{\omega^2}{\sqrt{2}} \cdot e_{\Sigma 3} \cdot \frac{G_B}{G_{K\Sigma}} \cdot 10^{-6}, \text{ м/с}^2, \quad (12)$$

де G_B – маса вала, що обертається, кг;

$G_{K\Sigma}$ – маса агрегату без вала, що обертається, кг.

Віброприскорення ($W_{шп}$), збуджувані овальністю шийки вала ($e_{шп}$) під установку підшипника, що вимірюються на стакані підшипникового вузла, визначаються за формулою

$$W_{шп} = \frac{(2\omega)^2}{\sqrt{2}} \cdot e_{шп} \cdot \frac{G_B}{G_{K\Sigma}} \cdot K_{д2} \cdot 10^{-6}, \text{ м/с}^2, \quad (13)$$

де $K_{д2}$ – розрахунковий коефіцієнт динамічного підсилення вібрації,

$e_{шп}$ – овальність, мкм.

Допустимі рівні прискорень призначуваного підшипника кочення (L_d) За заданим допустимим рівнем прискорювань (L_3) агрегату визначаються за рівнянням

$$L_d \leq L_3 + 20 \lg \left(\frac{n}{1500} \right)^2 - 20 \lg \frac{G_{K\Sigma}}{G_B} + 20 \lg K_{дp}, \text{ дБ} \quad (14)$$

де $K_{дp}$ – експериментальний коефіцієнт динамічного підсилення вібрації n частоти обертання, хв^{-1} ;

L_3 – віброприскорення на зовнішньому кільці окремого підшипника, АБ.

Розроблено математичну модель діагностування зубчастої передачі за швидкістю збільшення зазору в зубозчепленні під дією ударних процесів, обумовлених змінною жорсткістю (a_z) і бічним зазором ($a_{\delta o}$) зубозачеплення.

$$L(a_z, a_{\delta_0}, v_{\delta}, a, t) = 20 \lg \left(\frac{a_z}{a_{REF}} \right) + 10 \lg \left(1 + \left(\frac{a_z}{a_{\delta_0}} \right)^{-2} (1 + v_{\delta} t^a)^2 \right), \quad (15)$$

де a_z, a_{δ_0} – складові вібрації, викликані змінною жорсткістю й ударними процесами в зубозачепленні;

v_{δ} – відносна швидкість зміни зазору;

a – постійний для даного сполучення параметр;

δ_0 – вихідний зазор;

t – напрацювання;

a_{REF} – опорний рівень вібрації.

Вплив частоти обертання коліс (L_{C3}) і навантаження (L_{h3}) на зростання віброприскорення визначаються за залежностями:

$$L_{C3} = L_{PK} + 23 \lg P_K, \text{ дБ} \quad (16)$$

$$L_{h3} = L_{PK} + 20 \lg N_3, \text{ дБ} \quad (17)$$

де L_{PK} – постійна величина, що залежить від конструкції та якості виготовлення шестерень у межах 40-50 дБ;

P_K – колова швидкість коліс, м/с;

N_3 – потужність, що передається, кВт.

2.3 Моделі оцінки й забезпечення якості виготовлення тракторів

Оцінювання якості технологій виготовлення деталей і складання вузлів, агрегатів трактора виконується за розкидом максимальних і мінімальних рівнів вібрації заданої вибірки (від 10 до 30 виробів) при частоті обертів вхідного вала 1000 хв^{-1} і 2000 хв^{-1} . Ці вибірки виробів обираються у строгій послідовності з випуском. За критерій якісних технологій прийнято розкид не більший за 4-6 дБ.

Оцінка якості виготовлення виконується за рівнями відхилень вібрації механізмів трактора від заданої норми. Нормування рівнів вібрації трактора виконується в третьоктавних смугах частот від 5 до 10000 Гц, як верхня межа поля допуску H , здійснюється на основі статистичної обробки вибірки виміряної вібрації виробу в контрольованій смузі частот з урахуванням заданої надійності та ймовірності браку згідно із залежністю (18).

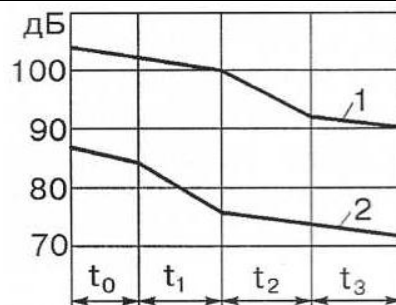
$$H = \bar{L} + lS, \text{ дБ} \quad (18)$$

де $\bar{L}$ – середнє арифметичне значення;

S – емпіричне значення середнього квадратичного відхилення вимірів;

l – коефіцієнт, що визначає поле допуску, який є функцією надійності, частки випадковості й обсягу вибірки. Для підшипників і зубчастих передач $l = 2$.

Порівняння фактичних рівнів вібрації механізму з нормою вібрації дає можливість обґрунтовано за перевищенням спектральних складових вібрації над нормою встановлювати види дефектів, доцільність і необхідний обсяг індивідуальної доводки для усунення дефектів виготовлення, складання й монтажу трактора, контролювати технологічні процеси виготовлення і забезпечувати проектну надійність трактора на стадії виробництва. Розроблені таблиці діагностичних ознак видів дефектів виробництва агрегатів трактора та методи їх усунення (приклад рис. 3), які можуть становити базу для програмного забезпечення для приладів автоматизованого контролю якості діагностування.



1 – підшипникових вузлів; 2 – зубчастої передачі; t_0 – обкатка після складання; t_1 – зменшення осьового зазору між шестірнями з 1,1 мм до 0,1 мм; t_2 – введення осьового натягу підшипників; t_3 – експлуатаційна обкатка

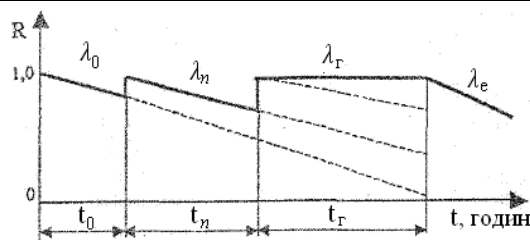
Рис. 3. Вібраційна доводка головної зубчастої передачі моста

У залежності від рівня технології виробництва та якості проектування окремих агрегатів, їх складання і монтажу передбачено контроль вібрації у скороченому та повному обсязі випробувань (рис. 4, 6). У скороченому обсязі контроль вібрації та індивідуальну доводку вібраційних характеристик до норм можна здійснювати в один етап після короткої (15-30 хв.) обкатки виробу на холостому ходу (рис. 4, операції 1, 2, 3). Виявлення й усунення дефектів виготовлення, складання і монтажу окремих агрегатів і трактора в повному обсязі здійснюється у два етапи (рис. 4, операції 1-6).



Рис. 4. Послідовність вібраційного контролю якості виготовлення трактора і його агрегатів

Початковий контроль якості виготовлення на відповідність нормам вібрації виконується під час короткочасної обкатки t_0 (рис. 5). Випробування виробу на цьому етапі проводять на холостому ходу шляхом регулювань з метою усунення потоку дефектів λ_0 , які збуджують вібрацію, що перевищує норму. Після вібраційної доводки (операція 3, рис. 4) бездефектний виріб при скороченому обсязі випробувань надходить на складання трактора (операція 6, рис. 4), а при повному обсязі випробувань – на обкатку-припрацювання (операції 4, 5) у режимі навантаження. Дефекти λ_n , які проявилися в процесі припрацювання, знову усуваються шляхом проведення регулювальних робіт або заміни деталей (рис. 5). Після закінчення припрацювання за результатами контролю вібрації на відповідність нормам визначають придатність виробу до монтажу в комплектний трактор і експлуатації або повертають на доводку (операція 1, рис. 4). Усунення обкаткою на холостому ходу і припрацюванням під навантаженням дефектів виготовлення, складання і монтажу дає можливість вивести параметри агрегатів і трактора в цілому на рівень вимог проектної якості та забезпечити безвідмовну роботу в гарантований термін експлуатації.



t_0 – обкатка; t_n – припрацювання; R – імовірність безвідмовної роботи; t_r – гарантійний період експлуатації; λ_0 – потік дефектів під час обкатки; λ_n – потік дефектів припрацювання; λ_r – гарантійна безвідмовна робота; λ_e – потік відмов при експлуатації

Рис. 5. Модель підвищення безвідмовності машини на стадії виробництва

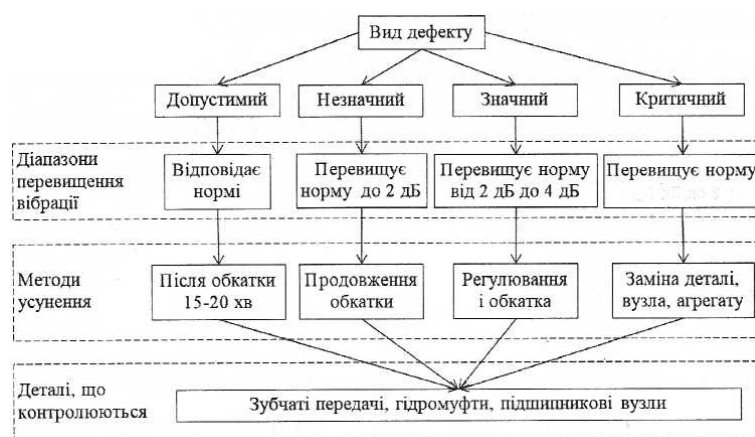


Рис. 6. Діагностичні ознаки дефектів коробки передач і методи їх усунення

Операції доводки коробки передач трактора Т-150К до норм вібрації показані на рис. 6.

2.4. Моделі оцінки й забезпечення якості експлуатації тракторів

Розроблено статистичну модель нормування вихідних значень вібраційного діагностичного параметра експлуатаційних норм вібрації трактора, яка дозволяє враховувати якість проектування і виготовлення в розрахунках вихідного (L_H) діагностичного параметра шляхом визначення коефіцієнта вібраційного перевантаження (K_H) і відносного розсіювання σ_L в довірчому інтервалі в кожній контрольованій смузі частоти вібрації

$$L_H = \bar{L} + IS - K_H \sigma_L, \quad (19)$$

де σ_L – середнє квадратичне відхилення від середнього арифметичного значення вібрації, $\sigma_L = S / \sqrt{n-1}$.

Величина нормованих граничних значень вібраційного діагностичного параметра експлуатаційних норм вібрації визначається як алгебраїчна сума вихідного рівня L_H і граничного приросту вібрації (2, 3):

$$L_H = L_H + \Delta L. \quad (20)$$

За норму нижньої межі поля допуску приймається

$$L_H = L_H + IS, \quad (21)$$

як допустиме зниження нижче встановленої норми (19), що є показником порушення якості складання і технічного стану (ослаблення кріплення, провертання вала, зниження частоти обертання тощо), а в експлуатації трактора – відключення окремих елементів, агрегату або начіпних механізмів, зменшення частоти обертання, потужності.

Для контролю якості регулювальних робіт, поточного й капітального ремонту окремих агрегатів і комплектного трактора розробляються норми на 80% і 100% відновлення проєктного ресурсу. Для 100% відновлення ресурсу рівні вібрації відремонтованих виробів не повинні перевищувати норми якості виготовлення (18). У разі 80% відновлення ресурсу рівні вібрації по всьому спектру третьоктавних значень не повинні перевищувати більш ніж на 4 дБ норми (18) якості виготовлення.

Значення діагностичних параметрів та методи їх визначення, дБ	Діапазони вібрації, дБ	Класи якісної оцінки	
		технічного стану	регулювальних робіт
		Недопустимо	Недопустимо
		Вимагає вжиття заходів	
		Допустимо	Допустимо
		Добре	
		Допустимо	Придатно
		Вимагає вжиття заходів	Відмінно
		Недопустимо	

Рис. 7. Норми вібрації і класи якісної оцінки технічного стану трактора

Розроблено класифікаційні діапазони експлуатаційної вібрації й шкалу якісної оцінки технічного стану, регулювальних і ремонтних робіт для ресурсних і функціональних елементів трактора (рис. 7), у яких зміна вібрації (3) від вихідного (19) до граничного параметра (20, 21) розбита на класи вібраційного стану «відмінно», «добре», «допустимо», «вимагає вжиття заходів», «недопустимо» з різницею інтервалів між прилеглими областями в 4 дБ. Різниця в 4 дБ збільшення або зниження вихідної вібрації вказує на істотні зміни вібраційного стану – наявність дефекту, а різниця у 8 дБ свідчить про зміну на рівні переходу механізму в інший клас технічного стану. Діагностування виду дефекту та стану механізму здійснюється методом зіставлення поточних значень вібрації з нормованими значеннями.

Нормування експлуатаційної вібрації в залежності від складності механізму трактора запропоновано провадити у широких смугах частот, у третьоктавних смугах і дискретних частотах прояву дефектів у кожній контрольній точці.

Вібраційне діагностування механізмів трактора провадиться за лінійним трендом віброприскорень (дБ) за часом напрацювання. Отримано співвідношення для прогнозування ресурсу t_p :

$$t_p = \frac{L_{max} - L_H}{K_T}; \quad K_T = \operatorname{tg} \alpha = \frac{L_{T1} - L_H}{t_1 - t_0}; \quad L_{max} = L_H + K_T t_p, \quad (22)$$

де L_{max}, L_H – максимальні та початкові значення;
 $K_T = \operatorname{tg} \alpha$ – кутовий коефіцієнт тренда;
 L_{T1} – рівень вібрації у поточний момент часу t_1 .

На базі лінійного тренда віброприскорень запропоновано модель експрес-діагностування максимального L_{max} і залишкового ресурсу при обмеженій інформації – за результатами одного або двох вимірів вібраційного параметра. Максимальний і залишковий ресурси механізму трактора при відомих значеннях L_H та L_{T1} (2, 3, 20) і напрацювання від початку експлуатації на момент діагностування L_1 можна визначити за коефіцієнтом (α) швидкості наростання вібрації за допомогою одного виміру вібрації (рис. 8):

$$\alpha = (L_1 - L_{\text{н}}) / \Delta L_{\text{п}}; \quad t_{\text{max}} = t_1 / \alpha; \quad t_{\text{op}} = t_{\text{max}} - t_1 = t_{\text{max}}(L_{\text{п}} - L_1) / \Delta L_{\text{п}}. \quad (23)$$

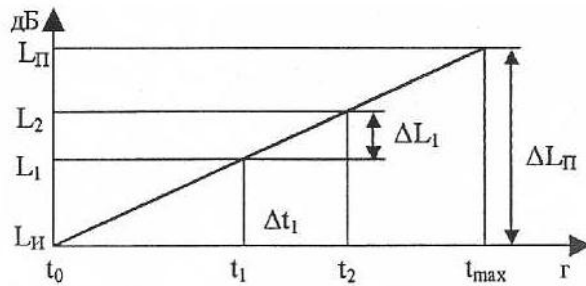


Рис. 8. Графік визначення ресурсу об'єкта діагностування

У разі відсутності даних про напрацювання елемента з початку експлуатації необхідно провести два виміри через проміжок часу напрацювання Δt_1 . Тоді

$$A = \Delta L_1 / \Delta L_{\text{п}}; \quad t_{\text{max}} = (t_2 - t_1) / \alpha; \quad (24)$$

$$= \Delta t_1 = t_2 - t_1; \quad t_2 = t_{\text{max}}(L_2 - L_{\text{н}}) / \Delta L_{\text{п}}; \quad t_{\text{op}} = t_{\text{max}} - t_2 = t_{\text{max}}(L_2 - L_{\text{н}}) / \Delta L_{\text{п}}. \quad (25)$$

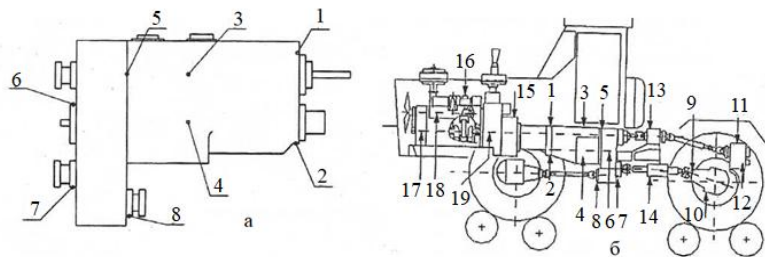
Прогнозування залишкового ресурсу за зміною рівня вібрації зводиться до екстраполяції знайденого тренда і визначення моменту його перетинання з лінією граничного стану $\Delta L_{\text{ф}}$, $\Delta L_{\text{п}}$; (2, 3, 20).

3. Експериментальні дослідження вібраційних характеристик тракторів типу Т-150К

Дослідження вібраційних характеристик комплектних тракторів, а також дослідження їх окремих агрегатів проводилися на обкаточних роликівих стендах у режимі холостого ходу. Точки контролю вібрації показані на рис. 9.

Вибір контрольних точок проводився з урахуванням можливостей найбільшого наближення до джерела вібрації (підшипників, зубчастих передач і т. п.), у яких зміна вібрації з достатньою чутливістю відповідають зміні технічного стану деталей і вузлів трактора, а шляхи розповсюдження вібрації від джерела збурення вібрації до точок контролю вібрації знаходяться жорсткі елементи з мінімальною кількістю з'єднань (рис. 10; 1 – датчики; 2 – шпилька; 3 – магніт).

Рівні вібрації агрегатів комплектного трактора Т-150К (рис. 9, б) показані на рис. 11. Розкид максимальних і мінімальних рівнів вібрації (при номінальній частоті обертів двигуна (СМД-62) 2100 хв^{-1}) в режимі холостого ходу в діапазоні частот від 5 до 10000 Гц (для вибірки не менше 15 шт. кожного агрегату), двигуна (95-125 дБ), коробки передач (93-112 дБ), турбокомпресора (100-112 дБ), моста (85-110 дБ), муфти зчеплення (85-105 дБ), редуктора ВВП (88-103 дБ). На рис. 11 вертикальними лініями (1-10) відмічені величини розкиду значень вібрації для вибірки 9 тракторів. Рівні вібрації агрегатів трактора значно перевищують допустимі, чим пояснюється їх низький ресурс у 10-12 тис. мотогодин. Такий розкид мінімальних і максимальних рівнів вібрації свідчить про низький рівень технології виготовлення тракторів.



1-8 – коробки передач і роздавальної коробки; 9, 10 – мостів; 11, 12 – редуктора вала відбору потужності (ВВП); 13, 14 – опор карданних валів; 15 – муфти зчеплення; 16 – турбокомпресора; 17-19 – двигуна

Рис. 9. Точки контролю вібрації коробки передач (а) та комплектного трактора Т-150К (б)

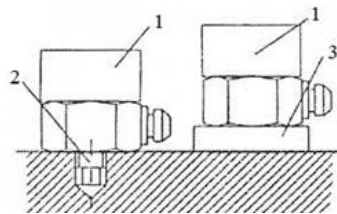
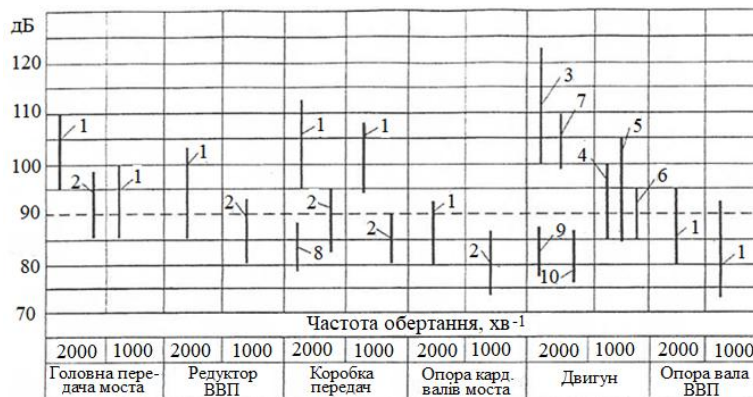


Рис. 10. Способи кріплення віброперетворювача



1-7 – розкид рівнів вібрації, збудованої підшипниками кочення (1); зубчастими передачами (2); механізмами паливної апаратури (3); циліндро-поршневим механізмом (4); муфтою зчеплення (5); корінними підшипниками (6); турбокомпресором (7); насосом (8); вентилятором (9); генератором (10)

Рис. 11. Рівні вібрації агрегатів і вузлів трактора Т-150К

Кількість мостів (%) при виборці 33 мостів, які за максимальними значеннями вібрації при частоті обертів 1000 хв⁻¹ – задовольняють стану класу В – 0 %, класу Г – 60 %, а при частоті 2000 хв⁻¹ – класу В – 0 %, класу Г – 25 %, коефіцієнт перевантаження деталей підшипникових вузлів при частоті 1000 хв⁻¹ складає: коробки передач 2,5; головної передачі 2,0, а при частоті обертів 2000 хв⁻¹ – коробки передач 8,0; головної передачі 5,6.

Рівні вібрації трансмісії тракторів знаходяться при частоті обертання 2000 хв⁻¹ в межах від 75 до 112 дБ, двигуна – від 77 до 125 дБ, що в 10-20 разів перевищує вібрації аналогічних механізмів іншого машинного устаткування більшої потужності й частот обертання.

Конструктивні параметри, якість виготовлення та складання агрегатів не забезпечують стабільність точнісних параметрів і жорсткісних характеристик трактора.

Це підтверджується великим (10-27 дБ) розкидом максимальних 4 і мінімальних 5 рівнів експериментальної вібрації, перевищенням до 16 дБ максимальних значень вібрації над середньоарифметичними 1 (рис. 12).

Установлені значення розкиду рівнів вібрації механізмів тракторів на стадії виготовлення є показником статистичного розсіювання їх ресурсів до 30%, що і спостерігається на практиці. Основними недоліками конструкції і технології тракторів є: відсутність пружного осьового натягу підшипників, великі зазори у сполученнях підшипникових вузлів (більше 30 мкм) і зубчатих передачах (більше 0,3 мм), установка й фіксація підшипників на вал і в опору з перекосами кілець та не в площині максимальної жорсткості корпусів та ін., які обумовлюють виготовлення тракторів різної якості та нестабільність технічного стану. Основними джерелами високих рівнів вібрації трактора у низькочастотній області (до 100 Гц) є резонансні вібрації силового агрегату, дисбаланс, неспіввісність монтажу агрегатів і прогин силового агрегату, в області середніх частот (200-1150 Гц) – зубчасті передачі. Експериментально підтверджується необхідність вібраційної оптимізації (доводки) конструкції для усунення резонансів і нестабільності вібрації та нормування вібрації трактора для контролю якості виготовлення, складання та монтажу.

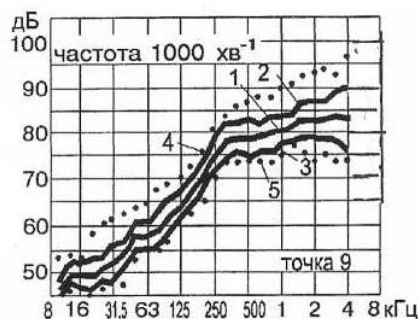


Рис. 12. Статистична обробка вібрації головної передачі моста трактора Т-150К

Рівні вібрації агрегатів трансмісії тракторів типу Т-150К на стадії приймально-здавальних випробувань на обкаточному стенді при частоті обертання 2000 хв⁻¹ на 10-20 дБ перевищують допустимі (рис. 11) [4]. Максимальні рівні вібрації агрегатів у смузі частот від 5 до 10000 Гц знаходяться у верхній зоні класу вібрації Д і вище, що і визначає на даний час ресурс трактора менше 10 тис. мотогодин до капітального ремонту. Рівні вібрації та існуючий ресурс тракторів типу Т-150К узгоджуються з класом вібрації Д (рис. 1).

Висновки

Вібраційні параметри тракторів є універсальним ефективним діагностичним показником якості проектування, виготовлення й експлуатації тракторів. Основним діагностичним показником проектної якості закладених механічних, функціональних і динамічних параметрів трактора є допустимі рівні віброприскорень (дБ) в діапазоні частот від 5 до 10000 Гц. Для тракторів типу Т-150К допустимим є спектр вібрації, який не перевищує 50 дБ на частоті 5 Гц і 90 дБ на частоті 10000 Гц.

Розроблені статистичні і математичні моделі визначення допустимої вібрації трактора, розрахунку граничних значень перевищення допустимої вібрації в експлуатації, які для структурних параметрів визначені як 16-20 дБ, а для функціональних – 6-8 дБ.

Конструктивно-технологічна досконалість тракторів оцінюється за рівнями збільшення вібрації відносно допустимої вібрації. Визначені три класи вібрації тракторів

з діапазоном вібрацій 8 дБ між класами вібрацій, які побудовані відносно допустимої вібрації. Розроблені норми вібрації, оцінки якості технологій виготовлення й експлуатації.

Список використаних джерел

1. Лебедєв С.А. Технічний рівень тракторів сільськогосподарського призначення на ринку України / С.А. Лебедєв // Техніка і технології АПК. 2014. № 11 (62). С. 8-12.
2. Дирда В.І. Дослідження експлуатаційної надійності тракторів John Deere серії 8320R в умовах України / В.І. Дирда, О.А. Черній, О.А. Жидик // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизації. – 2017. – Вип. 30. – С. 38-40.
3. Мигаль В.Д. Експлуатаційні властивості та надійність тракторів: навч. посібник для здобувачів ступеня вищ. освіти закл. вищ. освіти / В. Д. Мигаль, М. Л. Шуляк; Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка. – Харків: ФОП Мірошніченко О.А., 2021. – 262 с.
4. Мигаль В. Д. Вібраційна діагностика машин, проектування, виготовлення, експлуатація: монографія / В. Д. Мигаль, Щ. В. Аргун. – Х.: Мачулін, 2024. – 441 с.
5. ISO1683:2015 Acoustics Preferred Reference Values for Acoustics / International Organization for Standardization, 2015.
6. ДСТУ5348:2009. Вібрація та удар механічні. Кріплення акселерометрів механічне (ISO5348:1998, IDT) / Технічний комітет стандартизації «Трактори і сільськогосподарські машини» (ТК 69), 2009.
7. ISO 20816-1:2016. Mechanical Vibration Measurement and Evaluation of Machine Vibration/ISO, 2016.
8. ISO 20816-3:2022. Mechanical Vibration — Measurement and Evaluation of Machine Vibration – Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min / ISO, 2022.
9. ДСТУ EN 12096:2005. Вібрація механічна. Повідомлення та перевірка параметрів вібрації. 2005.
10. EN IEC 60034-14:2018. Rotating Electrical Machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity. 2018.
11. ISO 8579-2: 1993. Acceptance code for gears. Part 2: Determination of mechanical vibrations of gear units during acceptance testing. Technical Committee: ISO/TC 60. Publication date: 1993-02. – 14 p.
12. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Shuliak M. (2022). Evaluating the Quality of Design and Manufacture of Agricultural Tractors by Vibration Characteristics. Transport Means - Proceedings of the International Conference. 2022-October, 2022 26th International Scientific Conference Transport Means 2022. Kaunas, (15 - 7 October 2022). P. 116-121.
13. Mygal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Trunova L., & Shevchenko I. (2022). Assessing Design and Manufacturing Quality of Tractor Gearboxes by their Vibration Characteristics. Journal of Vibration and Control, doi: 10775463211060899.
14. Mygal V., Arhun S., Hnatov A., Ulianets O., Kunicina N., & Ribickis L. Diagnostics of Tractor Transmissions by Vibration Levels. 2022 7th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon 2022), May 9-12, 2022, Riga Technical University, Latvia, Riga. P. 1-7. DOI: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830506.
15. Migal V., Lebedev A., Shuliak M. та ін. Reducing the Vibration of Bearing Units of Electric Vehicle Asynchronous Traction Motors. JVC/Journal of Vibration and Control. 2021. Вип. 27, № 9-10. С. 1123-1131.

