

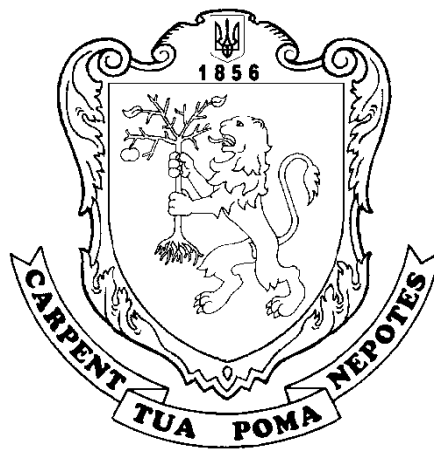
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

# ВІСНИК

ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Серія

Агроінженерні дослідження  
№ 28



Львів 2024

Викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також огляди в галузі агроінженерії щодо: вивчення властивостей сільськогосподарських матеріалів і ґрунтів; наукових засад створення нової техніки та технологій; механізації та автоматизації процесів і операцій агропромислового виробництва; сучасних технологій і технологічних процесів галузевого машинобудування; надійності та ефективного технічного сервісу машин; енергетики (передовсім відновлюваної); застосування інформаційних систем, а також управління проектами та програмами в агроінженерії; моделювання процесів, технологічних і виробничих систем (виращування, транспортування, зберігання, первинної переробки сільськогосподарської продукції); інженерних аспектів екологічної безпеки та безпеки праці в агропромисловому виробництві.

Для наукових працівників, фахівців агропромислового виробництва, аспірантів і магістрів, а також студентів інженерних спеціальностей.

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Львівського національного університету природокористування  
(протокол № 2 від 26.09.2024 р.)*

#### **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

**Ковалишин Степан**, к. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування (головний редактор);

**Власовець Віталій**, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування (заступник головного редактора);

**Бабич Михайло**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування (відповідальний секретар);

**Алекссюк-Гаврон Йоанна**, доктор наук, Варшавський університет наук про життя (Польща);

**Белоєв Іван**, доктор наук, Русенський університет імені Ангела Канчева (Болгарія);

**Братішко Вячеслав**, д. т. н., професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

**Валовський Гжегож**, доктор наук, Інститут технологій і наук про життя (Польща);

**Гнатов Андрій**, д. т. н., професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет;

**Голімовський Войцех**, доктор наук, професор, Вроцлавський університет економіки та бізнесу (Польща);

**Горбай Орест**, д. т. н., доцент, Національний університет «Львівська політехніка»;

**Городецький Іван**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

**Гуменюк Руслан**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

**Гюнер Фарук**, доктор наук, професор, Гіресунський університет (Туреччина);

**Данченко Олена**, д. т. н., професор, Черкаський державний технологічний університет;

**Зубко Владислав**, д. т. н., доцент, Сумський національний аграрний університет;

**Кангалов Пламен**, доктор наук, професор, Русенський університет імені Ангела Канчева (Болгарія);

**Келбаса Павел**, доктор наук, професор, Краківський аграрний університет імені Гуго Коллонтая (Польща);

**Керницький Іван**, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування;

**Консчний Річард**, доктор наук, професор, Академія імені Якуба з Парадижу (Польща);

**Крушельницька Вероніка**, доктор наук, Бидгощська Політехніка (Польща);

**Лавонюк Віталій**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

**Луб Павло**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

**Лула Павел**, доктор наук, професор, Краківський економічний університет (Польща);

**Ляшук Олег**, д. т. н., професор, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя;

**Мірошник Олександр**, д. т. н., професор, Державний біотехнологічний університет;

**Медиковський Микола**, д. т. н., професор, Національний університет «Львівська політехніка»;

**Оліскевич Мирослав**, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування;

**Приставка Мирослав**, доктор наук, Словацький університет сільськогосподарства в Нітрі (Словаччина);

**Пташник Вадим**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

**Радомська-Залас Александра**, доктор наук, Академія імені Якуба з Парадижу (Польща);

**Роговський Іван**, д. т. н., професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

**Самборський Сильвестр**, д. т. н., професор, Люблінська Політехніка (Польща);

**Сиротюк Сергій**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

**Сукач Олег**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування;

**Ткачук Ростислав**, д. т. н., професор, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності;

**Томпоровський Анжей**, д. т. н., професор, Бидгощська Політехніка (Польща);

**Тригуба Анатолій**, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування;

**Тюран Ян**, доктор наук, професор, Університет Нови-Сад (Сербія);

**Фіндура Павол**, доктор наук, професор, Словацький університет сільськогосподарства в Нітрі (Словаччина);

**Харченко Сергій**, д. т. н., професор, Державний біотехнологічний університет;

**Чабан Андрій**, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування;

**Чубик Роман**, к. т. н., доцент, Національний університет «Львівська політехніка»;

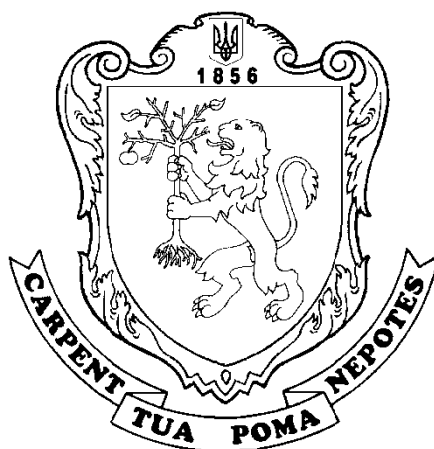
**Швець Олексій**, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
LVIV NATIONAL ENVIRONMENTAL UNIVERSITY

**BULLETIN**  
OF LVIV NATIONAL  
ENVIRONMENTAL UNIVERSITY

**Series**

**Agroengineering research**  
**№ 28**



Lviv 2024

The Bulletin presents results of theoretical and experimental researches as well as reviews in the field of agroengineering on the following issues: studies of the properties of agricultural materials and soils; scientific principles of designing new machines and technologies; mechanization and automation of the processes and operations of agro-industrial production; modern technologies and technological processes of industrial engineering; reliability and efficient technical service of machines; power engineering (particularly renewable energy); application of information systems in agroengineering, as well as project and program management; simulation of processes, technological and production systems (cultivation, transportation, storage, primary processing of agricultural products); engineering aspects of environmental safety and labor safety in agro-industrial production.