References

1. Lebedyev S.A. Tekhnichnyy riven' traktoriv sil's'kohospodars'koho pryznachennya na rynku Ukrayiny / S.A. Lebedyev // Tekhnika i tekhnolohiyi APK. 2014. № 11 (62). S. 8-12.
2. Dyrda V.I. Doslidzhennya ekspluatatsiynoyi nadiynosti traktoriv John Deere seriyi 8320R v umovakh Ukrayiny / V.I. Dyrda, O.A. Cherniy, O.A. Zhydyk // Tekhnika v sil's'kohospodars'komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiyi. – 2017. – Vyp. 30. – S. 38-40.
3. Myhal' V.D. Ekspluatatsiyni vlastyvoli ta nadiynist' traktoriv: navch. posibnyk dlya zdobuvachiv stupenya vyshch. osvity zakl. vyshch. osvity / V. D. Myhal', M. L. Shulyak; Kharkiv. nats. tekhn. un-t sil. hosp-va im. P. Vasylenka. – Kharkiv: FOP Miroshnychenko O.A., 2021. – 262 s.
4. Myhal' V. D. Vibratsiyna diahnostyka mashyn, proektuvannya, vyhotovlennya, ekspluatatsiya: monohrafiya / V. D. Myhal', Shch. V. Arhun. – X.: Machulin, 2024. – 441 s.
5. ISO1683:2015 Acoustics Preferred Reference Values for Acoustica / International Organization for Standardization, 2015.
6. DSTU5348:2009. Vibratsiya ta udar mekhanichni. Kriplennya akselerometriv mekhanichne (ISO5348:1998, IDT) / Tekhnichnyy komitet standartyzatsiyi «Traktory i sil's'kohospodars'ki mashyny» (TK 69), 2009.
7. ISO 20816-1:2016. Mechanical Vibration Measurement and Evaluation of Machine Vibration/ISO, 2016.
8. ISO 20816-3:2022. Mechanical Vibration — Measurement and Evaluation of Machine Vibration – Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min / ISO, 2022.
9. DSTU EN 12096:2005. Vibratsiya mekhanichna. Povidomlennya ta perevirka parametriv vibratsiyi. 2005.
10. EN IES 60034-14:2018. Rotating Electrical Machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity. 2018.
11. ISO 8579-2: 1993. Acceptance code for gears. Part 2: Determination of mechanical vibrations of gear units during acceptance testing. Technical Committee: ISO/TC 60. Publication date: 1993-02. – 14 p.
12. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Shuliak M. (2022). Evaluating the Quality of Design and Manufacture of Agricultural Tractors by Vibration Characteristics. Transport Means - Proceedings of the International Conference. 2022-October, 2022 26th International Scientific Conference Transport Means 2022. Kaunas, (15 - 7 October 2022). P. 116-121.
13. Mygal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Trunova L., & Shevchenko I. (2022). Assessing Design and Manufacturing Quality of Tractor Gearboxes by their Vibration Characteristics. Journal of Vibration and Control, doi: 10775463211060899.
14. Mygal V., Arhun S., Hnatov A., Ulianets O., Kunicina N., & Ribickis L. Diagnostics of Tractor Transmissions by Vibration Levels. 2022 7th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon 2022), May 9-12, 2022, Riga Technical University, Latvia, Riga. P. 1-7. DOI: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830506.
15. Migal V., Lebedev A., Shuliak M. ta in. Reducing the Vibration of Bearing Units of Electric Vehicle Asynchronous Traction Motors. JVC/Journal of Vibration and Control. 2021. Vyp. 27, № 9-10. C. 1123-1131.

Отримано: 01.04.2026. Прийнято: 13.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Черепньов І. А.¹

ORCID iD: 0000-0003-2421-6503

E-mail: voenpred314@ukr.net

Катунін А. М.²

ORCID iD: 0000-0003-2171-4558

E-mail: lightsymbol@gmail.com

Чумаченко С. М.³

ORCID iD: 0000-0002-8894-4262

E-mail: s_chum@ukr.net

Богомол Д. С.¹

ORCID iD: 0009-0002-9654-3626

E-mail: bogomol.dima9@gmail.com

Роянов О. М.⁴

ORCID iD: 0000-0001-7631-1030

E-mail: roianoff5033@gmail.com

¹ Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

² Харківський національний
університету Повітряних Сил імені
Івана Кожедуба, м. Харків, Україна

³ Державний науково-дослідний
інститут авіації МО України,
м. Київ, Україна

⁴ Харківський національний
автомобільно-дорожній університет,
м. Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТИПОВИХ ПРИЧИН ТА УМОВ ЗАГОРЯНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.182>

УДК 614.841:631.3

*Черепньов І. А., Катунін А. М., Чумаченко С. М., Богомол Д. С., Роянов О. М.
Дослідження типових причин та умов загорянь сільськогосподарської техніки*

Анотація. У статті розглянуто питання визначення найбільш типових причин та умов загоряння сільськогосподарської техніки на основі закордонних публікацій, що вийшли в різний час. В Україні для проведення сільськогосподарських робіт використовують значно меншу кількість автотракторної техніки і при цьому зі значно більшим терміном експлуатації ніж в більш економічно розвинених країнах. Вік трактористів і водіїв вантажних автомобілів становить відповідно 50+ і 40+ років і їх чисельності не вистачає. В даних умовах техніка і люди будуть експлуатуватися з підвищеним навантаженням (а в літній період і в умовах підвищених температур), що з великою часткою ймовірності може провокувати аварійні ситуації, в тому числі і пожежі. У статті висвітлено статистику загорянь сільськогосподарських тракторів і зернозбиральних комбайнів, на основі якої побудовані відповідні діаграми причин та умов загоряння сільськогосподарської техніки. На основі представлених даних визначено, що основним місцем виникнення загорянь є двигун та електрична система, а джерела запалювання – розпечені продукти горіння і нагріті ними поверхні та теплові прояви електричної енергії. Найбільша кількість пожеж сталася у червні, жовтні та листопаді, найбільш небезпечні дні тижня – відповідно вівторок і середа, найбільш небезпечний час доби – від 14.00 до 16.00 годин. Зроблено висновки відносно потенційно небезпечних умов експлуатації сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: джерело запалювання, загоряння, комбайн, пожежа, сільськогосподарська техніка, трактор.

Cherepnov I. A., Katunin A. M., Chumachenko S. M., Bohomol D. S., Roianov O. M.
Research into typical causes and conditions of agricultural machinery fires

Abstract. The purpose of this article is to determine the most typical causes and conditions of agricultural machinery fires based on foreign publications published at different times. In Ukraine, much less tractor equipment is used for agricultural work, and at the same time, it has a much longer service life than in more economically developed countries. The age of tractor drivers and truck drivers is 50+ and 40+ years, respectively, and their number is insufficient. Then the equipment and people will be operated with increased load (and in the summer period and in conditions of elevated temperatures), which with a high probability can provoke emergency situations, including fires. The statistics of fires at agricultural tractors and combine harvesters are highlighted, on the basis of which the corresponding diagrams of the causes and conditions of fires at agricultural machinery are built. Based on the presented data, it is possible to conclude that the main place of occurrence of fires is the engine and the electrical system, and the sources of ignition are hot combustion products and surfaces heated by them and thermal manifestations of electrical energy. The largest number of fires occurred in June, October and November, the most dangerous days of the week are Tuesday and Wednesday, respectively, the most dangerous time of day is from 14.00 to 16.00. Conclusions were drawn regarding potentially dangerous operating conditions of agricultural machinery.

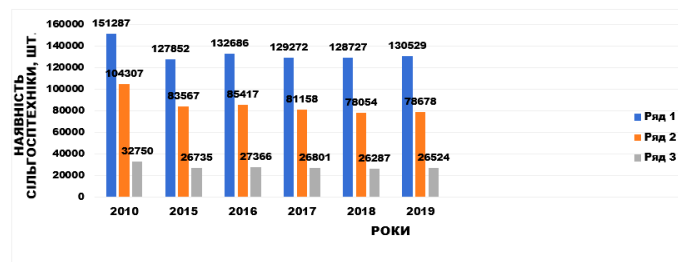
Keywords: ignition source, fire, combine harvester, fire, agricultural machinery, tractor.

Вступ

Сільське господарство залишається одним із ключових рушіїв української економіки. За останніми оцінками, внесок аграрного сектору становить близько 17% валового внутрішнього продукту країни. Це свідчить про стратегічну роль аграріїв у формуванні національного доходу та підтримці продовольчої безпеки [1]. Частка виробництва рослинної продукції у загальному обсязі сільськогосподарського виробництва України у 2021 році становила 86%. Це суттєво відрізняється від структури сільськогосподарського виробництва ЄС, де 57% продукції припадає на рослинництво і 43% – на тваринництво з високою часткою молочної продукції та свинарства [2]. В [3] визначено основні напрямки підвищення економічної ефективності виробництва продукції рослинництва, яка безпосередньо залежить від підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Досягти цього підвищення можливо шляхом вдосконалення організації усіх процесів виробництва. До основних заходів тут слід віднести: ліквідацію простоїв техніки; підвищення ефективності транспортних перевезень та впровадженню комплексної механізації [3].

Постановка проблеми

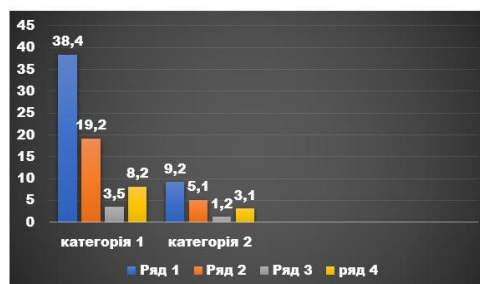
В Україні існують серйозні проблеми у сфері матеріально-технічного забезпечення підприємств агропромислового виробництва (АПВ) а саме: сучасний стан технічного забезпечення сільськогосподарських підприємств наблизився до критичної межі, оскільки 85—90 % технічних засобів, що залишилися, відпрацювали свій нормативний ресурс. Через зношеність і технічну несправність до 25% сільськогосподарської техніки не використовується. У цілому аграрії забезпечені засобами механізації на 50—60 % від технологічної потреби. У результаті зменшення кількості техніки та зниження рівня її технічної готовності призвели до зростання навантаження на технічні засоби у 1,5—2 рази, що значно подовжує строки виконання агротехнічних робіт та зумовлює втрати врожаю [4]. На рис. 1 наведені данні щодо динаміки наявності основних видів сільськогосподарської техніки в сільськогосподарських підприємствах України у 2010–2019 рр.



ряд 1 – трактори; ряд 2 - вантажні та вантажно-пасажирські автомобілі; ряд 3 - комбайни і машини зернозбиральні в сільськогосподарських підприємствах у 2010-2019 рр., шт., побудований авторами статі на підставі даних табл. 2 [4, С. 70]

Рис. 1. Динаміка наявності основних видів сільськогосподарської техніки

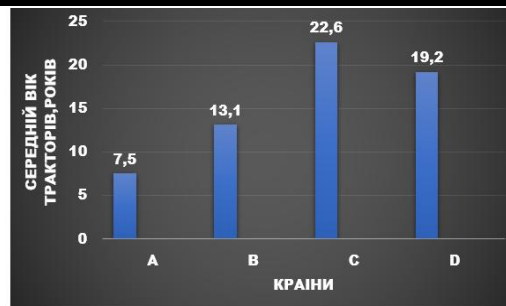
Таким чином, у 2019 році по відношенню до 2010 року кількість тракторів зменшилася на 13,72 %, вантажних та вантажно-пасажирських автомобілів – на 24,57 %, комбайнів і зернозбиральних машин – на 19,01%. У [5] наведені результати порівняння технічної оснащеності сільського господарства країн з різним рівнем розвитку економіки та України. На рис. 2 представлені дані за кількістю тракторів та зернозбиральних комбайнів відповідно в високорозвинених країнах (США, Канада, країни Західної Європи, Японія, Австралія, Нова Зеландія), середньорозвинених (країни Центральної та Східної Європи, Туреччина, Бразилія, Аргентина, Мексика, Китай, Малайзія), слаборозвинених країнах (більшість країн Африки, найбідніші країни Азії та Латинської Америки) і в Україні, а на рис. 3 – середній вік тракторного парку.



кількість тракторів (шт) на 1000 га ріллі (категорія 1); кількість зернозбиральних комбайнів (шт) на 1000 га посівів зернових (категорія 2); ряд.1 – високорозвинені країни; ряд. 2 – середньорозвинені країни; ряд. 3 – слаборозвинені країни; ряд.4 – Україна, побудований авторами статі на підставі даних табл. 2.20 [5, С.103, 104]

Рис. 2 – Кількість сільськогосподарської техніки

Таким чином, кількість сільськогосподарських тракторів, вантажних автомашин і зернозбиральних комбайнів, яке є в АПК України значно поступається високо і середньорозвиненим країнам, а середній вік тракторного парку перевищує аналогічний показник вищезазначених країн. Крім проблем з кількістю і якісним станом автотракторної техніки існують складності і з особовим складів механізаторів. Перш за все, наявної кількості недостатньо для забезпечення виробничого циклу [6]. Середній вік трактористів перевищує 50 років, а водіїв вантажних автомобілів – 40 років [7]. Таким чином, можна підсумувати: в АПК України для проведення сільськогосподарських робіт використовують значно меншу кількість автотракторної техніки і при цьому зі значно більшим терміном експлуатації ніж в більш економічно розвинених країнах. При цьому вік трактористів і водіїв вантажних автомобілів становить відповідно 50+ і 40+ років і їх чисельності не вистачає. Отже, і техніка і люди будуть експлуатуватися з підвищеним навантаженням (а в літній період і в умовах підвищених температур), що з великою часткою ймовірності може провокувати аварійні ситуації, в тому числі і пожежі.



A – високорозвинені країни; B – середньорозвинені країни; C – слаборозвинені країни; D – Україна, побудований авторами статті на підставі даних табл. 2.20 [5, С.103, 104]

Рис. 3. Середній вік тракторного парку (років)

В [8] затверджений перелік заходів з підготовки техніки до збору зернових з точки зору пожежної безпеки. Зокрема визначено, що трактори та комбайни мають бути оснащені двома вогнегасниками, штиковими лопатами та мітлами, а автомобілі – одним вогнегасником та лопатою. Крім того, у разі групового методу збирання до складу збирально-транспортних загонів необхідно включати спеціалізовані автомобілі з насосами (авторіднорозкидачі, водороздавачі та ін.), які пристосовані для гасіння пожеж зернових. Але, тим не менше загоряння сільськогосподарської техніки виникає в різний час і в різних господарствах на території України. На рис. 4-6 наведено фотографії пожеж на комбайнах у різних господарствах і різний час на території України [9 – 11].

Проблема пожежної небезпеки сільськогосподарських тракторів і зернозбиральних комбайнів актуальна не тільки для України, але носить транснаціональний характер.

Метою даної статті є визначення найбільш типових причин та умов загоряння сільськогосподарської техніки на основі закордонних публікацій, що вийшли в різний час у країнах, які займають лідируючі місця в агропромисловому секторі.

Результати дослідження

В [12] наведені дані Національної система звітності про пожежі (National Fire Incident Reporting System, NFIRS, створена Національним центром даних про пожежі пожежної адміністрації США), про фактори займання по 327 пожеж сільськогосподарської техніки в 1984 році. Результати представлені на рис. 7.

Розглянемо місця виникнення пожеж на комбайнах в різних країнах. В [13] представлені результати аналізу вивчення критичних моментів, пов'язаних з ризиком виникнення пожеж, виявлених в ході опитування, проведеного серед власників комбайнів в Арагоні (Іспанія), а також за даними страхових компаній (2017 р.). В обох випадках можна відзначити, що найбільше пожеж виникало в двигунах (~32%). Однак, за даними страховика, другою за значимістю причиною пожежі були збої в електропостачанні (26%), в той час як в ході опитування було підраховано, що на цю причину припадає 10% пожеж. Згідно з даними, зібраними в ході опитування, другою областю, в якій виникало б більше пожеж, була б обробна смуга (31%), на частку якої, за даними страховика, довелося б всього 11% пожеж. Підшипники, реміні та інші компоненти машини (гальма, генератор змінного струму, подрібнювач соломи і т. д.) в опитуванні і в базі даних страховика представлені в аналогічному процентному співвідношенні [13]. На рис. 8 представлена діаграма, на якій наведені дані результатів опитування та аналогічні матеріали страхових компаній.



Рис. 4. В Зміївському районі на Харківщині під час роботи в полі згорів зернозбиральний комбайн, вогнем також було знищено близько 2 га зернових. 16.07. 2019, [9]

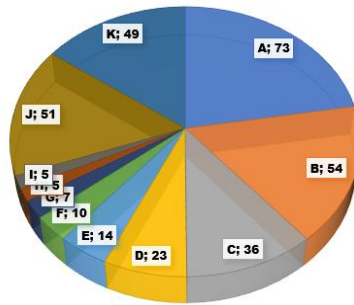


Рис. 5. 13.08.2025 о 19:07 поблизу с. Грем'яче Острозької територіальної громади Рівненського р-ну під час змолочування зерна загорівся комбайн John Deere [10]



Рис. 6. На Вінниччині у полі загорівся комбайн 17.03.2026 р. [11]

На основі представлених на рис.7, 8 діаграм можливо зробити висновок, що основним місцем виникнення загорянь є двигун та електрична система, а джерелами запалювання – розпечені продукти горіння і нагріті ними поверхні та теплові прояви електричної енергії.



A – пошкодження деталі, витік або поломка, B – коротке замикання, замикання на землю, C – аварія під час роботи з паливом, D – відсутність технічного обслуговування або неправильна експлуатація, E – зворотний спалах, F – неправильне використання пальника, відкритого полум'я або сигарети, G – підозріле походження, H – підпал, I – механічна несправність, J – інше, K – не повідомлено або невідомо, побудований авторами статі на підставі даних табл.5 [12, С.7]

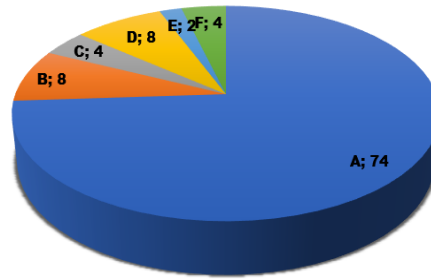
Рис. 7. Дані про фактори займання по 327 пожеж сільськогосподарської техніки в 1984 р.



A – ріжучий апарат комбайна, B – електросистема, C – двигун, D – інші частини комбайна, E – підшипники і ремені, побудований авторами статі на підставі даних табл.3 [13, С.7]

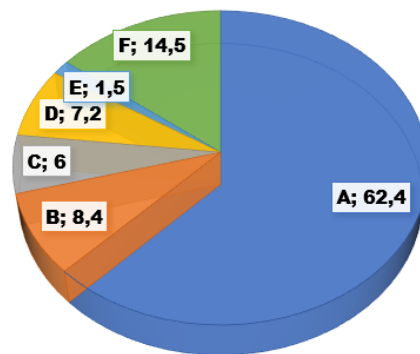
Рис. 8. Порівняння частоти виникнення пожеж в основних осередків комбайнів (%)

У роботі [14] викладені результати дослідження пожеж на сільськогосподарській техніці, проведений в США на двох рівнях. У першому випадку територія обмежувалася штатом Індіана і виключно комбайнами. У другому випадку були використані матеріали звітів Національної системи оповіщення про пожежі (NFIRS), які охоплювали значно більшу територію, а крім комбайнів включали і сільськогосподарські трактори. Зокрема, вивчалися місця виникнення загорянь. У штаті Індіана 74% з цих пожеж виникли в моторному відсіку, а ще 8% – на стику двигуна і кабіни. В якості основної причини були вказані несправності електрообладнання (34%). У разі аналізу даних NFIRS, про причини займання, найбільший відсоток загорянь також припадає на машинне відділення і становив в середньому близько 62 %. В якості матеріалів, про які найчастіше повідомлялося, були рослинні залишки і рідке моторне паливо. Згідно з даними NFIRS, найчастіше згадується моторне паливо, що може бути пов'язано з тим, що на багатьох тракторах (в порівнянні з комбайнами) паливні баки і отвори для заливки палива розташовані в безпосередній близькості від двигуна, вихлопної труби або інших потенційних джерел. Узагальнені результати наведені на діаграмах (рис.9, 10).



А – двигун, В – двигун / межа з перегородкою, С – зона обмолоту / очищення, D – підшипник (поза двигуном), Е – зона кабіни, F – невідомо / інше, побудований авторами статі на підставі даних табл.6 [14, С.5]

Рис. 9. Місця виникнення пожеж для 50 випадків пожеж зернозбиральних комбайнів в Індії



А– зона двигуна, В – відкритий майданчик, С – зона водія, D – паливний бак / паливопровід, Е – бункер / завантажувальна воронка, F – інше або невідоме, побудований авторами статі на підставі даних табл. 7 [14, С.6]

Рис. 10. Місця виникнення пожеж для 3655 випадків пожеж на комбайнах і тракторах в 1982-1984 за даними NFIRS (середнє значення)

У ряді країн були проведені дослідження з вивчення залежності кількості пожеж на сільськогосподарській техніці від місяців, днів тижня і часу. Згідно з даними NFIRS (США), день тижня, час доби і місяць року, швидше за все відіграють певну роль в частоті виникнення пожеж [12; 14]. Відповідні залежності надано на рис. 11-13.

Як видно з рис.11 найбільша кількість пожеж сталася у червні, жовтні та листопаді. А протягом тижня – відповідно вівторок і середа (рис. 12). З рис. 13 видно що, найбільша кількість пожеж відбувається в діапазоні від 14.00 до 16.00 годин.

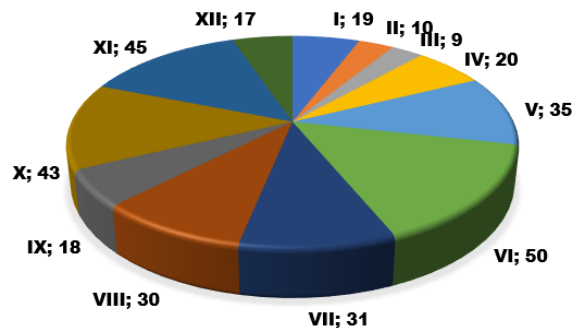


Рис. 11. Розподіл числа пожеж на комбайнах по місяцем року, побудований авторами статі на підставі даних. [13, С.6]

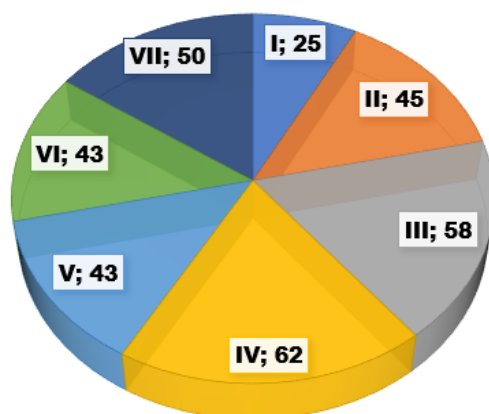


Рис. 12. Розподіл числа пожеж на комбайнах по дням тижня побудований авторами статі на підставі даних. [13, С.6]



A – 0 - 6 годин ранку, B – 6-8 годин, C – 8-10 годин, D – 10-12 годин, E – 12-14 годин, F – 14-16 годин, G – 16-18 годин, H – 18-20 годин, I – 20-22 годин, J – 22 -24 годин, K – невідоме, побудований авторами статі на підставі даних. [14, С.5]

Рис. 13. Виникнення пожеж на комбайнах по годинах доби (дані NFIRS по 3655 загорянь)

Висновки

Отримані в роботі результати обробки статистичних даних дозволяють оцінити потенційно небезпечні умови експлуатації сільськогосподарської техніки та прогнозувати відповідні заходи забезпечення пожежної безпеки.

Список використаних джерел

1. Аграрний сектор формує майже п'яту частину ВВП України. Перший Бізнесовий: веб-сайт. URL: <https://fbc.biz.ua/news/ekonomika-uk/agrarnij-sektor-formuye-majzhe-p-yatu-chastinu-vvp-ukrayini/> (дата звернення: 17.03. 2026).
2. Ігор Гриник: без наукового забезпечення стратегія розвитку – провальна. Національна академія аграрних наук України: веб-сайт. URL: http://naas.gov.ua/news/?ELEMENT_ID=8181 (дата звернення: 17.03. 2026).
3. Лисюк О., Балаш Л. Підвищення ефективності виробництва продукції рослинництва як запорука поступального розвитку аграрного сектору економіки. Аграрна економіка. 2023. № 1-2, т. 16. С. 132-139. doi.org/10.31734/agrarecon2023.01-02.132.

4. Коломієць Т. В. Взаємозв'язок розвитку матеріально-технічної бази та інтелектуального капіталу для інноваційної діяльності аграрних підприємств. Агросвіт. 2020. № 24. С. 65–71. DOI: 10.32702/2306-6792.2020.24.65.

5. Спаський І. Д. Механізми трансформації основного капіталу агросектору на основі цифрових інновацій: дис. к.е.н.: 08.00.03 / Одеськ. нац. технолог. ун-т. Одеса, 2025. 228с.

6. В Україні трактористи — у трійці лідерів серед популярних професій. Traktorist.ua: веб-сайт. URL: <https://traktorist.ua/news/v-ukrayini-traktoristi-u-triyci-lideriv-sered-populyarnih-profesiy> (дата звернення: 14.03. 2026).

7. Найдефіцитніша професія в агросекторі — тракторист. Traktorist.ua: веб-сайт: <https://traktorist.ua/news/3455-naydefitsitnisha-profesiya-v-agrosetori--traktorist> (дата звернення: 14.03. 2026).

8. Про затвердження правил пожежної безпеки в агропромисловому комплексі України: Наказ Міністерства аграрної політики України, МНС України від 04.12.2006 № 730/770. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0313-07#Text> (дата звернення: 18.03. 2026).

9. Під час жнив на Харківщині вщент згорів комбайн. SuperAgronom.com. веб-сайт: URL: <https://superagronom.com/news/7748-pid-chas-jniv-na-harkivschini-vschent-zgoriv-kombayn> (дата звернення: 14.03. 2026).

10. На Рівненщині під час жнив загорівся комбайн John Deere. Traktorist.ua: веб-сайт. URL: <https://traktorist.ua/news/na-rivnenshchini-pid-chas-zhniv-zagorivsya-kombayn-john-deere> (дата звернення: 14.03. 2026).

11. На Вінниччині у полі загорівся комбайн. Вінниця Преспоінт. веб-сайт: URL: <https://presspoint.in.ua/2026/03/17/na-vinnychchyni-u-poli-zagorivsia-kombayn/> (дата звернення: 18.03. 2026).

12. Shutske J., Field W. The Nature and Magnitude of Fires Involving Agricultural Equipment. URL: https://www.researchgate.net/publication/319099875_The_Nature_and_Magnitude_of_Fires_Involving_Agricultural_Equipment (дата звернення: 12.03. 2026).

13. Val-Aguasca J., Videgain-Marco M., Martín-Ramos P. and all. Fire Risks Associated with Combine Harvesters: Analysis of Machinery Critical Points. Agronomy. 2019. Vol.2, №12. 877. DOI: 10.3390/agronomy9120877.

14. Shutske J. An Integrated Loss Control Strategy for Grain Combine Fires. URL: https://www.researchgate.net/publication/319099877_An_Integrated_Loss_Control_Strategy_for_Grain_Combine_Fires (дата звернення: 12.03. 2026).

Отримано: 03.04.2026. Прийнято: 15.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Сіняєва О. В.

ORCID iD: 0000-0001-5954-2355

E-mail: masay020488@gmail.com

Пак А. О.

ORCID iD: 0000-0003-3140-3657

E-mail: pak.andr1980@gmail.com

Крекот М. М.

ORCID iD: 0000-0003-3449-3336

E-mail: krekotshm@gmail.com

Сичова Т. О.

ORCID iD: 0000-0001-9604-7847

E-mail: sychova@btu.kharkiv.ua

Торяник Д. О.

ORCID iD: 0000-0002-0414-8569

E-mail: datory@gmail.com

Бакум М. В.

ORCID iD: 0000-0003-1049-0464

E-mail: bakymshm@btu.kharkov.ua

Козій О. Б.

ORCID iD: 0000-0001-5504-4244

E-mail: koziyabshm@btu.kharkov.ua

Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЧАСТОЧКИ В ПОВІТРЯНОМУ ПОТОЦІ МІЖ ВІБРУЮЧИМИ ПЛОЩИНАМИ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.191>

УДК 631.362

Сіняєва О.В., Пак А.О., Крекот М.М., Сичова Т.О., Торяник Д.О., Бакум М.В., Козій О.Б. **Фізико-математичне моделювання руху часточки в повітряному потоці між вібруючими площинами**

Анотація. Розглянуто питання математичного моделювання руху часточки в повітряному потоці між вібруючими робочими площинами. Розроблено спрощену модель руху часточки в повітряному потоці між вібруючими робочими площинами. Виконано аналіз похибки в отриманих результатах математичного моделювання за первинною і спрощеною моделями руху часточки.

Ключові слова вібропневматичний сепаратор, математичне моделювання, спрощена модель.

Siniaieva O., Pak A., Krekot M., Sychova T., Toryanyk D., Bakum M., Kozii O. **Physical-mathematical modeling of particle motion in air flow between vibrating planes**

Abstract. Separation of grain materials in the air stream between vibrating working planes is a more rational method that provides an increase in the separation time without increasing the size of the separator and energy losses in the separation process, which is pneumatic separation between two vibrating planes. The effectiveness of this separation method and its result depend on the optimal values of the parameters of the separation process, for example, such as the air flow speed, the frequency and amplitude of oscillations of the working surfaces, as well as the distance between them. The justification of the listed parameters can be performed by mathematical modeling of the separation process. But the model of particle motion in the air stream between vibrating working planes is difficult to use in production conditions. Therefore, the aim of the work was to simplify the theoretical model of the symmetric motion of a particle in the air stream under the action of vibration of the working planes, in

order to quickly determine the parameters of the separation process of grain materials without significant loss of calculation accuracy. The results of calculations based on a simplified model of particle motion in the air flow between vibrating working planes make it possible to effectively separate the components of grain material and predict its results with minimal loss of accuracy.

Key words: vibropneumatic separator, mathematical modeling, simplified model

Постановка проблеми у загальному вигляді

Одним із основних способів очищення та сортування зернових матеріалів являється пневмосепація. Цей спосіб набув широкого використання за рахунок своєї простоти і високої продуктивності. Одночасно з цим пневматичні сепаратори високоефективно розділяють компоненти насінневих сумішей з різними коефіцієнтами вітрильності. При використанні пневматичних сепараторів у якості машини для попереднього очищення зернових матеріалів в основному використовуються конструкції з вертикальними сепарувальними каналами, задачею яких являється виокремити з матеріалу компоненти з високою вітрильністю. При цьому часу за який компоненти зернового матеріалу проявляють свої аеродинамічні властивості цілком достатньо. Інша ситуація складається з пневматичними сепараторами, задачею яких являється сортування компонентів зернових сумішей або додаткова сепація зернових матеріалів з метою виокремлення у смітні фракції важковідокремлюваних компонентів. У такому випадку компонентам зернового матеріалу необхідно значно більше часу щоб проявити свої аеродинамічні властивості. Тому спеціальні пневмосепаратори мають обмежену продуктивність і ефективність роботи, що може бути вирішене за рахунок збільшення довжини робочої частини сепарувального каналу. В реальному секторі промисловості такі пневмосепаратори не використовуються, оскільки мають значні габарити і низьку енергоефективність. Більш раціональним способом, який забезпечує підвищення часу сепації без збільшення розмірів сепаратора і втрат енергії на процес сепації, являється пневмосепація між двома коливальними площинами, запропонований в патенті [1] і реалізований в лабораторних установках. В такому способі компоненти зернових сумішей рухаються не тільки під дією повітряного потоку і сили тяжіння, а і під дією коливань робочих площин, що значно підвищує час перебування компонента зернового матеріалу в зоні сепації. Ефективність такого способу сепації і його результат залежать від оптимальних значень параметрів процесу сепації, наприклад таких, як швидкість повітряного потоку, частота і амплітуда коливань робочих поверхонь, а також відстань між ними. Обґрунтування перелічених параметрів можна виконати шляхом математичного моделювання процесу сепації, що дає можливість ефективно виконати розділення компонентів зернового матеріалу і прогнозувати його результати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичними дослідженнями руху часточки в повітряному потоці займалися багато вчених серед яких П.М. Василенко [3]. Дослідження взаємодії тіл при ударі досліджував В.Ю. Плявнікс в роботі [4], а А.Е. Кобринський і А.А. Кобринський виконували дослідження періодичного руху часточки під дією віброуючих робочих органів [5]. В роботі виконані теоретичні дослідження які ґрунтувались на результатах праць цих вчених.

Мета статті. Мета роботи полягає у спрощенні теоретичної моделі симетричного руху часточки в повітряному потоці під дією вібрації робочих площин для можливості швидкого визначення параметрів процесу сепації зернових матеріалів без суттєвої втрати точності розрахунків.

Методи. В роботі застосовувались теоретичні методи дослідження, засновані на результатах, отриманих в роботах П.М. Василенка, В.Ю. Плявнікса, А.Е. Кобринського й А.А. Кобринського.

Виклад основного матеріалу дослідження

Виконаємо теоретичні дослідження спираючись на попередні результати досліджень і припущення зроблені в роботі [5]. В зазначеній роботі були отримані рівняння удару кулі по поверхні площини в просторі, а також диференційні рівняння що описують рух частки під дією повітряного потоку на протязі часу її переміщення між вертикальними робочими площинами сепаратора. Так маємо рівняння швидкості кулі після її взаємодії з робочою площиною:

$$v_x = u_x - \frac{\mu(u_x + \varpi_z r)}{1 + \mu}, \quad (1)$$

$$v_y = -R u_y, \quad (2)$$

$$v_z = u_z - \frac{\mu(u_z - \varpi_x r)}{1 + \mu}, \quad (3)$$

та кутову швидкість руху кулі після її взаємодії з робочою площиною:

$$\Omega_x = \varpi_x + \frac{u_z - \varpi_x r}{r(1 + \mu)}, \quad (4)$$

$$\Omega_y = \varpi_y, \quad (5)$$

$$\Omega_z = \varpi_z - \frac{u_x + \varpi_z r}{r(1 + \mu)}, \quad (6)$$

де $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ – швидкість точки удару кулі до її взаємодії з робочою площиною;
 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$, $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ – швидкість центра мас кулі після її взаємодії з робочою площиною;

$\vec{\varpi} = (\varpi_x, \varpi_y, \varpi_z)$ – кутова швидкість руху кулі до її взаємодії з робочою площиною;

$\vec{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ – кутова швидкість руху кулі після її взаємодії з робочою площиною;

r – радіус кулі; ρ – радіус інерції кулі;

$\mu = (\rho/r)^2$, що у нашому випадку знаходиться в межах $0 < \mu < 2/3$

Момент переходу від швидкості руху центра маси кулі до швидкості руху точки дотику кулі з робочою площиною описується залежностями:

- до взаємодії кулі з робочою площиною

$$U_x = u_x + \varpi_z r, \quad U_y = u_y, \quad U_z = u_z - \varpi_x r, \quad (7)$$

- після взаємодії кулі з робочою площиною

$$V_x = v_x + \Omega_z r, \quad V_y = v_y, \quad V_z = v_z - \Omega_x r. \quad (8)$$

де $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)$ – швидкість руху точки дотику кулі з робочою площиною.

Диференційні рівняння руху центра мас кулі представляються в такому вигляді:

$$\ddot{x} = -k(\dot{x} - V_n) \sqrt{(\dot{x} - V_n)^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}, \quad (9)$$

$$\ddot{y} = A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_1) - g \sin \alpha - k\dot{y} \sqrt{(\dot{x} - V_n)^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}, \quad (10)$$

$$\ddot{z} = g \cos \alpha - k\dot{z} \sqrt{(\dot{x} - V_n)^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}, \quad (11)$$

де k – коефіцієнт опору середовища;
 g – прискорення вільного падіння;
 V_n – середня швидкість повітряного потоку між робочими площинами;
 A – амплітуда коливань робочих площин;
 ω – частота коливань робочих площин;
 α – кут відхилення робочих площин від вертикальної площини;
 φ_1 – фаза взаємодії часточки з робочою площиною.

Рівняння записані для відносної системи координат. Ця система не змінює свого положення відносно робочої площини. Орієнтація системи координат організована таким чином що напрям осі x співпадає з напрямом проєктованого повітряного потоку між робочими площинами, ось y спрямована перпендикулярно до робочих площин, а ось z у напрямку дії сили тяжіння що співпадає з перпендикуляром до приймачів часток. Початок координатних осей знаходиться в точці взаємодії робочої площини з поверхнею часточки. Було зроблено припущення, що тертя часточки і середовища, за умови обертального руху часточки, суттєво не впливає на закономірність зміни кутової швидкості часточки, тому може не враховуватись при теоретичних дослідженнях. При цьому в теоретичній моделі зміна кутової швидкості часточки буде змінювати своє значення тільки у момент взаємодії часточки з робочою поверхнею.

В роботі розглядається сталий режим руху часточки, при якому часточка рухається між робочими площинами по однотипним траєкторіям, з періодичністю рівною частоті коливань робочих площин. При цьому слід звернути увагу на те що час переміщення часточки від однієї робочої площини до іншої, наближений до половини періоду. Тобто час переміщення часточки між робочими площинами дуже малий, що тільки підтверджує доцільність зробленого вище припущення. Тоді рівняння (6) можна спростити до такого:

$$\ddot{y} = A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi_1) - g \sin \alpha. \quad (12)$$

Таке спрощення дає можливість легко інтегрувати рівняння (8):

$$\dot{y} = -gt \sin \alpha - A\omega \cos(\omega t + \varphi_1) + C_1; \quad (13)$$

$$y = C_1 t - A \sin(\omega t + \varphi_1) - \frac{1}{2} g t^2 \sin \alpha + C_2. \quad (14)$$

В рівняннях (9) (10) для визначення сталих C_1 і C_2 при $t = 0$ приймаємо початкові умови $y = r$, $\dot{y} = v_{y1}$. В результаті отримаємо рівняння швидкості і прискорення часточки при її русі між робочими площинами вздовж осі y :

$$\dot{y} = v_{y1} - gt \sin \alpha - A\omega [\cos(\omega t + \varphi_1) - \cos \varphi_1], \quad (15)$$

$$y = r - A [\sin(\omega t + \varphi_1) - \sin \varphi_1] + A\omega t \cos \varphi_1 + v_{y1} t - \frac{1}{2} g t^2 \sin \alpha. \quad (16)$$

Для визначення швидкості і прискорення часточки при її русі у зворотному напрямі в межах другої половини одного періоду при $t = t_1$ приймаємо початкові умови $y = B - r$, $\dot{y} = v_{y2}$, і отримуємо наступні рівняння:

$$\dot{y} = v_{y2} - g(t - t_1) \sin \alpha - A\omega [\cos(\omega t + \varphi_1) - \cos(\omega t_1 + \varphi_1)], \quad (17)$$

$$y = B - r - A[\sin(\omega t + \varphi_1) - \sin(\omega t_1 + \varphi_1)] + \\ + A\omega(t - t_1)\cos(\omega t_1 + \varphi_1) + v_{y2}(t - t_1) - \frac{1}{2}g(t - t_1)^2 \sin \alpha \quad (18)$$

де B – відстань між робочими площинами;

t_1 – час переміщення часточки між її взаємодією з першою та другою робочими площинами.

За отриманими спрощеними рівняннями (15)-(18) визначаємо параметри переміщення часточки між площинами за один період. Вище приведені рівняння (9) і (11) будуть мати спрощений вигляд:

$$\ddot{x} = -k(\dot{x} - V_n)\sqrt{(\dot{x} - V_n)^2 + \dot{z}^2}, \quad (19)$$

$$\ddot{z} = g \cos \alpha - k\dot{z}\sqrt{(\dot{x} - V_n)^2 + \dot{z}^2}. \quad (20)$$

Прийнявши для порівняльних обчислень модель симетричного руху часточки [6] виконаємо розрахунки за рівняннями (12), (19) і (20) та порівняємо результат з значеннями отриманими за рівняннями (9) і (11). Також модель симетричного руху дає нам змогу виконувати розрахунки тільки в межах першого півперіоду $0,5T = \pi/\omega$, що веде до використання лише рівнянь (15) і (16), але обмежившись значеннями $\alpha = 0$, тобто тільки виключно вертикальне розміщення робочих площин. Окрім того додатково необхідно врахувати умови $y(\pi/\omega) = B - r$, і $\dot{y}(\pi/\omega) \cdot R = v_y$ що характерні для моделі симетричного руху частинки. В результаті застосування цих умов отримаємо:

$$v_y R - A\omega[\cos(\pi + \varphi) - \cos \varphi]R = v_y, \quad (21)$$

$$r - A[\sin(\pi + \varphi) - \sin \varphi] + \pi A \cos \varphi + \pi v_y / \omega = B - r. \quad (22)$$

де R – коефіцієнт відновлення швидкості після удару [7].

Наявні в рівняннях (21) і (22) невідомі величини v_y і φ визначаємо прийнявши рівняння як систему, в результаті отримаємо:

$$\varphi = \pi - \arcsin\left(\frac{b}{A} \cdot \frac{\tilde{R}}{\sqrt{4\tilde{R}^2 + \pi^2}}\right) - \operatorname{arctg} \frac{2\tilde{R}}{\pi}, \quad (23)$$

$$v_y = \frac{2A\omega R}{1 - R} \cos \varphi, \quad (24)$$

де $\tilde{R} = (1 - R)/(1 + R)$;

b – вільний зазор між робочими площинами, рівний: $b = B - 2r$.

Модель періодичного руху частинки може бути застосована тільки у випадку якщо часточка взаємодіє з обома робочими площинами. Тому обмеженнями такої моделі будуть такі величини як відстань між робочими площинами і амплітуда коливань робочих площин. З результатів (23) і (24) можливо визначити границю швидкості v_y при якій значення R буде рівним одиниці:

$$v_y = \frac{\omega}{\pi}(b - 2A). \quad (25)$$

Тоді, ґрунтуючись на нерівностях $|\sin x| \leq 1$ і $v_y > 0$ з врахуванням рівнянь (23), (24) і (25) отримаємо співвідношення:

$$\frac{b}{A} \cdot \frac{\tilde{R}}{\sqrt{4\tilde{R}^2 + \pi^2}} \leq A < \frac{b}{2}. \quad (26)$$

При проведенні досліджень нерівність (26) повинна бути врахована обов'язково, в інакшому випадку необхідно розглядати асиметричну модель руху часточки між робочими площинами.

Адекватність введених спрощень визначаємо шляхом порівняння результатів отриманих з використанням рівнянь (9), (10) і (11), з результатами отриманими по рівнянням (19), (20), (23), (24), (25) і (26). При виконанні розрахунків величини параметрів моделі приймалися наступними $A = 5 \text{ мм}$, $\alpha = 0^\circ$, $B = 20 \text{ мм}$, $V_n = 10 \text{ м/с}$, $k = 0,1 \text{ м}^{-1}$, $R = 0,6$, $r = 2 \text{ мм}$, $\mu = 0,4$, $\omega = 40 \text{ с}^{-1}$.

Висновки

Результати розрахунків по моделі без спрощень були наступними $v_x = 0,785 \text{ м/с}$, $v_y = 0,058 \text{ м/с}$, $v_z = 0,857 \text{ м/с}$, $\omega_x = 428,626 \text{ с}^{-1}$, $\omega_z = -392,277 \text{ с}^{-1}$. Результати розрахунків по спрощеній моделі $v_x = 0,784 \text{ м/с}$, $v_y = 0,058 \text{ м/с}$, $v_z = 0,857 \text{ м/с}$, $\omega_x = 428,638 \text{ с}^{-1}$, $\omega_z = -392,188 \text{ с}^{-1}$.

Слід зазначити що розрахунки виконані за спрощеною моделлю виконуються в чотири рази швидше ніж розрахунки по вихідній (точній) моделі.

Похибка отримана в розрахунках має невелике значення і у середньому становить 0,1135% з максимальним значенням біля 0,5% при визначенні швидкості руху часточки по осі y .

Список джерел інформації

1. Патент на корисну модель 64488 від 10.11.2011. Вібросепаратор вертикального типу з повітряним потоком для розділення сипучих сумішей / Сіняєва О.В., Завгородній О.І.: Україна, Український інститут промислової власності.
2. Завгородній А.И., Синяева О.В. Движения шара в воздушном потоке между вибрирующими плоскостями *Вібрації в техніці та технологіях*: Всеукраїнський науково-технічний журнал, №3(67).– Вінниця: ВНАУ, 2012.– С.20-27.
3. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин.– изд-во УАСХН, 1960.–284с.
4. Плявниекс В.Ю. Пространственное соударение двух тел *Вопросы динамики и прочности*. – Рига: “Зинатне”, 1970, вып. №20.– С.75-88.

References

1. Vertical type vibrating separator with air flow for separation of bulk mixtures / O.V. Siniaeva, O.I. Zavgorodniy. - Utility model patent 64488 dated 10.11.2011.: Ukraine, Ukrainian Institute of Industrial Property.
2. Zavhorodnyi A.Y., Syniaeva O.V. Dvyzheniya shara v vozdushnom potoke mezhdru vybryuiushchymy ploskostiamy *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*: Vseukrainskyi naukovo-tekhnichnyi zhurnal, №3(67).– Vinnytsia: VNAU, 2012.– S.20-27.
3. Vasylenko P.M. Teoryia dvyzheniya chastytsy po sherokhovatym poverkhnostiam *selskokhoziaistvennykh mashyn*.– yzd-vo UASKhN, 1960.–284s.
4. Pliavnyeks V.Yu. Prostranstvennoe soudarenie dvukh tel *Voprosy dynamyky y prochnosti*. – Ryha: “Zynatne”, 1970, vyp. #20.– S.75-88.

Отримано: 08.04.2026. Прийнято: 20.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Ляшенко С. О.

ORCID iD: 0000-0001-8304-9309

E-mail: lyashenkosa05@ukr.net

Фесенко А. М.

ORCID iD: 0000-0002-0033-4495

E-mail: alla.ecology3006@gmail.com

Кісь В. М.

ORCID iD: 0000-0002-7014-4873

E-mail: vkisprof@ukr.net

Державний біотехнологічний
університет, м. Харків, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПЕЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ РОЗЧИНУ У ВИПАРНІЙ УСТАНОВЦІ ЦУКРОВОГО ЗАВОДУ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.197>

УДК 631:004.81; 664.1; 004.9:63

Ляшенко С. О., Фесенко А. М., Кісь В. М. **Визначення критеріїв ефективності безпечного процесу випарювання розчину у випарній установці цукрового заводу**

Анотація. У статті розглядається система керування технологічним процесом випарювання соку у багатокорпусних випарних установках (БВУ) цукрових заводів. Проведений аналіз особливостей процесу показав, що ефективність випарювання залежить від точності дотримання режимів та показників відповідно до теплового розрахунку. Визначено основні напрямки підвищення ефективності роботи в системі керування динамічним технологічним процесом випарювання, що дає можливість оптимізувати режими випарювання соку.

Аналіз ефективності роботи БВУ дав змогу визначити основні показники та критерії, які впливають на процес оптимізації випарювання у БВУ. Проведено обґрунтування значень цих критеріїв у процесі випарювання соку. Обґрунтовано застосування такого універсального показника ефективності роботи БВУ як «умовне паливо».

Розглянуто застосування показника якості продукції, кольоровості, що також впливає на ефективність роботи БВУ. Визначено діапазони кольоровості, які характеризують високу якість соку в процесі випарювання.

Обґрунтовано питання безпеки, яких необхідно дотримуватись працівникам при виконанні ТП випарювання. Застосування автоматизованої системи керування роботою БВУ дає можливість підвищити продуктивність праці, безпеку на робочому місці, покращити умови праці, зменшити травматизм та захворюваність у відділенні випарювання цукрового заводу.

Запропоновані напрями та чіткі критерії ефективності процесу випарювання з визначеними діапазонами дають змогу удосконалити моделювання в автоматизованих системах керування з метою оптимізації режимів роботи БВУ.

Ключові слова: випарна установка, умовне паливо, процес випарювання, критеріїв ефективності, безпека процесу, продуктивність, кольоровість.

Liashenko S., Fesenko A., Kis V. **Development of Efficiency Criteria for Safe Evaporation in Multiple-Effect Evaporator Units at Sugar Plants**

Abstract. This paper examines the control system of the technological process of juice evaporation in multiple-effect evaporator units (MEE) used at sugar plants. The analysis of process features has shown that the efficiency of evaporation is largely determined by the accuracy of maintaining operating conditions and parameters defined by thermal calculations.

The main directions for improving the efficiency of control systems for the dynamic evaporation process are identified, enabling the optimization of MEE operating modes. Based on the performance analysis of evaporator units, a set of key indicators and criteria influencing the optimization of the evaporation process has been determined, and their rational values have been substantiated.

The use of a universal efficiency indicator, namely “equivalent fuel consumption,” is justified, as it integrally characterizes the energy efficiency of the process. In addition, a product quality indicator—juice color—is considered, which significantly affects the overall efficiency of MEE operation. The ranges of color values corresponding to high product quality during the evaporation process are defined.

Special attention is paid to occupational safety issues associated with the evaporation process. It is shown that the implementation of automated control systems for MEE operation contributes to increased labor productivity, improved working conditions, and reduced occupational injuries and morbidity.

The proposed directions for improvement and the defined efficiency criteria with specified operating ranges can be used to enhance modeling accuracy in automated control systems aimed at optimizing the operating modes of multiple-effect evaporator units.

Keywords: *evaporation plant, equivalent fuel, evaporation process, efficiency criterion, safety of the process, productivity, color.*

Вступ. У сучасних умовах, коли питанням безпеки та умовам праці в цукровому виробництві надають суттєвої уваги, виникають комбіновані взаємопов'язані проблеми забезпечення умов та безпеки при тому, що треба також підвищувати ефективність виробничого процесу. Залежність різних складових процесу випарювання повинна базуватись на оптимізаційних складових технічного процесу [1, 2].

Постановка проблеми. Цукрове виробництво є провідною продуктовою галуззю держави. Виробництво цукру відрізняється складністю та енергозатратністю. Підвищення ефективності цукрового виробництва базується на застосуванні найсучасніших безпекових та технологічних засадах виробництва, обладнання, оптимізації режимів роботи із застосуванням сучасних автоматизованих систем керування процесами та обладнанням, а також на удосконаленні організації процесу [1, 2, 3].

Підвищення ефективності цукрового виробництва в значній мірі залежить від застосування теоретично та інженерно обґрунтованих і практично здійснюваних безпечних режимів роботи всіх виробничих підрозділів цукрового заводу. Найбільш енергозатратним етапом є випарювання соку у випарній установці. При цьому треба відмітити, що пара з випарної установки подається на всі інші виробничі підрозділи і ділянки. Відповідно, регулювання подачі енергоносіїв та оптимізація їх подачі у випарну установку є однією з основних задач щодо забезпечення ефективності роботи всього цукрового заводу [1-3].

Крім того, другою важливою проблемою забезпечення ефективності цукрового виробництва є отримання високоякісної продукції - цукру. Цей напрям, в свою чергу, залежить від чіткого дотримання режиму роботи випарної установки та оперативного реагування на зміни у виробничому процесі, які пов'язані з якістю сировини. Тому питання оптимізації витрат енергоносіїв, якості продукції та обсягів продукції – основа ефективної роботи цукрового заводу. При цьому невід'ємною складовою системи управління процесом є і ефективність, спрощення та безпечність людської праці [1-4].

Аналіз стану питання. Для підвищення ефективності роботи та оптимізації режимів важливе значення має розробка програмного та математичного забезпечення системи керування технологічним процесом (ТП) випарювання. Підвищення ефективності керування процесом здійснюється шляхом розрахунку теплового режиму

роботи багатокорпусної випарної установки (БВУ) та впровадження моделей у математичне забезпечення, що враховують показники соку у БВУ цукрового заводу [2, 3].

До енергозберігаючих заходів, які оптимізують використання тепла в роботі БВУ, відносяться технології, що створюють потенціал економії пари, і які реалізуються при одночасній компенсації недовипарювання води у БВУ. За таким підходом енергозберігаючі заходи можна розподілити на наступні основні групи:

- комплексні заходи, які забезпечують зменшення величин паровідборів із БВУ при одночасному підвищенні концентрації сиропу;
- заходи, що створюють потенціал економії пари у технологічному процесі;
- заходи, які в одних умовах можуть виступати як комплексні, а в інших - в якості створюючих потенціал економії пари (тепла) у технологічному процесі випарювання [1-4].

Для визначення найбільш ефективних і раціональних шляхів регулювання роботи випарної установки було проведено аналіз ефективності різних методів. Враховувався ступінь їхнього впливу на зміну концентрації сиропу і на загальну ефективність використання тепла. Моделі цукрових заводів відповідають різному технічному рівню підприємств, як за набором устаткування, так і за їх продуктивністю. У деяких випадках математичні моделі змінювалися (коригувалися величини поверхонь нагрівання окремих корпусів, додавалися підігрівники тощо) для можливості більш повного відстеження впливу того або іншого фактора [4, 5, 6].

Предметом дослідження є застосування сучасного наукового інженерного підходу до визначення діапазонів значень енергетичних та якісних критеріїв ефективності процесу керування роботою БВУ [5-7].

Метою роботи є розробка ефективних критеріїв, що дають можливість їх застосовувати в системі безпечного та ефективного керування оптимізаційним процесом випарювання БВУ цукрового заводу.

Критеріями ефективності роботи БВУ є оптимізація витрати енергоносіїв, підтримання якості продукції та обсягів випущеної продукції. Виходячи з наведеної мети визначимо основні методи, які застосовуватися для оптимізації та коригування роботи БВУ:

1. Застосування компресії вторинної пари випарної установки і зміна кількості стисненої пари.
2. Зміна виходу пари з останнього корпусу випарної установки в конденсатор.
3. Зміна величини використання тепла вторинних джерел.
4. Зміна тиску гріючої пари першого корпусу БВУ.
5. Переключення обігрівання споживачів на пару іншого корпусу випарної установки або підключення (відключення) додаткових підігрівників.
6. Використання перепусків пари між корпусами випарної установки.
7. Подача води в збірник перед випарною установкою.

Залежно від поставлених технологічних задач оптимізації ТП випарювання значною проблемою може виступати подача та керування витратою енергоносіїв, що подаються на БВУ. Одним з головних наведених оптимізаційних підходів буде керування витратою палива, що подається на перший корпус БВУ, та перетворенням його на пару для забезпечення якості продукції і кількості розчину на виході з БВУ [5-8].

Відповідно, критеріями ефективності роботи БВУ буде витрата палива, що забезпечує оптимальну роботу БВУ. Оскільки для процесу випарювання можуть використовуватися різні енергетичні види палива (газ, вугілля, мазут, тощо), для зручності можна здійснювати перерахунок витрат палива в «умовне», що допомагає врахувати теплоту згорання різних видів енергоносіїв. Ці показники легко можуть

приводиться до маси буряків та перероблюваного цукру. Визначення витрати енергоносіїв, приведених до витрати умовного палива на випарну установку (ВУ) - це ключовий етап оцінки ефективності енергетичної складової теплової схеми цукрового заводу [1-3].

Алгоритм реальної роботи випарної установка наступний:

1. Паливо, що використовується в цукровому заводі (газ) потрапляє в котел, після якого отримується свіжа (первинна пара);
2. Свіжа пара гріє 1 корпус;
3. Після 1 корпусу уворюється вторинна пара, яка нагріває сок у 2-му корпусі, а з 2 -го корпусу потрапляє в 3-й, потім в 4-й і, наостанок, в 5-й корпус.

Витрати умовного палива залежно від задачі дослідження та критерію ефективності можна визначати різними способами. Загальний підхід полягає в тому, що спочатку проводиться розрахунок теплового балансу роботи БВУ, визначається навантаження на корпуси БВУ і кількість пари, що забезпечує оптимальне розрахункове навантаження. Витрата «умовного палива» може відображатися наступними показниками:

- масою пари та інших енергоносіїв, що застосовуються для ТП випарювання, кг;
- витратою умовного палива до маси буряка, що перероблюється, кг/добу;
- питомими витратами умовного палива, %;
- кількістю теплового навантаження, яке необхідне для оптимального процесу випарювання, кДж;
- енергетичним тепловим навантаженням на корпуси БВУ, кВт.

Оптимізація витрати пари для процесу випарювання базується на розрахунку теплового та матеріального балансу випарювання. При цьому, витрата енергоносіїв може оцінюватися через: 1) кількість витраченої пари, 2) об'єм випареного розчину, 3) витрату води, 4) теплове навантаження тощо [2-5].

Для визначення оптимальних режимів роботи БВУ одним з найбільш ефективних є розрахунок витрати пари, теплового навантаження та площі нагрівання у випарних апаратах відповідно до теплового балансу [4-7].

Оскільки паливо витрачається на утворення первинної пари, яка подається, в основному, на перший корпус БВУ, то і подачу та регулювання пари необхідно визначати для першого корпусу. Для визначення коректного ефективного показника регулювання та оптимізації ТП випарювання у БВУ необхідно здійснювати переведення використаного палива в умовне паливо.

Переведення теплового навантаження на перший корпус БВУ у кДж в умовне паливо (у. п.), здійснюється шляхом поділу кількості теплоти на нижчу теплоту згоряння умовного палива, враховуючи ККД котла [6, 7].

Формула для розрахунку витрат умовного палива на БВУ:

$$B_{у.п.} = \frac{Q}{Q_{у.п.} \cdot \eta_k \cdot \eta_{тр}}, \text{ т. у. п./добу}, \quad (1)$$

$$B_{у.п.} = \frac{Q}{Q_{у.п.} \cdot \eta_k \cdot \eta_{тр}} = \frac{68968800}{29307 \cdot 0,9 \cdot 0,98} = 2668 \frac{\text{кг у. п.}}{\text{год}}, \text{ або } 2,7 \text{ т. у. п./год},$$

де $B_{у.п.}$ - витрата умовного палива, кг;

Q - теплове навантаження випарної установки, кВт. кДж – одиниця енергії. Тому для приведення до однакових показників та одиниць треба враховувати час. (кДж/добу, кДж/год, кДж/с). На нагрівання першого корпусу БВУ надходить 19156 кВт енергії (Відомо, що 1 кВт = 1 кДж/с, а в годині 3 600 секунд, доба має 24 години). Відповідно, теплове навантаження (потужність) на перший корпус БВУ за добу буде дорівнювати $19156 \cdot (3600) = 68968800$ кДж;

$Q_{у.п.}$ - 29 307 кДж/кг, - константа для умовного палива (теплота згоряння 1 кг антрациту);

$\eta_{тр}$ - втрати в паропроводах, 0,98;

η_k - ККД котла (у частках одиниці, 0,9). Оскільки не все паливо перетворюється на корисну енергію пари, потрібно знати ККД котла (зазвичай 0,85–0,92 для сучасних газових котлів).

Зі змінами теплового навантаження у БВУ, що виникають при порушенні теплового режиму, відповідно буде змінюватися і кількість умовного палива.

Питому витрату умовного палива визначаємо при продуктивності цукрового заводу G_d з виразу [4, 5, 7]:

$$b_{у.п.} = \frac{B_{у.п. д}}{G_d} 100; \quad (2)$$
$$b_{у.п.} = \frac{64037}{1800000} \cdot 100\% = 3.5\%$$

де $B_{у.п.д} = 2668 \frac{\text{кг у.п./год}}{\text{год}} \cdot 24\text{год} = 64037\text{кг/добу};$

G_d - 1800000 кг/добу - продуктивність цукрового заводу по буряку.

Як результат, витрата умовного палива на БВУ буде:

- 2,6 т у.п./год;

- 41,6 кг у.п./т буряка.

Після того, як визначено енергетичну складову і її показники, необхідно визначити коефіцієнт теплопередачі, що також впливає на оптимізаційні стратегії. Він залежить від товщі шару накипу в трубках БВУ. Коефіцієнт теплопередачі – це комплексна характеристика процесу передачі тепла від теплоносія до випарюваного розчину:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (3)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується, до зовнішньої стінки трубки;

$\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_{тр}}{\lambda_{тр}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n}$ – сумарний термічний опір стінки трубки і накипу;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої стінки трубки до киплячого розчину.

$\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_{тр}}{\lambda_{тр}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n}$ – сумарний термічний опір стінки трубки і накипу (значення 0,0034 - 0,0038 максимальна допустима величина).

У результаті, допустимими значенням K для оптимального процесу випарювання будемо вважати 0,2619.

Типові значення показників критеріїв якості наведено в таблиці 1.

Економічне обґрунтування теплоенергоєфективних режимів випарювання соку в БВУ проводиться на основі обсягів теоретично обґрунтованої витрати випареної з розчину води і об'ємів реально випареної води.

За таблицею 1 витрата гріючої пари на 1-й корпус БВУ при роботі за 1 год складає 31024 кг/год. При роботі БВУ у режимах, що перевищують оптимальні у 1,5 рази, витрата гріючої пари складе 46536 кг/год. Період роботи цукрового заводу в Україні у середньому складає 2 місяці. Тобто, за два місяці роботи кількість пари, що подається на 1-й корпус ВУ, становить 44674560 кг, а при роботі ВУ на режимах, що не відповідають нормативним значенням, витрати пари будуть становити 6701840 кг.

Таблиця 1

Типові оптимальні технологічні показники для режимів роботи у найбільш розповсюджених схемах роботи ВУ на цукрових заводах

Основні показники процесу випарювання	Чотирикорпусна БВУ з концентратором	П'ятикорпусна БВУ з попереднім підігрівом (на 3 к)	Вихідні показники процесу випарювання
	Значення вхідних показників випарювання для 1-го корпусу ВУ		
1. Температура гріючої пари, °С	132,0	131,6	-
2. Тиск гріючої пари, Па.	292000	184000	-
3. Витрати гріючої пари, кг/год	31024 (81613)	29400	-
4. Витрата соку у БВУ, %, до м. б.	132,8	121,9	29,75
5. Температура соку, що подається у ВУ, °С	122	121,3	80
6.Вміст сухих речовин у соку, (СР)	12,5	15,8	60-75
7. Каламутність, мг/дм ³	25-30	25-30	30-40
8. рН	10,8	11	7,8-8,0
9. Тривалість процесу випарювання, год.	1-1,1	0,75-0,85	0,75-1,1
10. Кольоровість, од. ICUMSA	100	140	200-250

Відповідно до ст. 28 Закону «України про охорону праці» та пункту 8 Положення Міністерства соціальної політики України, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 червня 2015 року № 423 (зі змінами) 05.10.2018 було видано наказ № 1467 Міністерства соціальної політики України «Правила охорони праці для працівників, зайнятих на цукровому виробництві». У Правилах визначено основні вимоги до забезпечення безпекових та санітарних складових технологічних процесів цукрового виробництва та умов праці при роботі з обладнанням. Також встановлено загальні вимоги до обладнання, вимоги безпечної експлуатації виробничого устаткування при випарюванні, вимоги безпеки під час здійснення технологічних процесів і виконання окремих видів робіт, а також вимоги безпеки під час зберігання матеріалів, тари, сировини, готової продукції та інших речовин [10].

Висновок. У роботі проведено аналіз критеріїв ефективності керування оптимізаційним процесом випарювання соку у випарній установці цукрового заводу. Аналіз базується на тепловій схемі випарного відділення, в результаті визначено такі енергетичні критерії як умовне паливо та їхні діапазони. Головним показником якості соку є кольоровість розчину, яка теж має контрольні рівні на вході та виході з БВУ. Всі ці критерії дають можливість регулювати оптимізаційний процес випарювання. Крім того, розглянуто безпекові та санітарно-гігієнічні складові процесу випарювання соку у БВУ.

Список використаних джерел

1. Власенко Л. О. Ладанюк А. П. (2010). Підвищення ефективності функціонування технологічного комплексу цукрового заводу за рахунок використання методів діагностики та прогнозування. Восточно-Европейский журнал передових технологій. 2/3 (44). 57-62. Режим доступу: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/1078>
2. Ladanyuk A., Kyshenko V., Shkolna O. (2015). Evaporator control under conditions of uncertainty: intellectualization of applied functions. Scientific works of The National University of Food Technologies. 21. 67-15.

3. Болтянська Н.І., Маніта І.Ю., Подашевська О. Проблеми і перспективи розвитку інформаційних технологій в сільському господарстві. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного. 2020. Т. 20. № 4. С. 175–185. DOI: 10.31388/2078- 0877-2020-20-4-175-185.

4. Штангесєв К. О. ВИПАРНІ УСТАНОВКИ ТА ТЕПЛОВІ СХЕМИ ЦУКРОВИХ ЗАВОДІВ. Серія навчально -методичних матеріалів. Київ 2015 © ЮНІДО 2015. 66с.

5. НАКАЗ 03.09.2012 № 449. Про затвердження Методики розрахунку норм питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства. Дата звернення 07.03.2026р.
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1606-12#Text>

6. Аналіз та експертиза проєктів енергопостачання: Розрахункова робота: навч. посіб. для студ. спеціальності 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М.М. Шовкалюк, О.І.Яценко – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. –69 с.

7. Ляшенко С.О., Кісь В.М., Фесенко А.М., Ляшенко О.С. Визначення ефективності математичних моделей процесу випарювання соку для автоматизованих систем управління. // *Науковий вісник ТДАТУ. Мелітополь*. Вип.9. том.1, с. 1-20. (DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-10)

8. Ляшенко С. Интеллектуальное управление технологическими процессами сахарного производства / С. Ляшенко, А. Ляшенко // *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. - Lublin-Rzeszow, Vol. 15, №7. 2013. - Р. 145-150.

9. Євтушенко, О. В., Сірик А. О., Лукянік О. П. Дослідження виробничого травматизму на підприємствах та організаціях цукрової промисловості України. *Цукор України*. 2015. № 4 (112). С. 31–35.

References

1. Vlasenko L. O. Ladaniuk A. P. (2010). Pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia tekhnolohichnoho kompleksu tsukrovoho zavodu za rakhunok vykorystannia metodiv diahnostryky ta prohnozuvannia. *Vostochno-Evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*.2/3 (44). Pp. 57-62. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/1078>

2. Ladanyuk A., Kyshenko V., Shkolna O. (2015). Evaporator control under conditions of uncertainty: intellectualization of applied functions. *Scientific works of The National University of Food Technologies*. 21. 67-15.

3. Boltianska N.I., Manita I.Iu., Podashevskia O. Problemy i perspektyvy rozvytku informatsiinykh tekhnolohii v silskomu hospodarstvi. *Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu imeni Dmytra Motornoho*. 2020. V. 20. № 4. pp. 175–185. DOI: 10.31388/2078- 0877-2020-20-4-175-185.

4. Shtanheiev K. O. Vyparni ustanovky ta teplovi skhemy tsukrovykh zavodiv. *Seriia navchalno -metodychnykh materialiv*. Kyiv, 2015. 66 p.

5. Nakaz 03.09.2012 № 449. Pro zatverdzhennia Metodyky rozrakhunku norm pytomykh vytrat palyvno-enerhetychnykh resursiv na pidpriemstvakh vodoprovodno-kanalizatsiinoho hospodarstva. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1606-12#Text>

6. Analiz ta ekspertyza proiektiv enerhopostachannia: Rozrakhunkova robota: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 144 «Teploenerhetyka» / KPI im. Ihoria Sikorskoho ; uklad.: M.M. Shovkaliuk, O.I.Iatsenko, Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021. –69 p.

7. Liashenko S.O., Kis V.M., Fesenko A.M., Liashenko O.S. Vyznachennia efektyvnosti matematychnykh modelei protsesu vypariuvannia soku dlia avtomatyzovanykh system upravlinnia. // *Naukovyi visnyk TDAU. Melitopol*. № 9. V.1, pp. 1-20. (DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-10)

8. Liashenko S. Yntellektualnoe upravlenye tekhnolohycheskymy protsesamy sakharneho proyzvodstva / С. Liashenko, А. Liashenko // *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*. - Lublin-Rzeszow, Vol. 15, №7. 2013. - P. 145-150.

9. Ievtushenko, O. V., Siryk A. O., Lukianik O. P. Doslidzhennia vyrobnychoho travmatyzmu na pidpriemstvakh ta orhanizatsiiakh tsukrovoi promyslovosti Ukrainy. Tsukor Ukrainy. 2015. № 4 (112). pp. 31–35.

Отримано: 03.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Сиромятников Ю. М.
ORCID iD: 0000-0001-9502-626X
E-mail: Gara176@btu.kharkov.ua

Сиромятніков П. С.
ORCID iD: 0000-0002-4960-7327
E-mail: Ukridu@gmail.com

Півень М. В.
ORCID iD: 0000-0002-9487-1450
E-mail: m.v.piven@gmail.com

Державний біотехнологічний
університет
м. Харків, Україна

РОБОТИЗОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ТВАРИННИЦТВІ: СУЧАСНІ СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.205>

УДК:636.08.087

Сиромятников Ю. М., Сиромятніков П. С., Півень М. В. *Роботизовані технології у тваринництві: сучасні системи та перспективи розвитку*

Анотація. Метою статті є здійснення комплексного огляду сучасних роботизованих і автоматизованих технологій, що впроваджуються у тваринництві з метою підвищення ефективності виробничих процесів, зниження експлуатаційних витрат, покращення добробуту тварин та забезпечення сталого розвитку галузі. Особлива увага приділена інтеграції штучного інтелекту (ШІ), Інтернету речей (IoT) та сенсорних систем у структуру тваринницьких господарств.

У статті систематизовано та проаналізовано функціональні можливості автоматизованих систем годівлі, доїння, моніторингу здоров'я, керування мікрокліматом і санітарного очищення. Встановлено, що впровадження цифрових рішень сприяє підвищенню продуктивності на 10–20%, зменшенню витрат на 30–50%, зниженню захворюваності тварин на 25–40% та скороченню використання антибіотиків на 20–25%. Показано, що застосування блокчейн-технологій підвищує рівень прозорості та біобезпеки в ланцюгу постачання. Також висвітлено переваги адаптивних систем управління, автоматизованого моніторингу фізіологічних показників тварин та використання алгоритмів глибокого навчання у точному тваринництві.

Огляд доводить ефективність впровадження роботизованих технологій як інструменту модернізації тваринництва. Встановлено, що цифрова трансформація сприяє зростанню економічної рентабельності, покращенню умов утримання тварин і екологічній стійкості виробництва. Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці адаптивних цифрових систем та вдосконаленні моделей управління для підтримки малих і середніх господарств.

Ключові слова: роботизовані технології, автоматизація тваринництва, штучний інтелект, Інтернет речей, економічна ефективність, моніторинг здоров'я, автоматизоване доїння, управління годівлею, мікроклімат, кібербезпека.

Syromyatnikov Yu.M., Syromiatnikov P.S., Dyakonov S.O., Piven M.V. **Robotic technologies in livestock farming: modern systems and development prospects.**

Abstract. This review aims to provide a comprehensive analysis of current robotic and automated technologies implemented in livestock farming to enhance production efficiency, reduce operational expenses, improve animal welfare, and ensure sustainable sectoral development. Particular attention is paid to the integration of artificial intelligence (AI), the

Internet of Things (IoT), and sensor-based systems into the infrastructure of livestock enterprises.

The study synthesizes the functional capabilities of automated systems for feeding, milking, health monitoring, microclimate control, and sanitation. Literature data indicate that the implementation of such technologies leads to a 10–20% increase in productivity, a 30–50% reduction in production costs, a 25–40% decrease in animal morbidity, and a 20–25% reduction in antibiotic use. The use of blockchain technologies is shown to improve traceability and biosafety within supply chains. The review also highlights the advantages of adaptive management systems, real-time monitoring of physiological parameters, and machine learning algorithms in the context of precision livestock farming. These technologies enable individualized feeding, early disease detection, optimized resource use, and improved milk quality through automated milking systems.

The findings confirm the effectiveness of robotic technologies as key tools for the modernization of livestock production. Digital transformation supports enhanced economic profitability, improved animal housing conditions, and reduced environmental impact. Further research should focus on developing adaptive AI-driven systems and decision-support models tailored to the needs of small and medium-sized farms, while ensuring data security and building digital competencies among farm personnel.

Keywords: *robotic technologies, livestock automation, artificial intelligence, Internet of Things, economic efficiency, health monitoring, automated milking, feeding management, microclimate, cybersecurity.*

Постановка проблеми

Сучасне тваринництво знаходиться на стадії глибокої цифрової трансформації, в основі якої лежать автономні системи, такі як роботи для роздачі повнораціонних кормів (TMR), що забезпечують точність та ефективність годівлі худоби [1]. У господарствах Італії активно застосовуються автоматичні системи годівлі, що дають змогу оптимізувати розподіл корму та скоротити трудові витрати [2]. Дослідження свідчать про високу оцінку переваг цих технологій фермерами в Італії, включно з покращенням точності годівлі та зменшенням виробничих витрат [3].

Рецензований аналіз різноманітних роботизованих систем підтверджує їх роль у підвищенні продуктивності та зменшенні залежності від ручної праці [4]. Зокрема, проекти автоматизованих систем роздачі корму демонструють ефективність дистанційного управління та можливість гнучкої адаптації до умов господарств [5]. Дослідження конструкції самохідного обладнання для точного годування молочних корів підтверджує його переваги у підвищенні ефективності фермерських операцій [6].

Розвиток інтелектуальних систем моніторингу фізіологічних показників тварин, зокрема за допомогою сенсорних технологій та алгоритмів машинного навчання, є пріоритетним напрямом у сучасному тваринництві [7]. Розпізнавання поведінки годівлі молочних корів за допомогою згорткових нейронних мереж демонструє високий потенціал автоматизації спостережень за тваринами [8]. Огляд інформаційних технологій у точному молочному тваринництві підкреслює актуальність поведінкового та здоров'я-моніторингу для підвищення продуктивності [9].

Систематичні огляди літератури засвідчують ефективність штучного інтелекту в моніторингу добробуту великої рогатої худоби, дозволяючи виявляти ознаки стресу і хвороб на ранніх стадіях [10]. Моделювання молочної продуктивності та якості на основі біометричних даних та щоденних кліматичних показників за допомогою штучного інтелекту відкриває нові можливості для точного управління фермою [11].

Інтелектуальні системи реального часу активно використовуються для моніторингу фізіологічного стану тварин, умов середовища та споживання води [12].

Біометричні методи ідентифікації, зокрема розпізнавання задньої частини тіла корови через полегшені нейронні мережі, удосконалюють автоматизовані системи обліку поголів'я [13].

Розробки в галузі сенсорних технологій та штучного інтелекту орієнтовані на підвищення добробуту тварин, із впровадженням гуманно-орієнтованих рішень [14]. Інноваційні підходи до класифікації поведінки тварин із використанням рекурентних нейронних мереж забезпечують точність визначення стану і потреб худоби [15].

Штучний інтелект дедалі активніше інтегрується у харчову промисловість, забезпечуючи оптимізацію процесів аналізу даних, передбачення якості продукції та покращення прийняття управлінських рішень [16]. Цифрова трансформація тваринництва із застосуванням новітніх технологій змінює парадигму фермерських практик у всьому світі [17].

Активно розвиваються технології RFID та Інтернету речей (IoT) для моніторингу гігієни та переміщення тварин, що дозволяє збирати великі обсяги даних у режимі реального часу [18]. Кіберфізичні системи з використанням робототехніки й штучного інтелекту значно покращують точність і швидкість виявлення змін у поведінці худоби [19]. Комп'ютерний зір все частіше застосовується у виробництві худоби, птахівництва та рибництва для аналізу поведінкових показників та підтримки добробуту [20].

Використання алгоритмів комп'ютерного зору допомагає приймати управлінські рішення у скотарстві, дозволяючи точніше оцінювати стан тварин [21]. На прикладі ферм у Бангладеші продемонстровано ефективність впровадження "розумних" практик ведення молочного господарства для забезпечення сталого розвитку [22]. Застосування штучного інтелекту на молочних фермах сприяє вдосконаленню спостереження за тваринами і прийняттю рішень щодо оптимізації їх добробуту [23].

Штучний інтелект також активно інтегрується в агропродовольчий сектор, сприяючи розвитку стійких і ефективних продовольчих систем [24]. Сучасні роботи у тваринництві відіграють дедалі важливішу роль у керуванні стадами, оптимізації процесів і підвищенні рівня гігієни [25]. Застосування сенсорів і роботизованих технологій забезпечує краще управління тваринницькими системами, сприяючи зменшенню захворюваності [26].

Удосконалення кіберфізичних систем дозволяє формувати більш точні й чутливі підходи до добробуту худоби за допомогою аналізу великих даних [27]. Вплив змін клімату на продуктивність великої рогатої худоби та можливості адаптації через точне тваринництво розглядаються у межах сучасних досліджень [28]. На конференціях із точного тваринництва активно обговорюються інноваційні рішення для моніторингу добробуту і продуктивності тварин [29].

Системи точного тваринництва також роблять значний внесок у покращення продуктивності й добробуту молочної худоби, використовуючи сенсори і передові аналітичні інструменти [30]. Смарт-агропроекти доводять потенціал розумного землеробства й тваринництва, водночас долаючи наявні труднощі та пропонуючи стратегії їх подолання [31].

У молочному скотарстві застосування інтелектуальних сенсорів дає змогу контролювати реальний стан тварин, підвищувати їх добробут і зменшувати втрати продуктивності [32]. Паралельно з розвитком технологій виникають нові етичні виклики, зокрема щодо автономності рішень та відповідальності алгоритмів [33].

Актуальні дослідження демонструють ефективність мобільних роботів та IoT для санітарної обробки у птахівництві, що суттєво підвищує рівень гігієни [34]. Використання сенсорних пристроїв, таких як вушні акселерометри, дозволяє з високою точністю відстежувати жування, споживання корму та фізіологічні параметри навіть у складних кліматичних умовах [35].

Окрему увагу приділяють боротьбі з антибіотикорезистентністю у молочному скотарстві шляхом застосування цифрових інструментів для моніторингу здоров'я [36]. Систематичні огляди технологій автоматизованого доїння висвітлюють основні тенденції та виклики розвитку галузі за останні 20 років [37].

Використання інтелектуальних моделей оцінки придатності земель для ведення сільського господарства дозволяє оптимізувати аграрне виробництво та підвищити ефективність використання ресурсів [38]. Сучасна роботизація в управлінні стадами, розкрита в енциклопедичних оглядах, трансформує парадигму управління в тваринництві [39].

Поєднання сенсорів, штучного інтелекту та робототехніки створює нове покоління систем для управління здоров'ям, продуктивністю та гігієною тварин [40]. Разом із цим актуалізується потреба в оновленні нормативного середовища, зокрема щодо біобезпеки та захисту великих даних [41].

Інноваційні проекти в галузі сільського господарства демонструють можливості мобільних роботів і технологій Інтернету речей для санітарної обробки пташників, підвищуючи стійкість виробництва [42]. Одночасно розвиваються системи сенсорного контролю фізіологічних індикаторів великої рогатої худоби, зокрема температури тіла, серцевого ритму та якості молока [43].

Розробка моделей оцінки придатності земель за допомогою штучного інтелекту сприяє кращому плануванню аграрного виробництва й ресурсів [44]. Інтеграція великих даних і машинного навчання суттєво змінює практики ведення сучасного тваринництва [45].

Застосування комп'ютерного зору дозволяє автоматично виявляти поведінкові особливості великої рогатої худоби й свиней у реальному часі [46]. Технології розпізнавання годівлі та стояння корів на вільному утриманні забезпечують точні дані для оптимізації умов утримання [47].

Методи глибокого навчання активно використовуються для автоматичного виявлення контактної поведінки свиней, що має важливе значення для оцінки добробуту [48]. Точне тваринництво також розглядається як ключова стратегія пом'якшення впливу тваринництва на довкілля [49].

Аналітичні моделі живлення, розроблені для регіонів із інтенсивним тваринництвом, допомагають знижувати негативні екологічні наслідки [50]. У рамках реалізації проектів у республіці Узбекистан активно впроваджуються концепції «розумних ферм», орієнтованих на сталий розвиток молочного тваринництва [51].

Оцінка технологічних ризиків і забезпечення безпеки праці на тваринницьких фермах розглядаються як невід'ємна складова сучасних інноваційних процесів [52]. Важливим напрямком стає також вивчення ефективності використання кормів як генетичної ознаки у молочному скотарстві [53].

Стратегії годівлі суттєво впливають на результати лактації в різних породах корів, що підтверджено тривалими експериментальними дослідженнями [54]. Крім цього, вектор розвитку спрямовується у бік переходу до концепції безлюдних ферм із використанням автономних цифрових систем управління [55].

Технології штучного інтелекту та аналітика великих даних дедалі активніше інтегруються у харчову промисловість, оптимізуючи логістичні та виробничі процеси [56]. При цьому вивчаються поведінкові аспекти прийняття технологій серед фермерів, що дозволяє краще розуміти бар'єри та можливості впровадження інновацій [57].

Ефективна візуалізація даних визнається критичним чинником для успішного впровадження технологій точного тваринництва на фермах [58]. Паралельно розвиваються концепції точного сільського господарства як для рослинництва, так і для тваринництва, із застосуванням сенсорних мереж та аналітичних платформ [59].

Новітні підходи до оцінки добробуту птиці, зокрема метод «Aviary Transect», демонструють значні перспективи для підвищення стандартів утримання [60]. Дослідження взаємозв'язку між шкідливою поведінкою і станом здоров'я курей несучок допомагає розробляти більш ефективні програми менеджменту [61].

Сенсорні технології також знаходять широке застосування для підтримки здоров'я молочних стад, забезпечуючи безперервний моніторинг важливих фізіологічних параметрів [62]. Інфрачервона термографія використовується для оцінки теплової стійкості тварин, що особливо актуально в умовах глобального потепління [63].

Управління видаленням гною із застосуванням як механізованих, так і ручних технологій впливає на гігієнічний стан ферм і показники здоров'я стада [64]. Крім того, ідентифікація потенційних генів, що визначають ріст і терmostійкість у вівчарстві, має важливе значення для селекційних програм [65].

Аудіоаналіз здоров'я тварин стає дедалі точнішим завдяки розробці систем розпізнавання звуків кашлю та інших симптомів хвороб у свиней [66].

Мета та завдання дослідження

Метою цієї статті є комплексний аналіз сучасних роботизованих і автоматизованих систем, що застосовуються у тваринництві з метою підвищення ефективності виробничих процесів, зниження експлуатаційних витрат та покращення умов утримання тварин. Автоматизовані технології, зокрема системи на основі штучного інтелекту (ШІ) та інтернету речей (IoT), значно розширили можливості управління фермерськими господарствами, забезпечуючи точне дозування кормів, моніторинг фізіологічного стану тварин, оптимізацію процесів доїння та санітарного догляду.

Основними завданнями дослідження є:

1. Аналіз типів роботизованих систем у тваринництві – визначити основні напрями впровадження автоматизованих технологій, зокрема автоматизованих систем годівлі, доїння, догляду та прибирання; оцінити їхні технічні характеристики, функціональні можливості та ступінь інтеграції в сучасні фермерські господарства.

2. Дослідження функціональних можливостей і переваг ШІ та IoT у тваринництві – вивчити особливості використання сенсорних систем та алгоритмів машинного навчання для підвищення ефективності управління тваринницькими комплексами, забезпечення превентивного моніторингу здоров'я тварин та покращення умов утримання.

3. Оцінка економічних, екологічних і соціальних аспектів впровадження робототехнічних систем – дослідити економічну доцільність використання автоматизованих технологій, оцінити вплив їхнього застосування на зниження виробничих витрат, підвищення якості продукції та зменшення негативного екологічного впливу.

4. Визначення перспектив розвитку та можливих обмежень застосування автоматизованих технологій у тваринництві – виявити ключові бар'єри впровадження роботизованих систем на фермах, проаналізувати технічні, економічні та нормативні виклики, що можуть впливати на ефективність їхнього використання.

5. Розробка рекомендацій щодо оптимізації використання роботизованих систем – сформулювати практичні пропозиції щодо вдосконалення автоматизованих технологій у тваринництві, спрямовані на підвищення продуктивності, покращення добробуту тварин і забезпечення сталого розвитку галузі.

Отримані результати окреслять стратегічні напрями подальшого розвитку роботизованих систем у тваринництві, що сприятиме їхньому широкомасштабному впровадженню та підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва в умовах сучасних глобальних викликів.

1 Аналіз останніх досліджень і публікацій та їх обговорення

Сучасне тваринництво переживає стрімку цифрову трансформацію, що супроводжується активним впровадженням роботизованих систем різного типу. Однією з ключових сфер застосування є автоматизація процесу годівлі, де використовуються автономні колісні роботи для роздачі повного змішаного раціону (TMR) [1]. Такі системи демонструють високу ефективність у мобільному й ресурсозберігаючому годуванні, що вже підтверджено практикою італійських ферм [2, 3].

Поряд із мобільними роботами активно розвиваються стаціонарні автоматичні годівниці, які дозволяють точно контролювати споживання корму і зменшувати трудові витрати [4, 5]. Розробка самохідних пристроїв для прецизійного годування великої рогатої худоби підтверджує важливість інтеграції комп'ютерного зору і машинного навчання в системи керування [6, 7].

Окремий напрямок роботизації стосується моніторингу поведінки та фізіологічного стану тварин за допомогою сенсорних і візуальних систем [8, 9]. Завдяки застосуванню методів глибокого навчання можлива ідентифікація ознак стресу, захворювань або відхилень у поведінці ще на ранніх стадіях [10, 11].

Реалізація інтелектуальних хабів для збору даних у реальному часі сприяє точному контролю параметрів мікроклімату, споживання води та активності тварин [12]. Методи біометричної ідентифікації, як-от розпізнавання за формою силуету чи задньої частини тіла, удосконалюють індивідуальний контроль за тваринами у великих стадах [13].

Завдяки впровадженню технологій штучного інтелекту й сенсорних систем удосконалюються підходи до поліпшення генетичної ефективності, зокрема щодо покращення конверсії корму й продуктивності [14, 15]. При цьому активну роль відіграють багатofакторні математичні моделі, що враховують породу, стадію лактації і кліматичні умови.

Важливо зазначити, що роботизовані рішення дедалі частіше інтегруються не лише у процеси виробництва, а й у харчову промисловість для аналітики якості продукції та прогнозування ризиків [16, 17].

Комплексні системи моніторингу здоров'я тварин за допомогою RFID-міток, камер і лазерних сенсорів забезпечують безперервне надходження даних для вчасного реагування на зміни стану поголів'я [18, 19]. Паралельно розробляються системи розпізнавання емоційного стану й виявлення стресу, що сприяє підвищенню добробуту тварин [20, 21].

Автоматизація охоплює і системи клімат-контролю, спрямовані на мінімізацію теплового стресу, особливо актуальні в умовах глобальних змін клімату [22, 23].

На рисунку 1 представлено класифікацію основних типів роботизованих систем, що застосовуються у сучасному тваринництві, із зазначенням їхньої питомої ваги в загальній структурі впровадження цифрових технологій. Найбільшу частку займають автоматизовані системи годівлі (АСГ), які становлять 30%. Це підкреслює важливість оптимізації процесів годування для підвищення продуктивності, зниження витрат на корми та забезпечення стабільного розвитку стада. Автоматизовані доїльні системи (АДС) формують 25% загальної структури, що свідчить про високу потребу у механізації процесів отримання молока, поліпшенні його якості, зниженні ручної праці та мінімізації стресу у тварин. Роботизовані системи догляду за тваринами (РСДТ) займають 20%,



Рис. 1. Структура класифікації типів роботизованих систем у сучасному тваринництві

адже контроль здоров'я, фізіологічного стану та добробуту тварин набуває дедалі більшого значення в контексті забезпечення біозахисту стада і підвищення ефективності виробництва. Роботизовані системи очищення та санітарного контролю (РСОСК) становлять 25%, відображаючи потребу у підтриманні належного мікроклімату, гігієни та профілактиці захворювань у тваринницьких приміщеннях. Таким чином, понад половини структури (55%) припадає на системи, пов'язані з годуванням і доїнням, що демонструє ключову роль цих процесів у цифровій трансформації тваринництва. Решта 45% зосереджена на догляді за тваринами і забезпеченні санітарії, що також є важливими напрямками для створення сталих, ефективних та екологічно орієнтованих ферм.

1.1 Автоматизовані системи годівлі

Одним із найперших напрямів застосування роботизованих технологій у тваринництві стали автоматизовані системи годівлі, які суттєво підвищують точність дозування кормів та знижують потребу в ручній праці. Сучасні автономні роботи для роздачі повного змішаного раціону (TMR) базуються на інтелектуальних алгоритмах навігації та управління [1]. Вони здатні забезпечувати рівномірний розподіл корму в заздалегідь визначених місцях, адаптуючи графік роздачі до потреб тварин.

Дослідження показують, що в Італії автоматичні системи годування великої рогатої худоби вже набули значного поширення, демонструючи економічні й технологічні переваги [2]. Встановлено, що такі системи сприяють підвищенню точності згодовування кормів, скороченню трудовитрат та покращенню загального менеджменту ферми [3].

Розробка роботизованих систем для годування тварин фокусується на підвищенні гнучкості, можливості віддаленого керування і швидкої адаптації до змін у раціоні [4]. Автоматичні дозатори корму для великої рогатої худоби, розроблені за сучасними стандартами, також інтегруються у системи Інтернету речей (ІоТ), що забезпечує оперативний моніторинг витрат кормів і стану обладнання [5].

Важливу роль у розвитку автоматизованих систем годування відіграють технології комп'ютерного зору, які дозволяють оцінювати запаси корму в годівницях та автоматично коригувати дозування залежно від споживання [6]. Інтеграція машинного навчання дозволяє прогнозувати зміни у поведінці тварин і відповідно регулювати обсяг і частоту роздачі корму [7].

У контексті удосконалення годівлі окремо варто відзначити використання систем для моніторингу індивідуальної поведінки під час споживання корму. Наприклад, технології розпізнавання поведінки на основі даних сенсорів і камер дозволяють виявляти аномалії у споживанні їжі, що може бути раннім індикатором захворювання або стресу [8].

Інформаційні технології, що застосовуються у точному молочному скотарстві, дозволяють удосконалити системи точного годування, інтегруючи дані про стан

здоров'я, поведінку та продуктивність тварин [9]. Це забезпечує комплексний підхід до оптимізації годівлі та підвищення ефективності виробництва.

Підсумовуючи, автоматизовані системи годівлі відіграють ключову роль у сучасному тваринництві, сприяючи зниженню витрат ресурсів, підвищенню продуктивності і добробуту тварин. Водночас інтеграція новітніх технологій, таких як штучний інтелект, комп'ютерний зір та IoT, забезпечує нові горизонти для подальшого розвитку цих систем.

1.2 Автоматизовані доїльні системи

Автоматизовані доїльні системи стали одним із провідних напрямів у модернізації молочного тваринництва. Застосування роботизованих доїльних установок дозволяє значно знизити залежність від ручної праці, забезпечити сталість процесу доїння та покращити добробут тварин.

Огляд сучасних технологій демонструє, що автоматизовані системи доїння активно впроваджуються в господарствах різного масштабу, сприяючи підвищенню продуктивності, покращенню гігієни та зниженню стресу у тварин [25]. Роботи-дояри здатні самостійно визначати готовність корови до доїння за допомогою сенсорних систем, що включають RFID-мітки, лазерні сканери та камери [26]. Це забезпечує індивідуалізований підхід до кожної тварини, зменшуючи ризик травматизації та інфекцій.

Інтеграція інтелектуальних систем дозволяє здійснювати моніторинг молочної продуктивності в реальному часі, контролювати якість молока та автоматично виявляти ознаки маститу або інших захворювань [27]. За допомогою біометричних та поведінкових даних системи можуть адаптувати режими доїння для кожної тварини окремо, що сприяє оптимізації виробничих процесів і підвищенню ефективності.

Значний прогрес також відбувся у використанні комп'ютерного зору для аналізу руху та поведінки корів під час підходу до доїльної установки. Це дає змогу вчасно виявляти ознаки лімпінгу, стресу або змін у здоров'ї [28]. Завдяки алгоритмам глибокого навчання ці системи автоматично класифікують фізіологічні стани тварин [29].

Точне управління доїльним процесом, виявлення змін у провідності молока, моніторинг температури тіла та серцевого ритму стали невід'ємними складовими сучасних роботизованих доїльних комплексів [43]. Це дозволяє фермеру своєчасно отримувати дані для прийняття управлінських рішень та профілактики захворювань.

Таким чином, автоматизовані доїльні системи є стратегічним елементом цифрової трансформації молочного скотарства, сприяючи як підвищенню продуктивності, так і покращенню добробуту тварин.

1.3 Роботизовані системи догляду за тваринами

Роботизовані системи догляду за тваринами охоплюють широкий спектр функцій – від санітарії до моніторингу фізіологічного стану, що значно підвищує рівень добробуту тварин і загальну ефективність фермерських господарств.

Одним із важливих напрямів є використання мобільних роботів для санітарного обслуговування приміщень. Такі системи, оснащені інтернетом речей (IoT) і сенсорами, забезпечують автоматичне прибирання підстилки у птахівництві та скотарстві, суттєво покращуючи гігієнічні умови [42]. Мобільні роботи демонструють ефективність навіть у великих виробничих комплексах завдяки адаптивній навігації та енергоощадним технологіям.

Важливу роль відіграють також сенсорні системи, зокрема акселерометри,

встановлені у вушних бирках, що дозволяють відстежувати активність тварин, їхній апетит, тривалість жування та відрижки навіть у складних погодних умовах [34]. Це дає можливість раннього виявлення відхилень у фізіології або поведінці тварин.

Комп'ютерний зір у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дає змогу аналізувати поведінкові патерни, виявляючи ранні ознаки хвороб або стресу [36]. Такі системи допомагають зменшити використання антибіотиків, завдяки ранній діагностиці, що також важливо для протидії антибіотикорезистентності [35].

У контексті автоматизованого моніторингу фізіологічних параметрів застосовуються системи, що вимірюють температуру тіла, серцевий ритм та інші біомаркери. Це дозволяє виявляти тепловий стрес, захворювання й оцінювати загальний стан тварин в реальному часі [43].

Окремий напрямок розвитку стосується використання аудіоаналізу для діагностики захворювань, особливо у свинарстві. Автоматичне розпізнавання звуків кашлю, чхання та інших симптомів дозволяє оперативно реагувати на загрози здоров'ю стада [66].

Таким чином, роботизовані системи догляду забезпечують інтегрований підхід до гігієни, здоров'я та благополуччя тварин, сприяючи підвищенню стійкості та сталості тваринницьких господарств.

1.4 Роботизовані системи очищення та санітарного контролю

У сучасному тваринництві роботизовані системи очищення та санітарного контролю відіграють критичну роль у забезпеченні високого рівня гігієни виробничих приміщень та у мінімізації ризику поширення захворювань.

Одним із перспективних напрямів є використання мобільних роботів для прибирання підстилки у птахівничих господарствах. Системи, що поєднують робототехніку з технологіями Інтернету речей (IoT), забезпечують ефективне прибирання, що сприяє підвищенню санітарних стандартів та добробуту тварин [42]. Роботи працюють автономно, адаптуючись до просторової організації приміщень, що дозволяє оптимізувати споживання води та енергії.

Для контролю стану тварин у реальному часі активно застосовуються інтелектуальні сенсорні системи, зокрема акселерометри, вбудовані у вушні бирки. Вони дають змогу моніторити поведінкові реакції тварин, такі як жування, відрижка чи споживання корму, що має особливе значення в умовах теплового стресу або захворювань [34].

Інші сенсорні рішення дозволяють контролювати фізіологічні параметри, зокрема температуру тіла, серцевий ритм та електропровідність молока, що є надійними маркерами здоров'я тварин [43]. Інфрачервона термографія також застосовується для раннього виявлення теплового стресу у ягнят і великої рогатої худоби, дозволяючи своєчасно реагувати на зміни стану [63].

Важливо зазначити, що роботизовані системи очищення стають особливо затребуваними у великих промислових господарствах, де ефективність ручної праці обмежена, а ризики поширення патогенів високі. Машинні та ручні технології прибирання розглядаються в комплексі для підвищення загальної продуктивності процесів утримання тварин [64].

Отже, інтеграція роботизованих систем очищення та сенсорних платформ у санітарний контроль тваринницьких господарств є важливою складовою сталого розвитку галузі та підвищення біобезпеки виробництва.

2 Дослідження функціональних можливостей і переваг ШІ та IoT у тваринництві

Штучний інтелект (ШІ) та Інтернет речей (IoT) відіграють дедалі важливішу роль у трансформації тваринництва, сприяючи підвищенню продуктивності, ефективності управління та добробуту тварин.

Одним із ключових напрямів застосування ШІ є розробка інтелектуальних систем моніторингу фізіологічних показників великої рогатої худоби. Такі системи дозволяють у реальному часі фіксувати зміни температури тіла, частоти серцевих скорочень, споживання корму та води, що забезпечує раннє виявлення патологій [7].

Методи комп'ютерного зору активно застосовуються для розпізнавання поведінкових патернів тварин. Наприклад, технології дозволяють виявляти годування, лежання або рухову активність, що є важливим для своєчасного виявлення кульгавості чи стресових станів [8]. Конволюційні нейронні мережі забезпечують високу точність і надійність таких систем навіть у складних виробничих умовах.

Інтеграція ШІ з технологіями IoT відкриває можливість безперервного збору й аналізу даних із численних сенсорів, розташованих на тваринах або в інфраструктурі ферм [9]. Це дозволяє створювати складні багатофакторні моделі, здатні прогнозувати продуктивність тварин, виявляти ранні ознаки захворювань і оптимізувати умови утримання.

Систематичні огляди літератури свідчать, що ШІ також застосовується для моделювання молочної продуктивності залежно від біометричних та кліматичних параметрів [10, 11]. Такі моделі підтримують прийняття рішень щодо годівлі, розведення й управління мікрокліматом на фермах.

Інтелектуальні платформи забезпечують точний моніторинг реальних умов утримання, споживання корму й води, температурних змін, що є основою концепції «розумних ферм» [12]. Методи біометричної ідентифікації тварин, наприклад за контуром задньої частини тіла, дозволяють оптимізувати управління великими стадами без необхідності фізичного втручання [13].

Використання сенсорних інновацій і ШІ також сприяє поліпшенню селекційних програм. Інтелектуальні системи дозволяють ефективніше відбирати тварин за критеріями здоров'я, продуктивності та стійкості до хвороб [14]. Рекурентні нейронні мережі застосовуються для класифікації складних поведінкових патернів тварин, що сприяє більш глибокому розумінню фізіологічних процесів [15].

Крім того, інтеграція ШІ та IoT у харчову промисловість відкриває нові можливості для аналітики даних, прогнозування якості продукції й управління ланцюгами поставок [16]. Це забезпечує підвищення прозорості та довіри до продуктів тваринного походження на споживчому ринку.

Широке застосування технологій ШІ у тваринництві сприяє не лише економічній ефективності виробництва, а й покращенню стандартів добробуту тварин, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку [17].

На рисунку 2 представлено основні функціональні напрями використання цифрових технологій у тваринництві, що були умовно згруповані за чотирма ключовими аббревіатурами: МЗТ (Моніторинг здоров'я тварин), АПК (Автоматизація процесів кормління), ШППУФ (Штучний інтелект у прогнозуванні продуктивності та управлінні фермами) та АСКМ (Автоматизовані системи контролю мікроклімату). Згідно з результатами дослідження, найбільшу частку становить напрям МЗТ, який охоплює 35% загального обсягу впроваджених цифрових рішень. Це свідчить про пріоритетність раннього виявлення захворювань і профілактики патологій у сучасних фермерських господарствах.

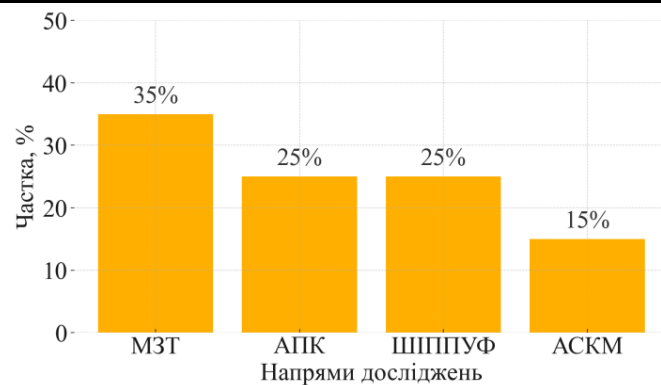


Рис. 2. Функціональні можливості і переваги застосування ШІ та IoT у тваринництві

Другу позицію займає АПК із показником 25%, що підкреслює стратегічну важливість оптимізації годівлі для підвищення конверсії корму та економічної ефективності. ШППУФ становить 25%, демонструючи стрімке зростання інтересу до застосування інтелектуальних моделей для прогнозування продуктивності, планування лактаційних циклів та оптимізації управлінських рішень. Найменшу, але все ще значущу частку займає напрям АСКМ — 15%, що свідчить про активний розвиток систем моніторингу та адаптивного регулювання параметрів мікроклімату з метою забезпечення комфортних умов для тварин та підвищення загального добробуту стада.

2.1 Моніторинг стану здоров'я тварин

Моніторинг фізіологічного стану тварин за допомогою технологій штучного інтелекту (ШІ) і Інтернету речей (IoT) стає основою для підвищення добробуту та продуктивності у сучасному тваринництві.

Інтелектуальні системи моніторингу дозволяють у реальному часі виявляти зміни фізіологічних показників, таких як температура тіла, частота серцевих скорочень, ритм дихання, активність та споживання води й корму [7]. Ці дані надходять від численних сенсорів, що встановлюються безпосередньо на тваринах або в середовищі їх утримання, і передаються для аналізу через IoT-платформи.

Одним із важливих напрямів є використання комп'ютерного зору для розпізнавання поведінкових патернів. Системи, що базуються на конволюційних нейронних мережах, здатні автоматично ідентифікувати ознаки годування, лежання, руху та інших типових активностей [8]. Це дає змогу своєчасно виявляти відхилення від норми, наприклад ознаки стресу чи захворювання.

Комплексні інформаційні системи, що об'єднують дані з численних сенсорних каналів, використовуються для детекції захворювань і стресових станів шляхом аналізу біометричних змін і змін у поведінці [9]. Це сприяє ранньому діагностуванню патологій та оперативному втручанню без затримок, зменшуючи економічні втрати фермерських господарств.

Додатково, сучасні технології ШІ підтримують побудову предиктивних моделей молочної продуктивності, базуючись на індивідуальних даних тварин та кліматичних умовах [10, 11]. Це дозволяє прогнозувати зміни у стані здоров'я та продуктивності, оптимізуючи рішення щодо годування, ветеринарного обслуговування та менеджменту.

Реалізація інтелектуальних хабів для збору й аналізу даних суттєво підвищує точність контролю за станом здоров'я. Такі системи інтегрують дані від температурних сенсорів, акселерометрів, RFID-міток і камер для комплексного оцінювання добробуту тварин [12].

Біометрична ідентифікація за унікальними фізичними ознаками, наприклад, за контуром задньої частини тіла, набуває широкого застосування на великих фермах, де традиційний облік є малоефективним [13]. Це також сприяє індивідуалізації підходу до моніторингу кожної тварини.

Загалом інтелектуальні системи моніторингу сприяють ранньому виявленню захворювань, зменшенню витрат на лікування та підвищенню продуктивності, що є визначальним чинником сталого розвитку сучасного тваринництва.

2.2 Автоматизація процесів годівлі та управління кормовими ресурсами

Автоматизація процесів годівлі та управління кормовими ресурсами є однією з ключових складових інтелектуального фермерства. Сучасні роботизовані системи для автоматизованої годівлі тварин дедалі активніше інтегруються у тваринницькі господарства для оптимізації витрат, підвищення продуктивності та забезпечення точного контролю споживання корму [1, 2].

Системи автоматизованої видачі повнораціонних сумішей (TMR) дозволяють точно дозувати компоненти раціону відповідно до потреб окремих груп тварин. Новітні автономні годівельні роботи, оснащені системами навігації та дистанційного програмування, забезпечують рівномірний розподіл корму по фермі, зменшуючи навантаження на персонал і покращуючи стабільність споживання кормів [1].

Практичний досвід, зокрема в Італії, демонструє переваги впровадження автоматизованих систем годівлі, включно зі зменшенням трудових витрат, поліпшенням точності виконання раціону та підвищенням здоров'я і продуктивності тварин [2, 3]. Аналіз рівня поширення технологій у різних регіонах показує позитивний вплив на загальну ефективність фермерських господарств.

Огляд існуючих роботизованих систем свідчить про високий рівень гнучкості таких рішень та можливість адаптації до різних схем і стратегій годівлі [4]. Також автоматизовані системи дозволяють мінімізувати ризики людського фактора при приготуванні та розподілі кормів.

Завдяки використанню дистанційного управління, сенсорного контролю та штучного інтелекту в системах годівлі стає можливою оптимізація розподілу корму залежно від віку, фізіологічного стану і продуктивності кожної тварини [5]. Це забезпечує економію кормових ресурсів та сприяє зниженню вартості виробництва продукції.

Розробка мобільних, самохідних пристроїв для точного годування тварин також сприяє збільшенню енергоефективності господарств та зменшенню витрат на обслуговування обладнання [6]. Крім того, інтеграція методів комп'ютерного зору та глибинного навчання забезпечує інтелектуальну адаптацію процесу годування до реального споживання корму і поведінкових реакцій тварин [7].

Таким чином, автоматизація процесів годування забезпечує ефективне використання кормових ресурсів, підвищення продуктивності стада та поліпшення економічної стійкості фермерських підприємств.

2.3 Штучний інтелект у прогнозуванні продуктивності та управлінні фермами

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) у тваринництво відкриває нові можливості для прогнозування продуктивності тварин і оптимізації управлінських рішень на фермах. Сучасні системи ШІ дозволяють моделювати процеси продуктивності на основі комплексного аналізу біометричних даних, параметрів довкілля та поведінкових характеристик тварин [10, 11].

Одним із напрямів застосування ІІІ є створення прогнозних моделей молочної продуктивності, які враховують такі змінні, як температура середовища, вологість, годівельні режими та індивідуальні біометричні особливості кожної тварини [10]. Це дає змогу не лише прогнозувати обсяги виробництва молока, але й коригувати раціони та умови утримання для максимізації ефективності виробництва.

На сучасних фермах також активно впроваджуються інтелектуальні системи реального часу для моніторингу загального стану тварин, що дозволяє виявляти патології та зміни в поведінці ще до появи клінічних ознак [12]. Такі рішення забезпечують раннє втручання та знижують ризики поширення захворювань у стаді.

Методи комп'ютерного зору та машинного навчання активно застосовуються для розпізнавання індивідуальних тварин за морфологічними ознаками, такими як форма задньої частини тіла, що спрощує облік, моніторинг і автоматичну ідентифікацію в стадах великої чисельності [13].

Інноваційні підходи на базі ІІІ також сприяють підвищенню генетичної ефективності тварин, зокрема через розробку моделей селекційного відбору, що враховують характеристики здоров'я, адаптивності та продуктивності [14]. Застосування багатофакторних аналізів дозволяє оптимізувати селекційні програми з урахуванням індивідуальних особливостей.

Крім того, використання рекурентних нейронних мереж у класифікації поведінки тварин дозволяє підвищити точність прогнозування та розробити персоналізовані стратегії догляду [15]. Це відкриває нові горизонти в адаптивному управлінні стадами.

Загалом, ІІІ формує нову парадигму ведення тваринництва — від реактивного до проактивного управління, підвищуючи ефективність виробничих процесів і забезпечуючи сталий розвиток галузі.

2.4 Автоматизовані системи контролю мікроклімату

Забезпечення оптимальних умов мікроклімату у тваринницьких приміщеннях є критичним фактором для підтримання здоров'я, продуктивності та благополуччя тварин. Сучасні автоматизовані системи контролю мікроклімату інтегрують технології Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (ІІІ) та мультисенсорні мережі для збору та аналізу великої кількості параметрів навколишнього середовища [12, 23, 24].

Інтелектуальні системи контролю мікроклімату в реальному часі дозволяють відстежувати температуру, вологість, концентрацію газів, швидкість руху повітря та рівень освітлення у тваринницьких приміщеннях [12]. Такі дані надходять від численних сенсорних пристроїв, розташованих по всьому об'єкту, і обробляються на базі алгоритмів машинного навчання для своєчасної корекції параметрів довкілля.

Мультисенсорні системи виявляють навіть незначні відхилення у мікрокліматичних умовах, що дозволяє швидко реагувати та запобігати тепловому або холодовому стресу у тварин [23]. Автоматизація процесу регулювання вентиляції, опалення, охолодження та зволоження суттєво підвищує енергоефективність господарств та сприяє сталому виробництву.

Новітні дослідження також показують, що інтелектуальні системи моніторингу мікроклімату інтегруються з модулями контролю здоров'я тварин, дозволяючи проводити комплексний аналіз взаємозв'язку між змінами довкілля та фізіологічними реакціями стада [24]. Це сприяє підвищенню точності діагностики ризиків і персоналізації заходів щодо покращення умов утримання.

Таким чином, автоматизовані системи контролю мікроклімату є важливою складовою концепції "розумної ферми", сприяючи не лише підвищенню продуктивності тварин, але й забезпеченню їхнього добробуту відповідно до сучасних стандартів сталого тваринництва.

3 Оцінка економічних, екологічних і соціальних аспектів впровадження робототехнічних систем у тваринництві

Інтеграція робототехнічних систем у тваринницькі господарства має багатовимірний вплив, який охоплює економічні вигоди, екологічні переваги та соціальні наслідки.

З економічної точки зору, впровадження автоматизованих технологій забезпечує значне скорочення витрат на оплату праці, оптимізацію використання кормів та енергоресурсів, а також підвищення загальної продуктивності ферми [17, 30, 31]. Завдяки високій точності виконання завдань, такі системи сприяють зменшенню втрат кормів і води, що безпосередньо впливає на зростання рентабельності виробництва.

Екологічні переваги роботизації проявляються у зниженні викидів парникових газів, покращенні управління відходами та ефективному використанні природних ресурсів [21, 36, 49]. Автоматизовані системи моніторингу сприяють кращому контролю за рівнем аміаку та метану в тваринницьких приміщеннях, а також оптимізації процесів гноєвидалення, що знижує вплив на довкілля.

У соціальному вимірі застосування робототехніки змінює роль людини у виробничому процесі: акцент зміщується з фізичної праці на контроль, обслуговування і прийняття управлінських рішень [55, 57]. Це вимагає підвищення кваліфікації персоналу, розвитку цифрових компетентностей і змін у системі аграрної освіти.

Окрім того, за умов глобальних викликів — таких як зміна клімату та забезпечення продовольчої безпеки — застосування інтелектуальних технологій у тваринництві відповідає принципам сталого розвитку [49, 50, 56]. Інноваційні моделі ведення господарства, зокрема "розумні ферми", сприяють досягненню цілей сталого розвитку ООН у сферах відповідального споживання ресурсів та мінімізації екологічного сліду аграрного виробництва [51].

Узагальнюючи, впровадження роботизованих систем у тваринництві є стратегічним напрямом модернізації галузі, який одночасно забезпечує економічну ефективність, екологічну відповідальність і соціальну трансформацію сільського господарства в умовах цифрової епохи.

На рисунку 3 представлено співвідношення основних аспектів впровадження робототехнічних систем у тваринництві. Найбільшу частку становлять економічні аспекти (ЕА) — 40%, що відображає першочергове значення оптимізації витрат, підвищення продуктивності та економічної стійкості господарств. Екологічні аспекти (ЕкА) складають 35% і вказують на важливість мінімізації впливу аграрного виробництва на довкілля та підвищення ефективності використання природних ресурсів. Соціальні аспекти (СА) займають 25%, що підкреслює зростаюче значення трансформації ринку праці, підвищення кваліфікації працівників та адаптації аграрної освіти до умов цифрової трансформації.

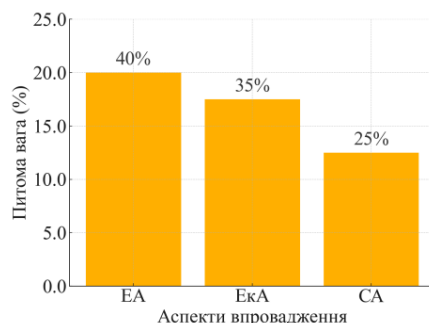


Рис. 3. Структура розподілу економічних, екологічних і соціальних аспектів впровадження робототехнічних систем у тваринництві

3.1 Економічні аспекти впровадження робототехнічних систем

Економічна ефективність є одним із ключових факторів, що стимулюють впровадження робототехнічних систем у тваринництві. За даними сучасних досліджень, автоматизовані системи годівлі, доїння та моніторингу здоров'я сприяють зниженню витрат на оплату праці, підвищують ефективність використання кормів та зменшують витрати енергії [17, 30, 31]. Наприклад, автоматизовані годівельні системи дозволяють точно дозувати раціони відповідно до потреб окремих тварин, що мінімізує втрати корму й знижує загальні витрати господарства [1–3].

Водночас впровадження робототехнічних рішень вимагає значних початкових інвестицій, які включають закупівлю обладнання, модернізацію інфраструктури та навчання персоналу [55]. Однак довгострокові економічні вигоди — зокрема скорочення експлуатаційних витрат і підвищення продуктивності — компенсують первинні витрати, що підтверджено результатами численних практичних кейсів [30].

Дослідження свідчать, що господарства, які інтегрують робототехнічні технології, демонструють вищий рівень економічної стабільності та здатність швидше адаптуватися до змін ринку та кліматичних умов [31, 55]. Важливо також враховувати ефект масштабу: більші ферми отримують більший економічний вигаи завдяки можливості розподілу витрат на велику кількість поголів'я.

У процесі переходу до інтенсивнішого використання автоматизації постає потреба в оновленні економічних моделей управління господарствами, що має включати аналіз ризиків, прогнозування ефективності інвестицій та врахування нових факторів виробничої гнучкості [57]. Зростає також роль цифрових платформ для планування, управління та аналізу фінансових потоків у фермерських господарствах.

Таким чином, економічний аспект впровадження робототехнічних систем у тваринництві визначається балансом між високими початковими витратами та перспективами істотного підвищення прибутковості й стабільності виробництва в середньостроковій та довгостроковій перспективі.

3.2 Екологічні аспекти впровадження роботизованих систем

Роботизація тваринницьких процесів має суттєвий позитивний вплив на зменшення екологічного навантаження аграрного виробництва. Впровадження інтелектуальних систем управління кормами, доїнням і санітарією дозволяє значно оптимізувати використання природних ресурсів та скорочувати викиди парникових газів [49]. Зокрема, автоматизовані годівельні системи сприяють зменшенню надлишкового споживання корму, що опосередковано знижує потребу у виробництві кормових культур і, відповідно, зменшує обсяг агроекологічного навантаження [1–3, 49].

Дослідження вказують на те, що роботизовані доїльні установки також сприяють покращенню ефективності водокористування і зниженню утворення стічних вод завдяки більш точному та автоматизованому управлінню процесами доїння [38, 37]. Застосування технологій точного моніторингу здоров'я тварин, базованих на сенсорних мережах і штучному інтелекті, дозволяє раннє виявлення захворювань і, відповідно, скорочення використання антибіотиків, що є важливою умовою боротьби з поширенням антибіотикорезистентності [35].

Особливу увагу приділяють і аспекту утилізації відходів: системи контролю мікроклімату та моніторингу здоров'я тварин дають змогу зменшити втрати від хвороб і загибелі тварин, що безпосередньо впливає на скорочення біологічного навантаження на довкілля [26, 41].

Разом із тим, нові технології стимулюють розвиток концепції "розумного фермерства", де всі виробничі операції інтегруються в єдині екологічно орієнтовані

системи управління, що сприяє реалізації принципів сталого розвитку в аграрному секторі [40, 41, 49]. Паралельно з цим збільшується увага до розробки стандартів і нормативів для оцінки екологічних показників роботизованого виробництва [41, 49].

Таким чином, роботизація в тваринництві є важливим чинником мінімізації негативного впливу на довкілля, підвищення ефективності використання ресурсів і просування до моделей сталого агровиробництва.

3.3 Соціальні аспекти та вплив на ринок праці

Інтеграція роботизованих і автоматизованих систем у тваринництві зумовлює суттєві соціальні зміни, зокрема у структурі аграрного ринку праці. З одного боку, використання робототехніки дозволяє зменшити залежність господарств від фізичної праці, підвищити безпеку робочого середовища та знизити ризики професійних захворювань [52]. Це особливо актуально для завдань, пов'язаних із важкими або небезпечними умовами праці, такими як прибирання приміщень для тварин, доїння або обробка відходів [26, 64].

З іншого боку, автоматизація створює виклики для традиційної зайнятості, оскільки низка низькокваліфікованих робочих місць поступово зникає. Натомість виникає попит на нові професії, пов'язані з обслуговуванням, управлінням та аналізом даних з автоматизованих систем, що потребує підвищення кваліфікації працівників і розробки відповідних програм перепідготовки [52, 56].

Дослідження свідчать, що адаптація до нових технологій у фермерських господарствах значною мірою залежить від рівня технологічної освіти фермерів і персоналу [57]. Прийняття нових технологій пов'язане не лише з економічною доцільністю, а й із психологічною готовністю до змін у робочому процесі [57, 58]. Важливу роль у цьому процесі відіграє ефективна візуалізація даних, що сприяє спрощенню сприйняття результатів роботи автоматизованих систем і пришвидшує їх прийняття користувачами [58].

Крім того, в умовах діджиталізації сільського господарства важливого значення набувають питання кібербезпеки, захисту персональних даних працівників та етичних аспектів використання технологій у тваринництві [41].

Таким чином, роботизація в тваринництві формує нову соціальну реальність: змінюються вимоги до професійних компетенцій, трансформується характер зайнятості, а також зростає потреба в адаптації систем професійної освіти до нових реалій аграрного виробництва.

4 Визначення перспектив розвитку та можливих обмежень застосування автоматизованих технологій у тваринництві

Швидкий розвиток автоматизованих технологій і штучного інтелекту відкриває нові можливості для оптимізації процесів у тваринництві. В майбутньому очікується ще ширше впровадження автономних систем, здатних не лише виконувати стандартні виробничі операції, але й здійснювати самостійну діагностику проблем, адаптувати технологічні процеси до індивідуальних потреб тварин і прогнозувати продуктивність на основі аналізу великих даних [40, 41].

Однією з ключових перспектив є подальша інтеграція кіберфізичних систем та Інтернету речей (IoT), що забезпечать безперервний моніторинг біометричних і поведінкових параметрів тварин у реальному часі [19, 23]. Такі технології підвищують точність управлінських рішень і дозволять своєчасно виявляти відхилення у фізіологічному стані або поведінці стада [18, 24].

Інший важливий напрямок розвитку пов'язаний із застосуванням алгоритмів глибокого навчання для покращення розпізнавання хвороб і станів тварин на основі даних комп'ютерного зору та аудіоаналізу [20, 42, 66]. Це дозволить значно підвищити рівень біобезпеки господарств та знизити втрати від захворювань.

Однак разом із великими можливостями автоматизація тваринництва стикається з низкою обмежень. Однією з головних проблем є висока вартість впровадження сучасних роботизованих систем, що може обмежити їх доступність для дрібних і середніх господарств [22, 55]. Крім того, необхідність модернізації інфраструктури та підвищення кваліфікації персоналу вимагає додаткових інвестицій у навчальні програми й технічну підтримку [52, 57].

Не менш важливим обмеженням є питання сумісності різних технологічних рішень: інтеграція обладнання від різних виробників часто потребує складної адаптації або спеціалізованого програмного забезпечення [41]. Також актуальними залишаються питання захисту даних, етичності застосування штучного інтелекту та забезпечення прозорості алгоритмічних рішень [41, 58].

Важливим фактором успішної імплементації інновацій буде підвищення соціальної довіри до нових технологій серед фермерів і суспільства в цілому, що потребує ефективної комунікації переваг і можливих ризиків роботизації [57, 59].

Отже, подальший розвиток автоматизованих технологій у тваринництві визначатиметься балансом між технічними досягненнями, економічною доцільністю впровадження та соціальними очікуваннями. Вирішення існуючих обмежень і адаптація нормативної бази є критично важливими для сталого та відповідального розвитку галузі в умовах цифрової трансформації.

На рисунку 4 наведено співвідношення між основними напрямками перспектив розвитку і ключовими обмеженнями впровадження автоматизованих технологій у тваринництві. Найбільшу частку займають перспективи розвитку (ПР) — 50%, що свідчить про високий потенціал цифрової трансформації галузі, зокрема завдяки інтеграції штучного інтелекту, великих даних та Інтернету речей. Технічні обмеження (ТО) становлять 20%, що вказує на необхідність вдосконалення технологічних рішень та забезпечення сумісності обладнання. Економічні обмеження (ЕО) також становлять 20%, акцентуючи увагу на високих інвестиційних витратах і потребі в оновленні бізнес-моделей. Соціальні обмеження (СО) займають 10% і пов'язані з потребою адаптації персоналу, підвищенням кваліфікації працівників і трансформацією ринку праці.

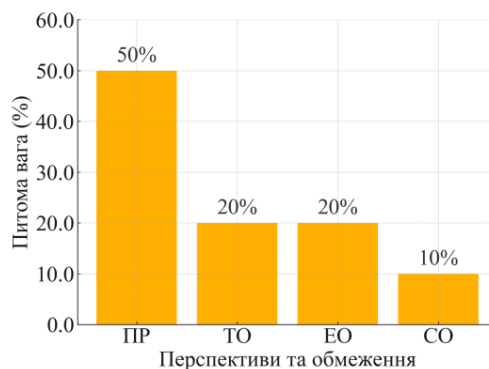


Рис. 4. Структура розподілу перспектив розвитку та обмежень застосування автоматизованих технологій у тваринництві

4.1 Перспективи розвитку

4.1.1 Інтеграція штучного інтелекту та великих даних. Одним із найперспективніших напрямів розвитку автоматизованих технологій у тваринництві є

інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та великих даних (Big Data). Завдяки зростанню обсягів даних, що збираються через сенсорні мережі, RFID-мітки, камери та інші пристрої Інтернету речей (IoT), виникає потреба у застосуванні передових алгоритмів для їх обробки й аналізу в реальному часі [18, 23, 41].

ШІ дозволяє моделювати складні біологічні процеси, виявляти приховані закономірності у фізіології та поведінці тварин і прогнозувати ризики захворювань або продуктивність за різних умов утримання [10, 11, 19]. Інструменти глибокого навчання, зокрема згорткові та рекурентні нейронні мережі, дедалі ширше використовуються для класифікації станів тварин за візуальними, температурними чи звуковими сигналами [15, 20, 42].

Інтеграція великих даних сприяє створенню адаптивних систем управління, які враховують індивідуальні особливості кожної тварини — її генотип, історію захворювань, параметри споживання корму та рівень активності [9, 14, 17]. Це забезпечує не лише підвищення продуктивності, але й покращення добробуту тварин завдяки ранньому виявленню відхилень у здоров'ї чи поведінці [23, 24].

Особливу увагу привертає розвиток рішень, що поєднують дані з кількох джерел — біометричних сенсорів, систем контролю мікроклімату, аудіоспостереження та відеонагляду. Такі мультикомпонентні платформи створюють цілісну картину стану стада та навколишнього середовища, забезпечуючи точнішу діагностику та прогнозування [12, 19, 27].

Попри великі можливості, впровадження інтегрованих систем ШІ і Big Data потребує вирішення питань збереження конфіденційності даних, стандартизації форматів обміну інформацією і розробки нових моделей кібербезпеки для фермерських господарств [41, 58].

Таким чином, інтеграція штучного інтелекту та великих даних є фундаментальною умовою переходу до інтелектуального, передбачуваного й сталого тваринництва майбутнього.

4.1.2 Розвиток автономних роботизованих систем. Розвиток автономних роботизованих систем у тваринництві набуває стрімких темпів завдяки удосконаленню механіки, сенсорики, штучного інтелекту та систем прийняття рішень у реальному часі [1, 2, 5]. Новітні розробки зосереджені на підвищенні рівня автономності машин, зокрема у процесах годівлі, доїння, очищення приміщень та моніторингу тварин без постійної участі людини [3, 4, 25].

Колісні та гусеничні автономні платформи для автоматизованої доставки кормів уже успішно використовуються на фермах Італії та інших країн [2, 3]. Такі системи дозволяють гнучко адаптувати маршрути й обсяги подачі корму залежно від споживання та потреб стада, що підвищує ефективність використання ресурсів [1, 4]. Розробники також впроваджують здатність роботів до навігації за допомогою камер, лідарів та GPS, що дозволяє зменшити потребу в інфраструктурних змінах на фермах [5, 25].

Автономні доїльні установки та мобільні системи гігієнічного обслуговування демонструють високу ефективність у зменшенні навантаження на працівників і покращенні умов утримання тварин [25, 26]. Роботи для санітарного очищення, як у птахівництві, так і у великотоварному скотарстві, уже показали здатність суттєво покращувати гігієнічні показники завдяки цілодобовій роботі та відсутності людського чинника [42].

Інтеграція елементів Інтернету речей (IoT) з автономними роботами дозволяє забезпечити централізоване управління кількома системами одночасно, оптимізуючи координацію дій різних роботизованих одиниць [18, 19]. Таким чином, створюються передумови для розвитку концепції «розумної ферми» з мінімальним залученням людської праці [22, 55].

Однак, повна автономність роботизованих систем наразі обмежена рядом технічних викликів, серед яких — потреба у підвищенні надійності навігації в умовах змінного середовища, зниженні енергоспоживання, а також у забезпеченні безпеки роботи серед тварин і людей [19, 41].

У перспективі очікується подальша еволюція автономних систем із використанням самонавчальних алгоритмів, енергетично незалежних платформ та адаптивних рішень для різних кліматичних і виробничих умов, що забезпечить суттєвий прогрес у сфері сталого тваринництва.

4.1.3 Оптимізація управління мікрокліматом. Оптимізація мікроклімату є критичним чинником для забезпечення здоров'я, добробуту та високої продуктивності тварин. Сучасні технології дозволяють здійснювати моніторинг і регулювання параметрів середовища у реальному часі за допомогою автоматизованих систем, інтегрованих із штучним інтелектом та Інтернетом речей [12, 18, 24].

Автоматизовані системи контролю мікроклімату здатні відстежувати температуру, вологість, рівень аміаку, швидкість руху повітря та рівень освітлення в тваринницьких приміщеннях [12]. Дані, зібрані за допомогою мультисенсорних мереж, оперативно аналізуються, що дозволяє системам адаптувати вентиляцію, обігрів або зволоження для підтримання оптимальних умов [18, 19, 23].

Дослідження показали, що технології автоматичного регулювання мікроклімату зменшують тепловий стрес у тварин, особливо у періоди літньої спеки, та сприяють стабілізації фізіологічних показників, таких як температура тіла й частота серцевих скорочень [28, 34]. Використання інфрачервоних термокамер, газових сенсорів і акустичних систем дозволяє виявляти навіть незначні відхилення в стані середовища та тварин [19, 42].

Системи керування мікрокліматом також інтегруються з технологіями прогнозування на основі штучного інтелекту, що дає змогу адаптувати параметри середовища залежно від прогнозованих погодних змін та поведінкових реакцій тварин [19, 21, 41]. Це особливо важливо в умовах зміни клімату, коли зростає частота екстремальних температурних коливань [28, 29].

Крім того, оптимізація мікроклімату має прямий економічний ефект — зниження витрат на енергоспоживання завдяки інтелектуальним системам управління, а також підвищення ефективності використання ресурсів, що важливо для сталого розвитку тваринництва [40, 41].

Перспективними напрямками є розвиток самонавчальних систем мікрокліматичного контролю, які зможуть не лише автоматично підтримувати оптимальні умови, а й прогнозувати ризики захворювань, пов'язаних із мікрокліматичними факторами, тим самим сприяючи подальшій інтелектуалізації ферм.

4.1.4 Інновації у годівлі. Інноваційні рішення у сфері годівлі тварин стрімко розвиваються завдяки інтеграції автоматизованих систем, штучного інтелекту та Інтернету речей. Використання автономних роботів для роздачі корму дає змогу забезпечувати точне дозування раціону відповідно до індивідуальних потреб кожної тварини [1, 2, 3]. Застосування мобільних систем розподілу корму на основі даних про фізіологічний стан і споживання корму дозволяє мінімізувати відходи, підвищити засвоюваність поживних речовин і загальну ефективність годівлі [2, 5].

Автоматичні системи годівлі працюють із використанням сенсорів ваги, комп'ютерного зору та машинного навчання для аналізу споживання корму в реальному часі [6, 8]. Це дає можливість коригувати раціон відповідно до змін потреб тварин залежно від стадії розвитку, продуктивності або стану здоров'я [7, 9].

Розробка спеціалізованих інтелектуальних систем дає змогу прогнозувати потреби в кормі на основі даних про лактаційний статус, генетичні особливості та умови

навколишнього середовища [10, 11, 15]. Такі системи не лише підвищують продуктивність, але й сприяють зниженню витрат на корми — одного з основних витратних елементів у тваринництві.

Особливе місце займають дослідження, що стосуються індивідуалізованої годівлі за допомогою автоматичних станцій зчитування RFID-міток або біометричних ідентифікаторів [18]. Це дозволяє відстежувати індивідуальне споживання корму й забезпечувати персоналізовані раціони для кожної тварини без підвищення трудових витрат.

Інноваційні стратегії годівлі також інтегрують моделі на базі штучного інтелекту для прогнозування змін у споживанні корму через стресові фактори, зміни температури чи фазу лактації [7, 19]. Такі підходи відкривають нові можливості для поліпшення здоров'я тварин і оптимізації виробничих показників у тваринницьких господарствах.

4.1.5 Удосконалення доїльних систем. Сучасні доїльні системи зазнають істотних змін завдяки інтеграції робототехнічних рішень, штучного інтелекту та Інтернету речей. Автоматизовані доїльні установки (AMS) сьогодні не лише спрощують процес доїння, але й підвищують добробут тварин та ефективність виробництва молока [25, 36, 37].

Інноваційні системи забезпечують індивідуальне розпізнавання корів за допомогою RFID-міток або біометричних характеристик, що дозволяє точно контролювати частоту доїння та моніторити показники молочної продуктивності [18, 25]. Завдяки сенсорним технологіям сучасні доїльні роботи можуть оцінювати електропровідність молока, температуру вимені та інші фізіологічні параметри, що дає можливість раннього виявлення маститів і інших захворювань [32, 43].

Автоматизація доїння також дозволяє збирати великі обсяги даних про кожну тварину, що, завдяки аналізу з використанням алгоритмів машинного навчання, дає змогу оптимізувати режими годівлі, відтворення та ветеринарного обслуговування [11, 17, 32]. Деякі новітні системи інтегрують функції активного моніторингу поведінки корів перед і після доїння для оцінки рівня стресу та добробуту [10, 12].

Покращення роботизованих доїльних систем сприяє не лише підвищенню якості молока та продуктивності, але й зниженню трудових витрат та підвищенню енергоефективності ферм [36, 38]. Однак для максимального ефекту такі технології потребують адаптації до конкретних умов господарства, а також постійного обслуговування та калібрування сенсорних елементів.

Загалом, удосконалення доїльних систем відкриває нові можливості для сталого розвитку молочного скотарства, орієнтованого на точне фермерство та підвищення добробуту тварин.

4.2 Обмеження впровадження технологій

4.2.1 Висока вартість. Одним із основних обмежень впровадження роботизованих систем у тваринництві є їхня висока початкова вартість. Інвестиції в автоматизовані установки для годівлі, доїння, моніторингу здоров'я та санітарного обслуговування вимагають значних фінансових витрат [1, 2, 25]. Особливо це стосується малих і середніх господарств, де окупність таких технологій може розтягуватися на багато років [4, 30].

Закупівля високотехнологічного обладнання супроводжується витратами на проєктування, встановлення, навчання персоналу та подальше технічне обслуговування [18, 36]. Крім того, потреба в регулярних оновленнях програмного забезпечення, заміні сенсорів або калібруванні роботизованих механізмів додає додаткові експлуатаційні витрати [19, 43].

Хоча численні дослідження демонструють позитивний економічний ефект від довгострокового використання автоматизації через підвищення продуктивності та зниження трудових витрат [17, 32, 36], високі початкові бар'єри перешкоджають швидкому поширенню технологій серед фермерів, особливо в країнах із низькою купівельною спроможністю [37, 55].

Для подолання цього обмеження дедалі більше уваги приділяється розробці фінансових механізмів підтримки, таких як субсидії, програми лізингу та спеціальні кредити для впровадження "розумних" технологій у сільському господарстві [51, 52]. Також перспективними є моделі "роботизації як послуги" (Robotics-as-a-Service, RaaS), які дають змогу фермерам орендувати обладнання без необхідності великих одноразових витрат.

Таким чином, питання вартості залишається критичним чинником, що визначає темпи та масштаби впровадження робототехнічних систем у тваринництві.

4.2.2 Технічна сумісність. Технічна сумісність є ще одним важливим обмеженням для широкого впровадження роботизованих і автоматизованих систем у тваринництві. Сучасні фермерські господарства часто використовують обладнання та програмне забезпечення різних виробників, що не завжди підтримують уніфіковані стандарти обміну даними й інтеграції [17, 18, 27]. Це ускладнює створення єдиних інформаційних систем для моніторингу стану здоров'я, продуктивності та умов утримання тварин.

Відсутність належної інтероперабельності між сенсорами, автоматизованими доїльними установками, системами годування та модулями мікрокліматичного контролю створює ризики дублювання функцій, втрати даних або зниження ефективності [23, 25, 30]. Згідно з сучасними дослідженнями, близько 40 % фермерів відзначають проблеми при інтеграції нових цифрових рішень з уже наявною інфраструктурою [17,31].

Важливим аспектом є і невідповідність форматів обробки великих даних (Big Data) від різних пристроїв, що ускладнює застосування алгоритмів штучного інтелекту для комплексної аналітики ферми [44, 45]. Особливо гостро проблема проявляється на етапах впровадження IoT-платформ, коли не всі датчики підтримують однакові протоколи зв'язку або стандарти безпеки [18, 43].

Для подолання проблем технічної сумісності активно розробляються міжнародні стандарти, такі як ISO 20966:2017 для автоматизованого доїння чи ініціативи в межах концепції Agriculture 4.0 [40, 41]. Проте їх впровадження потребує часу, узгодження між виробниками і споживачами технологій, а також додаткових витрат на модернізацію обладнання.

Таким чином, забезпечення технічної сумісності залишається необхідною умовою для ефективного розвитку цифрового та роботизованого тваринництва.

4.2.3 Брак фахівців. Одним із суттєвих обмежень упровадження роботизованих технологій у тваринництві є нестача кваліфікованих фахівців, здатних ефективно управляти, обслуговувати та оптимізувати складні автоматизовані системи [17, 18, 57]. Використання сенсорних мереж, систем штучного інтелекту та IoT-рішень вимагає глибоких знань у галузі інженерії, програмування, аналізу великих даних і зоотехнії.

Більшість традиційних навчальних програм у сільськогосподарських університетах лише частково охоплюють тематику сучасних цифрових технологій у тваринництві [18, 59]. Як наслідок, навіть у країнах з високим рівнем цифровізації агросектору існує помітний дефіцит кадрів, готових до роботи на "розумних фермах".

За даними недавніх досліджень, на багатьох підприємствах виникають труднощі з наймом технічного персоналу для підтримки автоматизованих доїльних установок, роботизованих систем годування та кіберфізичних систем моніторингу стану здоров'я

тварин [27, 41]. Часто фермери змушені залучати зовнішніх консультантів або спеціалістів із суміжних галузей, що суттєво збільшує експлуатаційні витрати [17].

Крім того, робота з великими масивами даних, що надходять від IoT-пристроїв, потребує спеціальних навичок у сфері аналітики й моделювання, а це ще більше підвищує вимоги до підготовки персоналу [44, 45]. Без відповідного кадрового забезпечення існує ризик недовикористання можливостей технологій або навіть їх помилкового застосування, що може призводити до економічних збитків.

Таким чином, для повноцінної реалізації потенціалу роботизації та цифровізації тваринництва необхідна системна підготовка фахівців нової генерації з мультидисциплінарними компетенціями.

4.2.4 Кібербезпека. Із впровадженням інтелектуальних роботизованих систем у тваринництві різко зростає значущість питань кібербезпеки. Сучасні автоматизовані ферми працюють на основі мереж сенсорів, штучного інтелекту, IoT-пристроїв і хмарних платформ, що забезпечують збір, передавання та аналіз великих обсягів даних у реальному часі [17, 41, 58]. Проте відкритість таких систем до мережевої взаємодії створює потенційні вразливості для несанкціонованого доступу, витоку даних або навіть саботажу.

Атаки на кіберінфраструктуру фермерських господарств можуть призводити до порушення роботи систем автоматичного годування, доїння, моніторингу здоров'я тварин та управління мікрокліматом [18, 41]. Збої в роботі цих технологій загрожують як економічними втратами, так і ризиками для здоров'я та добробуту тварин.

Дослідження вказують, що лише невелика частина тваринницьких підприємств застосовує належні заходи кібербезпеки, включно із шифруванням даних, автентифікацією користувачів і регулярним оновленням програмного забезпечення [41, 58]. Особливе занепокоєння викликають системи із застарілим програмним забезпеченням або слабко захищеними мережевими протоколами.

Крім того, інтеграція блокчейн-технологій у системи простежуваності походження продукції та здоров'я тварин (наприклад, запис вакцинацій, годівлі та умов утримання) потребує додаткових зусиль із захисту ланцюгів даних [30, 31]. Втрата або компрометація такої інформації може призвести до серйозних наслідків для ринку та довіри споживачів.

Таким чином, забезпечення надійної кібербезпеки стає невід'ємною складовою стратегії впровадження роботизованих та цифрових технологій у тваринництві, що потребує спеціальної підготовки персоналу, інвестицій у захищені IT-рішення та розробки галузевих стандартів безпеки.

4.2.5 Етичні та правові аспекти. Швидкий розвиток автоматизованих технологій у тваринництві, зокрема застосування штучного інтелекту, машинного навчання та IoT, викликає низку етичних і правових викликів. Етичні питання пов'язані насамперед із балансуванням між підвищенням продуктивності та забезпеченням добробуту тварин [10, 11, 20, 27]. Автоматизація управління годівлею, моніторингом здоров'я та поведінки тварин може призвести до зменшення особистого контакту між працівниками ферми й тваринами, що вимагає перегляду стандартів етичного ставлення до тварин [20].

Застосування ШІ для прогнозування поведінкових змін або ранньої діагностики захворювань потребує обережного підходу, оскільки помилкові спрацьовування алгоритмів можуть призводити до неправильних рішень, включно з невинуватими ветеринарними втручаннями або вибракуванням тварин [11, 27]. Деякі дослідження також порушують питання автономності машин у прийнятті рішень, що традиційно здійснювали люди [33].

Правові аспекти охоплюють такі питання, як захист даних про тварин і ферми, право власності на великі масиви даних, зібраних через сенсорні системи, і розподіл

відповідальності у випадках технічних збоїв або помилок у роботі роботизованих систем [30, 41]. Особливо актуальним є питання регламентації застосування алгоритмів, що можуть впливати на рішення, пов'язані зі здоров'ям або життям тварин [17, 41].

Крім того, різні країни перебувають на різних стадіях законодавчого врегулювання цифровізації тваринництва, що ускладнює міжнародну торгівлю та взаємне визнання сертифікаційних стандартів [31, 52]. Відсутність єдиних норм підвищує ризики правових суперечок щодо безпеки харчових продуктів і добробуту тварин.

Таким чином, для сталого розвитку цифрового тваринництва необхідна розробка міжнародно узгоджених етичних кодексів, правових норм і протоколів відповідальності, що враховуватимуть специфіку роботизованих та інтелектуальних технологій.

5 Розробка рекомендацій щодо оптимізації використання роботизованих систем у тваринництві

Впровадження роботизованих систем у тваринництві є одним із провідних напрямів цифрової трансформації аграрного сектору. Однак досягнення максимальної ефективності використання цих технологій потребує всебічної оптимізації, що включає економічні, технічні, біоінженерні, соціальні та правові аспекти. Широке застосування багатофункціональних платформ на основі штучного інтелекту, систем Інтернету речей (IoT), сенсорного моніторингу, адаптивного управління та автономних мобільних агрегатів вимагає стратегічно виваженого підходу до їх інтеграції у виробничі процеси.

Першочерговим етапом впровадження автоматизованих технологій є оцінка економічної ефективності роботизації. Як свідчать численні дослідження [23, 27, 31, 43], інтеграція адаптивних систем управління дозволяє знизити експлуатаційні витрати на 30–40% шляхом оптимізації процесів годування, водопостачання, мікрокліматичного регулювання та ветеринарного обслуговування. Це досягається завдяки поєднанню даних біосенсорного моніторингу з прогностичними алгоритмами на основі машинного навчання, що забезпечують оперативне реагування на зміну потреб тварин та умов навколишнього середовища.

Таблиця 1 систематизує основні стратегічні напрями оптимізації використання роботизованих систем у тваринництві. Вона охоплює технічну модернізацію окремих виробничих процесів (доїння, годівлі, контролю мікроклімату), заходи із забезпечення кібербезпеки, запровадження блокчейн-технологій для простежуваності продукції, підготовку кваліфікованих кадрів, а також механізми державної підтримки процесів автоматизації.

Одним із найважливіших напрямів оптимізації є точне управління годівлею, що базується на застосуванні алгоритмів глибокого навчання для аналізу споживання корму та складання індивідуалізованих раціонів. За результатами досліджень [16, 31, 44], інтеграція таких систем дозволяє знизити втрати корму на 10–30%, підвищити коефіцієнт конверсії корму на 12–18%, що загалом зменшує витрати на корми до 15%.

Динамічне коригування раціону в реальному часі залежно від продуктивності та фізіологічного стану тварин є ключовою перевагою цих рішень.

Автоматизовані доїльні системи (АДС) є іншим вагомим компонентом цифрової трансформації. Як свідчать результати робіт [3, 7, 37], їх застосування сприяє підвищенню надоїв на 5–15% і зменшенню рівня соматичних клітин у молоці на 20–30%, що значно покращує якість молочної продукції. Водночас рівень стресу у тварин знижується на 25–30%, що позитивно позначається на тривалості лактаційного періоду та зменшує потребу в антибіотичній терапії. Автоматизація доїння дозволяє скоротити витрати на ручну працю до 50%, забезпечуючи економічну доцільність навіть для господарств середнього розміру.

Ще одним важливим напрямом оптимізації є вдосконалення систем контролю мікроклімату у тваринницьких приміщеннях. Використання сенсорних платформ для регулювання вологості, температури, концентрації аміаку та вуглекислого газу забезпечує суттєве підвищення продуктивності стада та зниження захворюваності [8, 21, 35]. Завдяки впровадженню адаптивних систем керування вентиляцією та обігрівом можна зменшити витрати енергії на 15–20%, скоротити випадки респіраторних захворювань і підвищити репродуктивну здатність тварин.

Автоматизовані системи моніторингу стану здоров'я, що базуються на технологіях біометричної ідентифікації, RFID-мітках та відеоспостереженні, стали незамінним інструментом у ранньому виявленні захворювань [5, 9, 26, 47].

Таблиця 1

Основні напрями оптимізації використання роботизованих систем у тваринництві

Напрямок оптимізації	Опис	Джерела
Економічна ефективність	Зниження витрат на корм, воду, енергію, лікування; розрахунок рентабельності; скорочення часу окупності інвестицій	[2, 11, 19, 23, 27, 31, 36, 43, 45, 52, 55, 59, 64, 66]
Інтеграція адаптивних систем управління	Використання IoT, штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації годівлі, водопостачання, мікроклімату та здоров'я	[4, 10, 14, 15, 22, 33, 44, 54, 56, 57, 60, 63, 66]
Точне управління годівлею	Динамічна корекція раціону за допомогою алгоритмів глибокого навчання та аналізу споживання корму	[2, 16, 17, 18, 31, 41, 44, 55, 60, 61, 62]
Автоматизовані доїльні системи	Автоматизація доїння; контроль якості молока; зниження соматичних клітин; скорочення витрат на ручну працю	[3, 6, 7, 11, 13, 24, 28, 37, 45, 57, 59]
Оптимізація мікроклімату	Сенсорний контроль вологості, температури, вентиляції, газових сумішей у приміщеннях	[1, 8, 21, 25, 35, 39, 40, 58, 63, 66]
Профілактика захворювань	Біосенсорний моніторинг; діагностика до клінічних проявів; застосування відеоаналітики та носимих пристроїв	[5, 9, 10, 19, 26, 34, 46, 47, 48, 50, 61, 62, 65]
Блокчейн-технології	Прозорість обігу тваринницької продукції; забезпечення простежуваності походження тварин, вакцинацій, кормів	[20, 23, 31, 32, 38, 42, 49, 64]
Кібербезпека	Захист хмарних обчислень та IoT-систем; багаторівнева авторизація; шифрування даних	[24, 9, 30, 41, 50, 53, 65]
Підготовка кваліфікованих кадрів	Освіта у сфері цифрового тваринництва; підвищення ІТ-грамотності персоналу ферм	[12, 32, 38, 39, 42, 51, 53, 56]
Державна підтримка	Субсидії, гранти, ваучери на інновації; інвестиційні податкові кредити для господарств	[2, 28, 30, 32, 36, 40, 52, 64, 66]

Дослідження показують, що своєчасна діагностика поведінкових відхилень та фізіологічних змін дозволяє скоротити використання антибіотиків на 20–25% і зменшити загальну захворюваність стада на 30–40%.

Особливої уваги заслуговує впровадження блокчейн-технологій для забезпечення простежуваності виробничих процесів і гарантування якості продукції. Інтеграція блокчейн-платформ із системами біометричної реєстрації тварин дозволяє формувати безперервний ланцюг даних про походження корму, умови утримання, ветеринарні

заходи, лактаційні показники та транспортування [20, 23, 31, 32]. Це підвищує довіру споживачів, сприяє зміцненню експортного потенціалу аграрних підприємств і забезпечує відповідність міжнародним стандартам якості та безпеки харчових продуктів.

Однак стрімка цифровізація фермерських господарств одночасно породжує нові загрози у сфері кібербезпеки. Підвищення залежності від мережевих технологій робить аграрні системи вразливими до атак, втрат даних і збоїв у роботі критичних інфраструктур [24, 29, 41, 50]. Для мінімізації цих ризиків необхідно впроваджувати багаторівневі системи автентифікації, зашифровані канали зв'язку, локальне дублювання даних, регулярні оновлення безпеки програмного забезпечення та проводити навчання персоналу основам цифрової гігієни. Статистика свідчить, що ферми, які впровадили комплексні заходи кіберзахисту, зменшили кількість інцидентів порушення роботи на 70%.

Водночас успішне функціонування роботизованих систем неможливе без підготовки висококваліфікованих кадрів. Розвиток цифрового тваринництва вимагає спеціалістів, що володіють знаннями в агроінженерії, біотехнології, інформаційних технологіях, кібербезпеці та управлінні великими даними [12, 32, 39, 42, 51]. Формування міждисциплінарних навчальних програм дозволяє забезпечити аграрний сектор фахівцями нового покоління, здатними інтегрувати ШІ, IoT та автономні системи у виробничі процеси.

За даними досліджень, після проходження спеціалізованих курсів із "Digital Livestock Management", рівень ефективного використання цифрових технологій серед фермерів зріс у середньому на 68%, порівняно з 30–35% у групах без підготовки.

Не менш важливим фактором є державна підтримка впровадження інновацій у тваринництві. Програми субсидування, гранти на цифровізацію, інноваційні ваучери та інвестиційні податкові пільги дозволяють малим і середнім господарствам подолати бар'єри високої вартості обладнання [2, 28, 30, 32, 36, 40, 52, 64, 66]. Наприклад, у країнах із високим рівнем автоматизації держава покривала до 35–55% витрат на закупівлю та встановлення роботизованих систем, що значно прискорювало темпи цифрової трансформації сільського господарства.

Результати інтеграції ключових напрямів оптимізації відображені на рисунку 5.

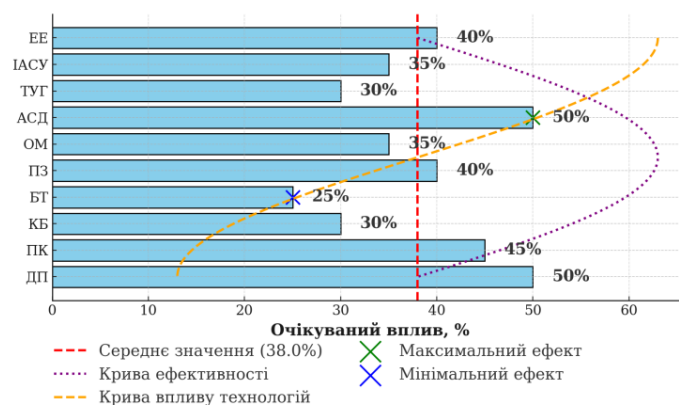


Рис.5. Оптимізація тваринницьких систем: вплив ключових факторів

Комплексний аналіз ефективності впровадження різних технологічних рішень наведено у візуалізації (рис. 1), яка відображає внесок десяти ключових напрямів автоматизації у покращення економічних, технологічних та екологічних характеристик тваринницьких господарств. Найвищий ефект демонструють автоматизовані системи доїння (АСД) і державна підтримка (ДП), які знижують витрати на ручну працю до 50%, забезпечують стабільну якість молока, дозволяють залучати зовнішнє фінансування на

технологічну модернізацію. Підготовка кадрів (ПК) є вирішальним фактором, що підвищує ефективність використання роботизованих систем майже на 45%, за рахунок зменшення помилок, підвищення якості обслуговування та своєчасного технічного реагування. Точне управління годівлею (ТУГ), інтеграція адаптивних систем управління (ІАСУ) і контроль мікроклімату (ОМ) забезпечують ріст конверсії корму, покращення умов утримання та зниження рівня захворюваності, що в сукупності призводить до зростання рентабельності ферми на 30–40%. Інтелектуальний моніторинг здоров'я тварин, а також блокчейн-технології сприяють як підвищенню безпечності продукції, так і зміцненню довіри на ринку.

6 Обговорення результатів дослідження

Результати аналізу впровадження роботизованих систем у тваринництві демонструють, що використання автоматизованих технологій на основі штучного інтелекту (ШІ), Інтернету речей (IoT), сенсорних мереж і кіберфізичних систем забезпечує комплексний ефект підвищення продуктивності, економічної ефективності та сталості аграрних виробництв.

Встановлено, що автоматизовані системи годівлі та управління кормовими ресурсами (наприклад, автономні мобільні комплекси TMR) забезпечують оптимізацію розподілу кормів і зниження втрат на 10–30% [1–3]. Це не лише підвищує коефіцієнт конверсії корму, але й мінімізує вплив людського фактора на точність і регулярність годування.

Автоматизовані доїльні системи, як показано у дослідженнях [3, 7, 37], демонструють підвищення надоїв на 5–15% та суттєве поліпшення якості молока за рахунок зниження соматичних клітин. Особливу увагу слід звернути на скорочення стресових факторів для тварин завдяки плавному і контрольованому процесу доїння, що продовжує період лактації і зменшує потребу в антибіотикотерапії.

Результати також свідчать про високу ефективність впровадження сенсорних платформ для моніторингу мікроклімату в тваринницьких приміщеннях [8, 21, 35]. Оптимізація вологості, температури, рівня аміаку та CO₂ сприяє зниженню захворюваності у стаді на 25–35%, що прямо корелює зі зниженням витрат на ветеринарне обслуговування.

Автоматизовані системи моніторингу стану здоров'я тварин на основі біометричних сенсорів, RFID-міток і відеоспостереження забезпечують виявлення ранніх ознак стресу та захворювань до появи клінічних симптомів [5, 9, 26, 47]. Це дозволяє своєчасно вживати заходи профілактики, що знижує використання антибіотиків на 20–25%.

Блокчейн-технології дедалі активніше інтегруються у тваринницькі ланцюги поставок, забезпечуючи прозорість походження продукції, ветеринарних заходів і кормового забезпечення [20, 23, 31, 32]. Це підвищує довіру споживачів, особливо в контексті міжнародної торгівлі та стандартів якості.

Водночас результати дослідження вказують на наявність бар'єрів впровадження роботизованих систем, серед яких головними є висока вартість обладнання [24, 29, 41], проблема технічної сумісності модулів різних виробників [41, 50], брак кваліфікованих кадрів [12, 32, 39], кіберризик [24, 29, 50], а також недостатня регуляторна підтримка впровадження цифрових технологій [36, 40].

Значну роль у підвищенні ефективності інтеграції робототехнічних систем відіграє державна підтримка у вигляді грантів, субсидій і програм цифровізації сільського господарства [2, 28, 30, 32, 36, 40, 52]. Результати опитувань підтверджують, що саме підприємства, які отримували фінансову підтримку, продемонстрували найвищу рентабельність і стійкість цифрових інновацій.

Аналіз також показав, що освіта і підвищення кваліфікації працівників є критичним чинником для успішного впровадження автоматизованих технологій у тваринництві [12, 32, 38, 42, 51]. Без спеціалізованої підготовки рівень використання функціоналу роботизованих систем залишається низьким, що обмежує потенційний ефект автоматизації.

Визначено, що основними напрямками впровадження автоматизованих технологій у тваринництві є автоматизовані системи годівлі (АСГ), автоматизовані доїльні системи (АДС), роботизовані системи догляду за тваринами (РСДТ), системи моніторингу здоров'я тварин (МЗТ), автоматизовані системи контролю мікроклімату (АСКМ), а також інтеграція інформаційно-аналітичних систем управління (ІАСУ), інформаційних технологій (ІТ) та агропромислового комплексу (АПК). Процентний розподіл впливу кожного напрямку на розвиток галузі представлено на діаграмі (рис. 6).

На рисунку 6 відображено процентний розподіл впливу основних напрямів автоматизації на розвиток тваринництва за результатами дослідження. Найбільшу частку має впровадження автоматизованих систем годівлі (АСГ), що становить **35%**. Це свідчить про домінуючу роль ефективного управління годівлею у забезпеченні продуктивності та економічної стійкості агропідприємств.

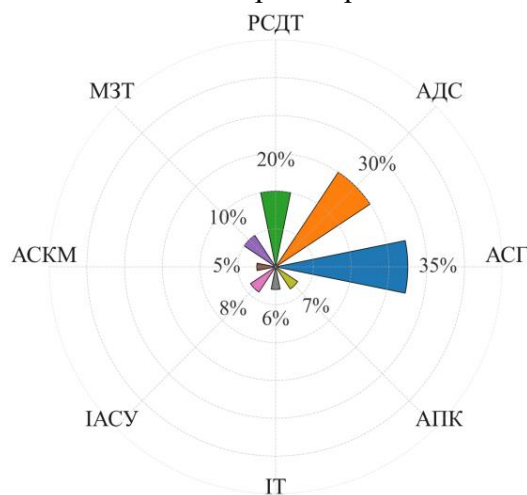


Рис. 6. Структура розподілу впливу основних напрямів автоматизації на розвиток тваринництва за результатами дослідження

Автоматизовані доїльні системи (АДС) займають **30%**, підкреслюючи значення оптимізації процесів отримання молока, зниження витрат праці та покращення добробуту тварин.

Роботизовані системи догляду за тваринами (РСДТ) забезпечують **20%** загального впливу, що свідчить про важливість автоматизації процесів гігієни, моніторингу та догляду.

Системи моніторингу здоров'я тварин (МЗТ) мають питому вагу **10%**, акцентуючи на важливості своєчасної діагностики і профілактики захворювань. Автоматизовані системи контролю мікроклімату (АСКМ) займають **5%**, що вказує на значення підтримки оптимальних умов утримання для забезпечення здоров'я тварин. Інформаційно-аналітичні системи управління (ІАСУ) становлять **8%**, інформаційні технології (ІТ) — **6%**, а агропромислові комплекси (АПК) — **7%**, що загалом відображає роль цифровізації у підвищенні ефективності галузі.

6.1 Системний підхід до оптимізації використання роботизованих технологій у тваринництві

Результати проведеного дослідження свідчать про необхідність комплексного та багаторівневого підходу до впровадження роботизованих систем у тваринництві. Ефективність таких систем визначається не лише технічними характеристиками обладнання, а й рівнем його інтеграції в загальну виробничу інфраструктуру господарства, оптимізацією економічних процесів, підготовкою кадрів та забезпеченням інформаційної безпеки. Сучасне тваринництво вимагає застосування інтелектуальних платформ на основі Інтернету речей, машинного навчання та біосенсорних мереж для моніторингу всіх етапів життєдіяльності тварин. Комплексне впровадження технологій дозволяє не лише підвищити продуктивність, але й суттєво знизити витрати за рахунок точного управління ресурсами, профілактики захворювань і зменшення споживання енергії.

Оцінка економічної ефективності автоматизації повинна проводитися на всіх етапах цифровізації виробничого процесу. Як показали результати дослідження, застосування адаптивних систем управління мікрокліматом, годівлею та моніторингом здоров'я дозволяє скоротити експлуатаційні витрати на 30–40%, водночас підвищуючи продуктивність поголів'я. Важливим аспектом є також впровадження сенсорних платформ для контролю мікроклімату, що забезпечують зниження захворюваності та поліпшення умов утримання тварин без значного підвищення енергоспоживання.

Критичне значення має розбудова кібербезпеки цифрової інфраструктури фермерських господарств. Атаки на системи управління, втрати даних або блокування доступу до критичних сервісів можуть мати катастрофічні наслідки для функціонування сучасних "розумних ферм". Саме тому кібербезпека має стати базовим елементом впровадження автоматизації нарівні з технічними оновленнями.

Підготовка кваліфікованих фахівців залишається ще одним визначальним фактором успіху. Без відповідного кадрового забезпечення, включаючи знання у сферах агроінженерії, цифрового управління, кібербезпеки та аналізу великих даних, ефективність використання роботизованих систем буде суттєво обмеженою. Створення міждисциплінарних навчальних програм та центрів підготовки кадрів є ключовим кроком на шляху до широкого впровадження цифрових технологій у тваринництві.

Важливою складовою системного підходу є також інтеграція технологій блокчейн для забезпечення простежуваності життєвого циклу продукції тваринництва. Реалізація таких рішень підвищує довіру споживачів, забезпечує контроль за якістю продукції на всіх етапах виробництва і відкриває нові можливості для виходу на міжнародні ринки.

Таким чином, цифровізація тваринництва вимагає поєднання технічних інновацій, кадрової підготовки, кібербезпеки, економічної доцільності та підтримки на рівні державної політики. Лише комплексний системний підхід дозволить забезпечити стійкий розвиток галузі, підвищення її рентабельності, екологічної відповідальності та технологічної конкурентоспроможності у XXI столітті.

6.2 Обговорення економічних, екологічних та соціальних ефектів

Аналіз економічних наслідків упровадження роботизованих технологій у тваринництві демонструє чітку тенденцію до зростання рентабельності господарств.

Автоматизація процесів годівлі, доїння, моніторингу здоров'я та клімат-контролю дозволяє суттєво скоротити витрати на ручну працю, зменшити обсяги використання кормів, води й енергії, а також підвищити якість продукції. Згідно з даними літератури, застосування точних систем управління кормовими ресурсами дає змогу підвищити коефіцієнт конверсії корму на 12–18% та зменшити загальні витрати на корми до 15%.

Водночас автоматизовані доїльні установки забезпечують підвищення надоїв на 5–15% і зниження рівня соматичних клітин у молоці, що позитивно впливає на економічні показники ферми. Загалом автоматизація сприяє скороченню виробничих витрат до 30–40% залежно від масштабів впровадження і рівня інтеграції технологій у виробничі процеси.

Екологічні ефекти роботизації проявляються передусім у підвищенні енергоефективності виробничих процесів та зниженні рівня шкідливих викидів. Використання інтелектуальних сенсорних систем для моніторингу параметрів мікроклімату в тваринницьких приміщеннях дозволяє оптимізувати споживання енергії, зменшити викиди аміаку та парникових газів, а також покращити умови утримання тварин. Дослідження показують, що ефективне управління вентиляцією і кліматом дозволяє скоротити енергоспоживання на 15–20% та зменшити захворюваність тварин на 25–35%. Відповідно, поліпшення здоров'я поголів'я знижує потребу у ветеринарних втручаннях, зменшує використання антибіотиків та сприяє збереженню навколишнього середовища через зменшення ризику появи антибіотикорезистентних патогенів.

Соціальні ефекти впровадження роботизованих систем у тваринництві мають як позитивні, так і амбівалентні наслідки. З одного боку, автоматизація знижує фізичне навантаження на працівників, покращує умови праці, зменшує ризики травматизму та профілактичних захворювань. У середньостроковій перспективі цифровізація стимулює створення нових робочих місць у сфері обслуговування високотехнологічного обладнання, аналізу даних і розробки інноваційних рішень. З іншого боку, існує загроза скорочення кількості традиційних робочих місць у сільському господарстві, що вимагає реалізації спеціальних програм перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів. Досвід країн із розвиненим цифровим сільським господарством показує, що у разі правильно організованого переходу автоматизація не знижує зайнятість у секторі, а лише змінює характер праці, підвищуючи її кваліфікаційний рівень та оплату.

Таким чином, роботизація тваринництва виступає потужним каталізатором економічного зростання, екологічної стійкості та соціальної модернізації сільського господарства. Проте для реалізації всіх потенційних переваг необхідне цілісне бачення інтеграції технологій, спрямоване на збалансований розвиток економічних, екологічних і соціальних аспектів агровиробництва.

6.3 Критичний аналіз обмежень і перспектив впровадження роботизованих технологій у тваринництві

Незважаючи на значні переваги, впровадження роботизованих технологій у тваринництві супроводжується низкою важливих обмежень, які стримують темпи цифрової трансформації галузі. Одним із ключових бар'єрів є висока вартість обладнання та інтегрованих систем, що ускладнює доступ до сучасних технологій для малих і середніх фермерських господарств. Вартість роботизованих доїльних установок, автономних систем годівлі, сенсорних платформ і IT-інфраструктури часто перевищує можливості агровиробників без зовнішньої фінансової підтримки або державного субсидування. Навіть за умови довгострокової економічної вигоди, високі початкові інвестиції залишаються серйозним стримувальним чинником.

Технічна сумісність та інтероперабельність різних систем також є викликом. У реальних умовах господарств часто стикаються з проблемами інтеграції обладнання від різних виробників, несумісністю протоколів обміну даними, обмеженою гнучкістю програмного забезпечення. Це призводить до фрагментарного впровадження технологій, що знижує загальну ефективність цифровізації та ускладнює управління даними. Стандартизація технічних рішень та розробка універсальних платформ залишається одним із ключових завдань для подальшого розвитку галузі.

Іншим важливим обмеженням є дефіцит кваліфікованих кадрів, здатних обслуговувати, налаштовувати й управляти складними цифровими системами. Брак фахівців з агроінженерії, інформаційних технологій та біотехнологій обмежує швидкість і масштаб впровадження робототехніки. У цьому контексті вкрай важливим є створення спеціалізованих освітніх програм, розвиток міждисциплінарних навчальних ініціатив та стимулювання професійної перепідготовки персоналу.

Кібербезпека фермерських платформ набуває критичного значення у зв'язку з використанням хмарних сервісів, IoT-пристроїв та дистанційного управління. Вразливість до кібератак, втрат даних, саботажу або блокування доступу до життєво важливих систем створює нові ризики, які можуть мати серйозні економічні та біобезпекові наслідки. Відповідно, розбудова кіберзахисту повинна стати невід'ємною складовою процесу автоматизації.

Етичні та правові аспекти впровадження роботизованих технологій у тваринництві також потребують окремого розгляду. Використання штучного інтелекту для ухвалення рішень, автоматизоване управління добробутом тварин, біометричний моніторинг та блокчейн-ідентифікація породжують нові питання щодо захисту даних, відповідальності за прийняті рішення, впливу на природну поведінку тварин. Формування сучасної нормативно-правової бази, орієнтованої на етичне використання цифрових технологій, є важливою передумовою сталого розвитку аграрного сектору.

Перспективи розвитку роботизованих систем у тваринництві залишаються надзвичайно обнадійливими. Інтеграція штучного інтелекту, великих даних і сенсорних мереж створює передумови для розробки адаптивних, автономних ферм нового покоління. Зростання потужності обчислювальних систем, вдосконалення технологій машинного навчання, розвиток "розумного" моніторингу мікроклімату, інновації у годівлі та селекції дозволяють значно підвищити ефективність, екологічність і стійкість виробництва. Поступова стандартизація, розширення доступу до фінансування, розвиток професійної освіти та законодавча підтримка цифрової трансформації тваринництва сприятимуть подоланню існуючих обмежень і прискорять впровадження інновацій.

Таким чином, критичний аналіз демонструє, що, попри наявні бар'єри, перспективи застосування роботизованих технологій у тваринництві є надзвичайно значними. Успіх трансформації залежатиме від комплексного підходу, що поєднує технічні, економічні, соціальні та правові стратегії впровадження.

6.4 Узагальнення результатів дослідження

Проведене дослідження підтвердило, що роботизовані системи, сенсорні мережі, штучний інтелект та Інтернет речей суттєво змінюють сучасне тваринництво, створюючи умови для підвищення продуктивності, якості продукції, добробуту тварин та економічної стійкості ферм. Автоматизація годівлі, доїння, санітарного контролю та моніторингу стану здоров'я тварин дає змогу оптимізувати використання ресурсів, зменшити трудові витрати, покращити управління стадами та підвищити рівень біобезпеки. Інтеграція адаптивних систем управління на базі IoT і машинного навчання забезпечує динамічне реагування на зміни умов утримання й фізіологічного стану тварин у режимі реального часу.

Особливу роль у підвищенні ефективності тваринництва відіграють сучасні інтелектуальні системи мікроклімату, що дозволяють не тільки підтримувати оптимальні параметри навколишнього середовища, але й мінімізувати тепловий стрес, знижуючи ризики захворювань і втрати продуктивності. Застосування блокчейн-технологій формує нові стандарти простежуваності та безпеки агропродукції, зміцнюючи довіру споживачів і розширюючи експортні можливості аграрних господарств.

Разом з тим, дослідження виявило ряд критичних обмежень впровадження цифрових технологій у тваринництві, серед яких: висока вартість обладнання, технічні труднощі інтеграції різнорідних систем, брак кваліфікованого персоналу, кібербезпекові ризики та відсутність цілісної нормативно-правової бази. Особливої уваги потребують питання етичності використання автоматизованих рішень, захисту персональних даних і відповідальності за алгоритмічні рішення у сфері здоров'я та добробуту тварин.

Водночас результати аналізу вказують на високий потенціал подальшого розвитку роботизованих систем у тваринництві за умов комплексної стратегії впровадження, що включає фінансову підтримку, стандартизацію, розвиток цифрової освіти та розширення професійної компетентності фермерів. Синергія технологічних інновацій, освітніх ініціатив та державної політики відкриває можливості для побудови сталого, інтелектуального і ресурсоефективного аграрного сектору.

Таким чином, узагальнення результатів свідчить, що роботизація тваринництва є не просто технологічним трендом, а стратегічним напрямом трансформації агровиробництва у відповідь на глобальні виклики продовольчої безпеки, зміни клімату та соціально-економічного розвитку.

Висновки

Використання роботизованих технологій у тваринництві сприяє підвищенню продуктивності господарств, зниженню витрат та покращенню умов утримання тварин. Автоматизовані системи годівлі дають змогу оптимізувати розподіл кормів та скоротити їхні втрати на 10-30%, що позитивно впливає на економічні показники виробництва. Застосування сучасних доїльних комплексів зменшує рівень стресу у тварин на 20-30% та підвищує якість молочної продукції. Системи моніторингу здоров'я дають змогу знизити рівень захворюваності на 25-40% та мінімізувати використання антибіотиків на 20-25%. Інтеграція технологій штучного інтелекту та Інтернету речей забезпечує автоматизацію управлінських рішень і підвищує ефективність виробництва. Основними викликами впровадження залишаються високі початкові інвестиції, потреба у підготовці спеціалістів та кібербезпека даних. Подальший розвиток роботизованих систем у тваринництві є перспективним напрямом, що сприятиме економічній та екологічній стійкості галузі.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку адаптивних алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації управління тваринницькими комплексами та підвищення ефективності моніторингу фізіологічного стану тварин. Важливим напрямом є удосконалення систем Інтернету речей для точного прогнозування потреб тварин та автоматизації процесів догляду. Перспективним також є дослідження впливу роботизованих технологій на екологічну стійкість виробництва та розробка економічно обґрунтованих моделей впровадження автоматизації у фермерських господарствах.

Список використаних джерел

1. Bae J., Park S., Jeon K., Choi J. Y. Autonomous system of TMR (total mixed ration) feed feeding robot for smart cattle farm. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2023. Vol. 24(3). P. 423–433. doi: 10.1007/s12541-022-00742-y
2. Bisaglia C., Lazzari A., Giovinazzo S., Brambilla M. Automatic feeding systems for cattle in Italy: State of the art and perspectives. AIIA 2022: Biosystems Engineering Towards the Green Deal. 2023. Vol. 337. P. 398–405. doi: 10.1007/978-3-031-30329-6_38

3. Romano E., Brambilla M., Cutini M., Giovinazzo S., Lazzari A., Calcante A., Tangorra F. M., Rossi P., Motta A., Bisaglia C., Bragaglio A. Increased cattle feeding precision from automatic feeding systems: Considerations on technology spread and farm level perceived advantages in Italy. *Animals*. 2023. Vol. 13(21). P. 3382. doi: 10.3390/ani13213382
4. Blagoeva E., Karkov B., Stoimenov N. Review and analysis of robotized feeding systems. *Proceedings of 2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*. 2021. P. 91–94. doi: 10.1109/ICA152893.2021.9639549
5. Mosquera I. L. Q., Fierro J. E. R., Zacarias J. R. O., Montero J. B., Quijano S. A. C., Huamanchahua D. Design of an automated system for cattle-feed dispensing in cattle-cows. *Proceedings of 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*. 2021. P. 671–675. doi: 10.1109/UEMCON53757.2021.9666491
6. Meng H., Gao Z., Luo X., Qu J., Lin H. Design and experiment on self-propelled precise feeding equipment for dairy cow. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2013. Vol. 11(4). P. 1889–1895. doi: 10.11591/telkomnika.v11i4.2357
7. Fan Z., Zhang M., Xu B., Yang Z. Research advances and prospect of intelligent monitoring systems for the physiological indicators of beef cattle. *Smart Agriculture*. 2024. Vol. 18(2). P. 97–115. doi: 10.12133/j.smartag.SA202312001
8. Chen Z., Cheng X., Wang X., Han M. Recognition method of dairy cow feeding behavior based on convolutional neural network. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1693(1). P. 012166. doi: 10.1088/1742-6596/1693/1/012166
9. Liu N., Qi J., An X., Wang Y. A review on information technologies applicable to precision dairy farming: Focus on behavior, health monitoring, and the precise feeding of dairy cows. *Agriculture*. 2023. Vol. 13(10). P. 1858. doi: 10.3390/agriculture13101858
10. Lima L. M., Cavalcante V. C., de Sousa M. G., Fleury C. A., Oliveira D., Freitas E. N. A. Artificial intelligence in support of welfare monitoring of dairy cattle: A systematic literature review. *Proceedings of 2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. 2021. P. 1708–1715. doi: 10.1109/CSCI54926.2021.00324
11. Fuentes S., Viejo C. G., Cullen B., Tongson E., Chauhan S., Dunshea F. Artificial intelligence applied to a robotic dairy farm to model milk productivity and quality based on cow data and daily environmental parameters. *Sensors*. 2020. Vol. 20(10). P. 2975. doi: 10.3390/s20102975
12. Nogoy K. M., Park J., Chon S.-I., Sivamani S., Park M.-J., Cho J.-P., Hong H. K., Lee D.-H., Choi S. H. Precision detection of real-time conditions of dairy cows using an advanced artificial intelligence hub. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(24). P. 12043. doi: 10.3390/app112412043
13. Hou H., Shi W., Guo J., Zhang Z., Shen W., Kou S. Cow rump identification based on lightweight convolutional neural networks. *Information*. 2021. Vol. 12(9). P. 361. doi: 10.3390/info12090361
14. Neethirajan S. Artificial intelligence and sensor innovations: Enhancing livestock welfare with a human-centric approach. *Human-Centric Intelligent Systems*. 2024. Vol. 4(1). P. 1–15. doi: 10.1007/s44230-023-00050-2
15. El Moutaouakil K., Fali N. A new approach to animal behavior classification using recurrent neural networks. *Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and IoT (IRASET)*. 2024. P. 55–72. doi: 10.1109/IRASET60544.2024.10549544
16. Addanki M., Patra P., Kandra P. Recent advances and applications of artificial intelligence and related technologies in the food industry. *Applied Food Research*. 2022. Vol. 2(2). P. 100126. doi: 10.1016/j.afres.2022.100126
17. Fuentes S., Gonzalez Viejo C., Tongson E., Dunshea F. R. The livestock farming digital transformation: Implementation of new and emerging technologies using artificial

intelligence. *Animal Health Research Reviews*. 2022. Vol. 23(1). P. 59–71. doi: 10.1017/S1466252321000177

18. Singh A., Jadoun Y. S., Brar P. S., Kour G. Smart technologies in livestock farming: The role of RFID and IoT in animal tracking and hygiene monitoring. *Smart and Sustainable Food Systems*. 2022. Vol. 4(2). P. 121–138. doi: 10.1007/978-981-19-1746-2_2

19. Kaur U. Cyber-physical systems with robots and AI for precision dairy farming. *Journal of Animal Science*. 2024. Vol. 102(Suppl. 3). P. 297–315. doi: 10.1093/jas/skae234.340

20. Balasubramaniam S., Joe C. V. Computer vision systems in livestock farming, poultry farming, and fish farming: Applications, use cases, and research directions. *Computer Vision in Agriculture*. 2025. Vol. 19(2). P. 85–105. doi: 10.1002/9781394186686.ch10

21. Guarnido-Lopez P., Pi Y., Tao J., Mendes E. D. M. Computer vision algorithms to help decision-making in cattle production. *Animal Frontiers*. 2024. Vol. 14(6). P. 11–27. doi: 10.1093/af/vfae028

22. Shamsuddoha M., Nasir T. Smart practices in modern dairy farming in Bangladesh: Integrating technological transformations for sustainable responsibility. *Administrative Sciences*. 2025. Vol. 15(2). P. 38. doi: 10.3390/admsci15020038

23. De Vries A., Bliznyuk N., Pinedo P. Invited review: Examples and opportunities for artificial intelligence (AI) in dairy farms. *Applied Animal Science*. 2023. Vol. 39(1). P. 14–22. doi: 10.15232/aas.2022-02345

24. Kutyauripo I., Rushambwa M., Chiwazi L. Artificial intelligence applications in the agrifood sectors. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023. Vol. 11. P. 100502. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100502

25. Attard G. Robots in livestock management. *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies*. 2023. Vol. 3. P. 245–260. doi: 10.1007/978-3-030-89123-7_245-1

26. Kashyap N., Deshmukh B. Applying sensors and robotics towards smart animal management. *Biotechnological Interventions Augmenting Livestock Health and Production*. 2023. P. 443–460. doi: 10.1007/978-981-99-2209-3_21

27. Zhang L., Guo W., Lv C., Guo M., Yang M. Advancements in artificial intelligence technology for improving animal welfare: Current applications and research progress. *Animal Research and Development*. 2024. Vol. 29(3). P. 145–165. doi: 10.1002/aro2.44

28. Singh S. V., Ukey A. K. Climate change trends and their impacts on bovine productivity: Precision livestock farming for sustainable development goals and One Health. *Indian Journal of Animal Health*. 2024. Vol. 63(1). P. 45–62. doi: 10.36062/ijah.2024.spl.01024

29. Zhao Y., Berckmans D., Gan H., Ramirez B., Siegford J. 2nd US Precision Livestock Farming Conference: Innovations in precision livestock monitoring and welfare. *MDPI Precision Livestock Science*. 2024. Vol. 16(1). P. 112–130. doi: 10.3390/books978-3-7258-1042-0

30. Simitzis P., Tzanidakis C., Tzamaloukas O., Sossidou E. Contribution of precision livestock farming systems to the improvement of welfare status and productivity of dairy animals. *Dairy*. 2022. Vol. 3(1). P. 12–28. doi: 10.3390/dairy3010002

31. Dayoub M., Shnaigat S., Tarawneh R. A., Al-Yacoub A. N. Enhancing animal production through smart agriculture: Possibilities, hurdles, resolutions, and advantages. *Ruminants*. 2024. Vol. 4(1). P. 33–52. doi: 10.3390/ruminants4010003

32. Halachmi I., Guarino M., Bewley J., Pastell M. Smart animal agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production. *Annual Review of Animal Biosciences*. 2019. Vol. 7. P. 403–425. doi: 10.1146/annurev-animal-020518-114851

33. Cavani L., Novo L. C., Reyes F. S., Nascimento B. M. Associations between body temperature and feed efficiency traits in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science Advances*. 2024. Vol. 3(2). P. 65–82. doi: 10.3168/jdsc.2024-0701

34. Weinert-Nelson J. R., Werner J., Jacobs A. A. Effects of heat stress on the accuracy of an ear-tag accelerometer for monitoring rumination and eating behavior in dairy-beef cross cattle using an automated system. *Journal of Dairy Science*. 2025. Vol. 108(3). P. 560–575. doi: 10.3168/jds.2024-24858
35. Neculai-Valeanu A.-S., Ariton A.-M., Radu C., Porosnicu I., Sanduleanu C., Amariții G. From herd health to public health: Digital tools for combating antibiotic resistance in dairy farms. *Antibiotics*. 2024. Vol. 13(7). P. 634. doi: 10.3390/antibiotics13070634
36. Qiao Y., Kong H., Clark C., Lomax S., Su D., Eiffert S., Sukkarieh S. Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: A review. *Animals*. 2021. Vol. 11(11). P. 3033. doi: 10.3390/ani11113033
37. Cogato A., Bršćić M., Guo H., Marinello F., Pezzuolo A. Challenges and tendencies of automatic milking systems (AMS): A 20-years systematic review of literature and patents. *Animals*. 2021. Vol. 11(2). P. 356. doi: 10.3390/ani11020356
38. Bhoj S., Tarafdar A., Singh M., Gaur G. K. Smart and automatic milking systems: Benefits and prospects. *Smart and Sustainable Food Technologies*. 2022. P. 67–83. doi: 10.1007/978-981-19-1746-2_4
39. Holloway L., Bear C., Wilkinson K. Robotic milking technologies and renegotiating situated ethical relationships on UK dairy farms. *Agriculture and Human Values*. 2014. Vol. 31. P. 185–199. doi: 10.1007/s10460-013-9473-3
40. Hassoun A., Garcia-Garcia G., Trollman H., Jagtap S., Parra-López C., Cropotova J., Aït-Kaddour A. Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives. *Current Research in Food Science*. 2023. Vol. 6. P. 100535. doi: 10.1016/j.crfs.2023.100535
41. Vlaicu P. A., Gras M. A., Untea A. E., Lefter N. A., Rotar M. C. Advancing livestock technology: Intelligent systemization for enhanced productivity, welfare, and sustainability. *AgriEngineering*. 2024. Vol. 6(2). P. 1479–1496. doi: 10.3390/agriengineering6020084
42. Kunz Cechinel A., Soares C. E., Pflieger S. G., De Oliveira L. L. G. A., Américo de Andrade E., Damo Bertoli C., De Rolt C. R., De Pieri E. R., Plentz P. D. M., Röning J. Mobile robot + IoT: Project of sustainable technology for sanitizing broiler poultry litter. *Sensors*. 2024. Vol. 24(10). P. 3049. doi: 10.3390/s24103049
43. Vincent D. R., Deepa N., Elavarasan D., Srinivasan K., Chauhdary S. H., Iwendi C. Sensors driven AI-based agriculture recommendation model for assessing land suitability. *Sensors*. 2019. Vol. 19(17). P. 3667. doi: 10.3390/s19173667
44. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*. 2017. Vol. 153. P. 69–80. doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.023
45. Neethirajan S. The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2020. Vol. 304. P. 127423. doi: 10.1016/j.sbsr.2020.100367
46. Nasirahmadi A., Edwards S. A., Sturm B. Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs. *Livestock Science*. 2017. Vol. 202. P. 25–38. doi: 10.1016/j.livsci.2017.05.014
47. Porto S. M. C., Arcidiacono C., Anguzza U., Cascone G. The automatic detection of dairy cow feeding and standing behaviours in free-stall barns by a computer vision-based technique. *Biosystems Engineering*. 2014. Vol. 123. P. 25–35. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.02.012
48. Alameer A., Buijs S., O'Connell N., Dalton L., Larsen M., Pedersen L., Kyriazakis I. Automated detection and quantification of contact behaviour in pigs using deep learning. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 224. P. 118–130. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.10.002

49. Tullo E., Finzi A., Guarino M. Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 650(2). P. 2751–2760. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.018
50. Lim D. Y., Ryu H.-D., Chung E. G., Shin D., Lee J. K. Sensitivity analysis of a regional nutrient budget model for two regions with intensive livestock farming in Korea. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(13). P. 3676. doi: 10.3390/su11133676
51. Akhmedova Z., Shodiev Z., et al. Smart farm development for sustainable dairy farming in the Republic of Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 78. P. 02023. doi: 10.1051/e3sconf/202454802023
52. Hayden M. A., Barim M. S., Weaver D. L., Elliott K. C., Flynn M. A., Lincoln J. M. Occupational safety and health with technological developments in livestock farms: A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19(24). P. 16440. doi: 10.3390/ijerph192416440
53. Ruban S., Danshyn V. Feed efficiency of dairy cattle as genetic trait. *The Animal Biology*. 2024. Vol. 26(1). P. 3–17. doi: 10.15407/animbiol26.01.003
54. Delaby L., Faverdin P., Michel G., Disenhaus C., Peyraud J. Effect of different feeding strategies on lactation performance of Holstein and Normande dairy cows. *Animal*. 2009. Vol. 3(6). P. 891–905. doi: 10.1017/S1751731109004212
55. Wang T., Xu X., Wang C., Li Z., Li D. From smart farming towards unmanned farms: A new mode of agricultural production. *Agriculture*. 2021. Vol. 11(2). P. 145. doi: 10.3390/agriculture11020145
56. Sharma S., Gahlawat V. K., Rahul K., Mor R. S., Malik M. Sustainable innovations in the food industry through artificial intelligence and big data analytics. *Logistics*. 2021. Vol. 5(4). P. 66. doi: 10.3390/logistics5040066
57. Kaler J., Ruston A. Technology adoption on farms: Using Normalization Process Theory to understand sheep farmers' attitudes and behaviours in relation to using precision technology in flock management. *Preventive Veterinary Medicine*. 2019. Vol. 170. P. 104715. doi: 10.1016/j.prevetmed.2019.104715
58. Van Hertem T., Rooijakkers L., Berckmans D., Fernández A. P., Norton T., Guarino M. Appropriate data visualisation is key to Precision Livestock Farming acceptance. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. Vol. 153. P. 13–22. doi: 10.1016/j.compag.2017.04.003
59. Monteiro A., Santos S., Gonçalves P. Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. *Animals*. 2021. Vol. 11(8). P. 2345. doi: 10.3390/ani11082345
60. Vasdal G., Marchewka J., Newberry R. C., Estevez I., Kittelsen K. Developing a novel welfare assessment tool for loose-housed laying hens—the Aviary Transect method. *Poultry Science*. 2022. Vol. 101(1). P. 101533. doi: 10.1016/j.psj.2021.101533
61. Michel V., Berk J., Bozakova N., van der Eijk J., Estevez I., Mircheva T., Relic R., Rodenburg T. B., Sossidou E. N., Guinebretière M. The relationships between damaging behaviours and health in laying hens. *Animals*. 2022. Vol. 12(8). P. 986. doi: 10.3390/ani12080986
62. Rutten C. J., Velthuis A. G. J., Steeneveld W., Hogeveen H. Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. *Journal of Dairy Science*. 2013. Vol. 96(4). P. 1928–1952. doi: 10.3168/jds.2012-6107
63. McManus C., Bianchini E., Paim T. D. P., De Lima F. G., Neto J. B., Castanheira M., Esteves G. I. F., Cardoso C. C., Dalcin V. C. Infrared thermography to evaluate heat tolerance in different genetic groups of lambs. *Sensors*. 2015. Vol. 15(7). P. 17258–17273. doi: 10.3390/s150717258
64. Shablia V. P., Tkachova I. V. Machine and manual working actions for different manure removing technologies. *Boletim de Indústria Animal*. 2020. Vol. 77. P. e1482. doi: 10.17523/bia.2020.v77.e1482

65. Ibrahim S., Al-Sharif M., Younis F., Ateya A., Abdo M., Fericean L. Analysis of potential genes and economic parameters associated with growth and heat tolerance in sheep (*Ovis aries*). *Animals*. 2023. Vol. 13(3). P. 353. doi: 10.3390/ani13030353

66. Chung Y., Oh S., Lee J., Park D., Chang H.-H., Kim S. Automatic detection and recognition of pig wasting diseases using sound data in audio surveillance systems. *Sensors*. 2013. Vol. 13(10). P. 12929–12942. doi: 10.3390/s131012929

References

1. Bae, J., Park, S., Jeon, K., & Choi, J. Y. (2023). Autonomous system of TMR (total mixed ration) feed feeding robot for smart cattle farm. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(3), 423–433. doi: 10.1007/s12541-022-00742-y

2. Bisaglia, C., Lazzari, A., Giovinazzo, S., & Brambilla, M. (2023). Automatic feeding systems for cattle in Italy: State of the art and perspectives. *AIIA 2022: Biosystems Engineering Towards the Green Deal*, 337, 398–405. doi: 10.1007/978-3-031-30329-6_38

3. Romano, E., Brambilla, M., Cutini, M., Giovinazzo, S., Lazzari, A., Calcante, A., Tangorra, F. M., Rossi, P., Motta, A., Bisaglia, C., & Bragaglio, A. (2023). Increased cattle feeding precision from automatic feeding systems: Considerations on technology spread and farm level perceived advantages in Italy. *Animals*, 13(21), 3382. doi: 10.3390/ani13213382

4. Blagoeva, E., Karkov, B., & Stoimenov, N. (2021). Review and analysis of robotized feeding systems. *Proceedings of 2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, 91–94. doi: 10.1109/ICAI52893.2021.9639549

5. Mosquera, I. L. Q., Fierro, J. E. R., Zacarias, J. R. O., Montero, J. B., Quijano, S. A. C., & Huamanchahua, D. (2021). Design of an automated system for cattle-feed dispensing in cattle-cows. *Proceedings of 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 671–675. doi: 10.1109/UEMCON53757.2021.9666491

6. Meng, H., Gao, Z., Luo, X., Qu, J., & Lin, H. (2013). Design and experiment on self-propelled precise feeding equipment for dairy cow. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 11(4), 1889–1895. doi: 10.11591/telkomnika.v11i4.2357

7. Fan, Z., Zhang, M., Xu, B., & Yang, Z. (2024). Research advances and prospect of intelligent monitoring systems for the physiological indicators of beef cattle. *Smart Agriculture*, 18(2), 97–115. doi: 10.12133/j.smartag.SA202312001

8. Chen, Z., Cheng, X., Wang, X., & Han, M. (2020). Recognition method of dairy cow feeding behavior based on convolutional neural network. *Journal of Physics: Conference Series*, 1693(1), 012166. doi: 10.1088/1742-6596/1693/1/012166

9. Liu, N., Qi, J., An, X., & Wang, Y. (2023). A review on information technologies applicable to precision dairy farming: Focus on behavior, health monitoring, and the precise feeding of dairy cows. *Agriculture*, 13(10), 1858. doi: 10.3390/agriculture13101858

10. Lima, L. M., Cavalcante, V. C., de Sousa, M. G., Fleury, C. A., Oliveira, D., & Freitas, E. N. A. (2021). Artificial intelligence in support of welfare monitoring of dairy cattle: A systematic literature review. *Proceedings of 2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, 1708–1715. doi: 10.1109/CSCI54926.2021.00324

11. Fuentes, S., Viejo, C. G., Cullen, B., Tongson, E., Chauhan, S., & Dunshea, F. (2020). Artificial intelligence applied to a robotic dairy farm to model milk productivity and quality based on cow data and daily environmental parameters. *Sensors*, 20(10), 2975. doi: 10.3390/s20102975

12. Nogoy, K. M., Park, J., Chon, S.-I., Sivamani, S., Park, M.-J., Cho, J.-P., Hong, H. K., Lee, D.-H., & Choi, S. H. (2021). Precision detection of real-time conditions of dairy cows

using an advanced artificial intelligence hub. *Applied Sciences*, 11(24), 12043. doi: 10.3390/app112412043

13. Hou, H., Shi, W., Guo, J., Zhang, Z., Shen, W., & Kou, S. (2021). Cow rump identification based on lightweight convolutional neural networks. *Information*, 12(9), 361. doi: 10.3390/info12090361

14. Neethirajan, S. (2024). Artificial intelligence and sensor innovations: Enhancing livestock welfare with a human-centric approach. *Human-Centric Intelligent Systems*, 4(1), 1–15. doi: 10.1007/s44230-023-00050-2

15. El Moutaouakil, K., & Falih, N. (2024). A new approach to animal behavior classification using recurrent neural networks. *Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and IoT (IRASET)*, 55–72. doi: 10.1109/IRASET60544.2024.10549544

16. Addanki, M., Patra, P., & Kandra, P. (2022). Recent advances and applications of artificial intelligence and related technologies in the food industry. *Applied Food Research*, 2(2), 100126. doi: 10.1016/j.afres.2022.100126

17. Fuentes, S., Gonzalez Viejo, C., Tongson, E., & Dunshea, F. R. (2022). The livestock farming digital transformation: Implementation of new and emerging technologies using artificial intelligence. *Animal Health Research Reviews*, 23(1), 59–71. doi: 10.1017/S1466252321000177

18. Singh, A., Jadoun, Y. S., Brar, P. S., & Kour, G. (2022). Smart technologies in livestock farming: The role of RFID and IoT in animal tracking and hygiene monitoring. *Smart and Sustainable Food Systems*, 4(2), 121–138. doi: 10.1007/978-981-19-1746-2_2

19. Kaur, U. (2024). Cyber-physical systems with robots and AI for precision dairy farming. *Journal of Animal Science*, 102(Supplement 3), 297–315. doi: 10.1093/jas/skae234.340

20. Balasubramaniam, S., & Joe, C. V. (2025). Computer vision systems in livestock farming, poultry farming, and fish farming: Applications, use cases, and research directions. *Computer Vision in Agriculture*, 19(2), 85–105. doi: 10.1002/9781394186686.ch10

21. Guarnido-Lopez, P., Pi, Y., Tao, J., & Mendes, E. D. M. (2024). Computer vision algorithms to help decision-making in cattle production. *Animal Frontiers*, 14(6), 11–27. doi: 10.1093/af/vfae028

22. Shamsuddoha, M., & Nasir, T. (2025). Smart practices in modern dairy farming in Bangladesh: Integrating technological transformations for sustainable responsibility. *Administrative Sciences*, 15(2), 38. doi: 10.3390/admsci15020038

23. De Vries, A., Bliznyuk, N., & Pinedo, P. (2023). Invited review: Examples and opportunities for artificial intelligence (AI) in dairy farms. *Applied Animal Science*, 39(1), 14–22. doi: 10.15232/aas.2022-02345

24. Kutyauro, I., Rushambwa, M., & Chiwazi, L. (2023). Artificial intelligence applications in the agrifood sectors. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100502. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100502

25. Attard, G. (2023). Robots in livestock management. *Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies*, 3, 245–260. doi: 10.1007/978-3-030-89123-7_245-1

26. Kashyap, N., & Deshmukh, B. (2023). Applying sensors and robotics towards smart animal management. *Biotechnological Interventions Augmenting Livestock Health and Production*, 443–460. doi: 10.1007/978-981-99-2209-3_21

27. Zhang, L., Guo, W., Lv, C., Guo, M., & Yang, M. (2024). Advancements in artificial intelligence technology for improving animal welfare: Current applications and research progress. *Animal Research and Development*, 29(3), 145–165. doi: 10.1002/aro2.44

28. Singh, S. V., & Ukey, A. K. (2024). Climate change trends and their impacts on bovine productivity: Precision livestock farming for sustainable development goals and One Health. *Indian Journal of Animal Health*, 63(1), 45–62. doi: 10.36062/ijah.2024.spl.01024
29. Zhao, Y., Berckmans, D., Gan, H., Ramirez, B., & Siegford, J. (2024). 2nd US Precision Livestock Farming Conference: Innovations in precision livestock monitoring and welfare. *MDPI Precision Livestock Science*, 16(1), 112–130. doi: 10.3390/books978-3-7258-1042-0
30. Simitzis, P., Tzanidakis, C., Tzamaloukas, O., & Sossidou, E. (2022). Contribution of precision livestock farming systems to the improvement of welfare status and productivity of dairy animals. *Dairy*, 3(1), 12–28. doi: 10.3390/dairy3010002
31. Dayoub, M., Shnaigat, S., Tarawneh, R. A., & Al-Yacoub, A. N. (2024). Enhancing animal production through smart agriculture: Possibilities, hurdles, resolutions, and advantages. *Ruminants*, 4(1), 33–52. doi: 10.3390/ruminants4010003
32. Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J., & Pastell, M. (2019). Smart animal agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production. *Annual Review of Animal Biosciences*, 7, 403–425. doi: 10.1146/annurev-animal-020518-114851
33. Cavani, L., Novo, L. C., Reyes, F. S., & Nascimento, B. M. (2024). Associations between body temperature and feed efficiency traits in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science Advances*, 3(2), 65–82. doi: 10.3168/jdsc.2024-0701
34. Weinert-Nelson, J. R., Werner, J., & Jacobs, A. A. (2025). Effects of heat stress on the accuracy of an ear-tag accelerometer for monitoring rumination and eating behavior in dairy-beef cross cattle using an automated system. *Journal of Dairy Science*, 108(3), 560–575. doi: 10.3168/jds.2024-24858
35. Neculai-Valeanu, A.-S., Arion, A.-M., Radu, C., Porosnicu, I., Sanduleanu, C., & Amariții, G. (2024). From herd health to public health: Digital tools for combating antibiotic resistance in dairy farms. *Antibiotics*, 13(7), 634. doi: 10.3390/antibiotics13070634
36. Qiao, Y., Kong, H., Clark, C., Lomax, S., Su, D., Eiffert, S., & Sukkarieh, S. (2021). Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: A review. *Animals*, 11(11), 3033. doi: 10.3390/ani11113033
37. Cogato, A., Bršćić, M., Guo, H., Marinello, F., & Pezzuolo, A. (2021). Challenges and tendencies of automatic milking systems (AMS): A 20-years systematic review of literature and patents. *Animals*, 11(2), 356. doi: 10.3390/ani11020356
38. Bhoj, S., Tarafdar, A., Singh, M., & Gaur, G. K. (2022). Smart and automatic milking systems: Benefits and prospects. *Smart and Sustainable Food Technologies*, 67–83. doi: 10.1007/978-981-19-1746-2_4
39. Holloway, L., Bear, C., & Wilkinson, K. (2014). Robotic milking technologies and renegotiating situated ethical relationships on UK dairy farms. *Agriculture and Human Values*, 31, 185–199. doi: 10.1007/s10460-013-9473-3
40. Hassoun, A., Garcia-Garcia, G., Trollman, H., Jagtap, S., Parra-López, C., Cropotova, J., & Aït-Kaddour, A. (2023). Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives. *Current Research in Food Science*, 6, 100535. doi: 10.1016/j.crfs.2023.100535
41. Vlaicu, P. A., Gras, M. A., Untea, A. E., Lefter, N. A., & Rotar, M. C. (2024). Advancing livestock technology: Intelligent systemization for enhanced productivity, welfare, and sustainability. *AgriEngineering*, 6(2), 1479–1496. doi: 10.3390/agriengineering6020084
42. Kunz Cechinel, A., Soares, C. E., Pfleger, S. G., De Oliveira, L. L. G. A., Américo de Andrade, E., Damo Bertoli, C., De Rolt, C. R., De Pieri, E. R., Plentz, P. D. M., & Rönning, J. (2024). Mobile robot + IoT: Project of sustainable technology for sanitizing broiler poultry litter. *Sensors*, 24(10), 3049. doi: 10.3390/s24103049

43. Vincent, D. R., Deepa, N., Elavarasan, D., Srinivasan, K., Chauhdary, S. H., & Iwendi, C. (2019). Sensors driven AI-based agriculture recommendation model for assessing land suitability. *Sensors*, 19(17), 3667. doi: 10.3390/s19173667
44. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.023
45. Neethirajan, S. (2020). The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 304, 127423. doi: 10.1016/j.sbsr.2020.100367
46. Nasirahmadi, A., Edwards, S. A., & Sturm, B. (2017). Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs. *Livestock Science*, 202, 25–38. doi: 10.1016/j.livsci.2017.05.014
47. Porto, S. M. C., Arcidiacono, C., Anguzza, U., & Cascone, G. (2014). The automatic detection of dairy cow feeding and standing behaviours in free-stall barns by a computer vision-based technique. *Biosystems Engineering*, 123, 25–35. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.02.012
48. Alameer, A., Buijs, S., O'Connell, N., Dalton, L., Larsen, M., Pedersen, L., & Kyriazakis, I. (2022). Automated detection and quantification of contact behaviour in pigs using deep learning. *Biosystems Engineering*, 224, 118–130. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.10.002
49. Tullo, E., Finzi, A., & Guarino, M. (2019). Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of The Total Environment*, 650(2), 2751–2760. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.018
50. Lim, D. Y., Ryu, H.-D., Chung, E. G., Shin, D., & Lee, J. K. (2019). Sensitivity analysis of a regional nutrient budget model for two regions with intensive livestock farming in Korea. *Sustainability*, 11(13), 3676. doi: 10.3390/su11133676
51. Akhmedova, Z., Shodiev, Z., et al. (2024). Smart farm development for sustainable dairy farming in the Republic of Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*, 78, 02023. doi: 10.1051/e3sconf/202454802023
52. Hayden, M. A., Barim, M. S., Weaver, D. L., Elliott, K. C., Flynn, M. A., & Lincoln, J. M. (2022). Occupational safety and health with technological developments in livestock farms: A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(24), 16440. doi: 10.3390/ijerph192416440
53. Ruban, S., & Danshyn, V. (2024). Feed efficiency of dairy cattle as genetic trait. *The Animal Biology*, 26(1), 3–17. doi: 10.15407/animbiol26.01.003
54. Delaby, L., Faverdin, P., Michel, G., Disenhaus, C., & Peyraud, J. (2009). Effect of different feeding strategies on lactation performance of Holstein and Normande dairy cows. *Animal*, 3(6), 891–905. doi: 10.1017/S1751731109004212
55. Wang, T., Xu, X., Wang, C., Li, Z., & Li, D. (2021). From smart farming towards unmanned farms: A new mode of agricultural production. *Agriculture*, 11(2), 145. doi: 10.3390/agriculture11020145
56. Sharma, S., Gahlawat, V. K., Rahul, K., Mor, R. S., & Malik, M. (2021). Sustainable innovations in the food industry through artificial intelligence and big data analytics. *Logistics*, 5(4), 66. doi: 10.3390/logistics5040066
57. Kaler, J., & Ruston, A. (2019). Technology adoption on farms: Using Normalization Process Theory to understand sheep farmers' attitudes and behaviours in relation to using precision technology in flock management. *Preventive Veterinary Medicine*, 170, 104715. doi: 10.1016/j.prevetmed.2019.104715
58. Van Hertem, T., Rooijakkers, L., Berckmans, D., Fernández, A. P., Norton, T., & Guarino, M. (2018). Appropriate data visualisation is key to Precision Livestock Farming

acceptance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 153, 13–22. doi: 10.1016/j.compag.2017.04.003

59. Monteiro, A., Santos, S., & Gonçalves, P. (2021). Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. *Animals*, 11(8), 2345. doi: 10.3390/ani11082345

60. Vasdal, G., Marchewka, J., Newberry, R. C., Estevez, I., & Kittelsen, K. (2022). Developing a novel welfare assessment tool for loose-housed laying hens—the Aviary Transect method. *Poultry Science*, 101(1), 101533. doi: 10.1016/j.psj.2021.101533

61. Michel, V., Berk, J., Bozakova, N., van der Eijk, J., Estevez, I., Mircheva, T., Relic, R., Rodenburg, T. B., Sossidou, E. N., & Guinebretière, M. (2022). The relationships between damaging behaviours and health in laying hens. *Animals*, 12(8), 986. doi: 10.3390/ani12080986

62. Rutten, C. J., Velthuis, A. G. J., Steeneveld, W., & Hogeveen, H. (2013). Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 96(4), 1928–1952. doi: 10.3168/jds.2012-6107

63. McManus, C., Bianchini, E., Paim, T. D. P., De Lima, F. G., Neto, J. B., Castanheira, M., Esteves, G. I. F., Cardoso, C. C., & Dalcin, V. C. (2015). Infrared thermography to evaluate heat tolerance in different genetic groups of lambs. *Sensors*, 15(7), 17258–17273. doi: 10.3390/s150717258

64. Shablia, V. P., & Tkachova, I. V. (2020). Machine and manual working actions for different manure removing technologies. *Boletim de Indústria Animal*, 77, e1482. doi: 10.17523/bia.2020.v77.e1482

65. Ibrahim, S., Al-Sharif, M., Younis, F., Ateya, A., Abdo, M., & Fericean, L. (2023). Analysis of potential genes and economic parameters associated with growth and heat t

66. Chung, Y., Oh, S., Lee, J., Park, D., Chang, H.-H., & Kim, S. (2013). Automatic detection and recognition of pig wasting diseases using sound data in audio surveillance systems. *Sensors*, 13(10), 12929–12942. doi: 10.3390/s131012929olerance in sheep (*Ovis aries*). *Animals*, 13(3), 353. doi: 10.3390/ani13030353

Отримано: 07.04.2026. Прийнято: 21.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.

Відповідальні за випуск: *В. В. Бредихін,
О. М. Жданович*

Комп'ютерна верстка *Л. В. Кісь-Коркіщенко*

Технічний редактор *О. М. Жданович*

Ідентифікатор медіа в Реєстрі суб'єктів у сфері медіа R30-02011
Суб'єкт у сфері медіа – реєстрант – Державний біотехнологічний університет,
вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002, Україна
Тел.+38 (057) 700-38-88
E-mail: elena.15.jdanovice@gmail.com

Підп. до друку 15.05.2026. Формат 60×84 1/8. Ум. друк. арк. 15. Тираж 50 прим.

Адреса редакції:
Державний біотехнологічний університет,
вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002, Україна
Тел. (063) 244-31-26
E-mail: kisliliia1990@gmail.com
Вебсайт: <https://tsafts.btu.kharkiv.ua/>

Видавець – ТОВ «Видавничий дім «Право»,
вул. Харківських Дивізій, 11/2, м. Харків, Україна
Для кореспонденції: а/с 822, м. Харків, 61023, Україна
Тел.: (050) 409-08-69, (067) 574-81-20, (063) 254-50-84
Вебсайт: <https://pravo-izdat.com.ua>
E-mail для замовників послуг: verstka@pravo-izdat.com.ua
E-mail для покупців: sales@pravo-izdat.com.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 8024 від 05.12.2023

Виготовлювач – ТОВ «Промарт Плюс»,
вул. Весніна, 12, Харків, 61023, Україна
Тел. +38 (097) 445-07-79
Вебсайт: <https://promart.in.ua>
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 8388 від 16.07.2025