Intended for researchers, specialists in agro-industrial production, graduate students and masters, as well as students of engineering specialties.

*Recommended for publication by the Academic Council  
of Lviv National Environmental University  
(minutes No. 2 dated 26.09.2024 p.)*

**EDITORIAL BOARD:**

**Kovalyshyn Stepan**, Candidate of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (editor-in-chief);

**Vlasovets Vitaliy**, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (deputy editor);

**Babych Mykhailo**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (executive secretary);

**Aleksiejuk-Gawron Joanna**, PhD, Warsaw University of Life Sciences, Poland;

**Beloev Ivan**, PhD, Angel Kanchev University of Ruse, Bulgaria;

**Bratishko Viacheslav**, Doctor of Technical Sciences, professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine;

**Walowski Grzegorz**, PhD, Institute of Technology and Life Sciences, Poland;

**Hnatov Andrii**, Doctor of Technical Sciences, professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine;

**Golimowski Wojciech**, PhD, professor, Wroclaw University of Economics and Business, Poland;

**Horbai Orest**, Doctor of Technical Sciences, associate professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine;

**Horodetskyi Ivan**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Humeniuk Ruslan**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Faruk Güner**, PhD, professor, Giresun University, Turkey;

**Danchenko Olena**, Doctor of Technical Sciences, professor, Cherkasy State Technological University, Ukraine;

**Zubko Vladyslav**, Doctor of Technical Sciences, associate professor, Sumy National Agrarian University, Ukraine;

**Kangalov Plamen**, PhD, professor, Angel Kanchev University of Ruse, Bulgaria;

**Kielbasa Pawel**, PhD, professor, University of Agriculture in Krakow, Poland;

**Kernytskyi Ivan**, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Konieczny Ryszard**, PhD, professor, Jacob of Paradies University, Poland;

**Kruszelnicka Weronika**, PhD, Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland;

**Levoniuk Vitaliy**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Lub Pavlo**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Lula Pawel**, PhD, professor, Cracow University of Economics, Poland;

**Liashuk Oleh**, Doctor of Technical Sciences, professor, Ternopil Ivan Pului National Technical University, Ukraine;

**Miroshnyk Oleksandr**, Doctor of Technical Sciences, professor, State Biotechnological University, Ukraine;

**Medykovskiy Mykola**, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine;

**Olishevych Myroslav**, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Přístavka Miroslav**, PhD, professor, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovak Republic;

**Ptashnyk Vadym**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Radomska-Zalas Aleksandra**, PhD, Jacob of Paradies University, Poland;

**Rohovskyi Ivan**, Doctor of Technical Sciences, professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine;

**Samborski Sylwester**, Doctor of Technical Sciences, professor, Lublin University of Technology, Poland;

**Syrotiuk Serhii**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Sukach Oleh**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Tkachuk Rostyslav**, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv State University of Life Safety, Ukraine;

**Tomporowski Andrzej**, Doctor of Technical Sciences, professor, Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland;

**Tryhuba Anatolii**, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Turan Jan**, PhD, professor, University of Novi Sad, Serbia;

**Findura Pavol**, PhD, professor, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovak Republic;

**Kharchenko Serhii**, Doctor of Technical Sciences, professor, State Biotechnological University, Ukraine;

**Chaban Andrii**, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Chubyk Roman**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;

**Shvets Oleksii**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine.

# ЗМІСТ

## Розділ 1

### ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ, СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ І СИРОВИНИ

- Гошко З., Буртак В., Магац М., Левчук О., Кохана Т.* Дослідження фізико-механічних властивостей плодів яблук сорту Гала 9
- Гошко З., Буртак В., Барабаш Р., Кохана Т., Березовецька О.* Дослідження фізико-механічних властивостей квасолі сорту Ластівка 16

## Розділ 2

### МАШИНИ ТА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

- Швець О., Березовецький С., Коруняк П., Баранович С., Шеремета Р.* Вплив режимів MIG-паяння на параметри зварних швів з урахуванням синергетичного ефекту роботи зварювального півавтомата 24
- Баранович С., Шеремета Р., Швець О., Коробка С., Сиротюк С.* Методичний комплекс для визначення сили різання під час виконання токарних операцій 31
- Михалюк М., Шолудько Я., Бабич М., Гуменюк Р.* Аналітичне та експериментальне визначення температурних параметрів робочої рідини регульованого об'ємного гідроприводу машин 36
- Корчак М., Рудь А., Грушецький С., Замойський С.* Обґрунтування впливу котка на процес ущільнення комбінованого способу обробітку поля після збирання кукурудзи 41
- Бурнаєв О., Коруняк П., Семерак В., Пономаренко О., Тимочко В., Городецький І., Магац М.* Експериментальне дослідження впливу вібраційного навантаження 47

## Розділ 3

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

- Березовецька О., Шарибура А., Крутич О., Березовецький С.* Інноваційні ГІС-технології в сільському господарстві на базі автоматизованої платформи *EOSDA CROP MONITORING* 55
- Кіхтан А.* Аналіз наявних конструкцій та формування схеми гібридного приводу колісної автотехніки високої прохідності 61
- Шевчук Р., Сукач О., Миронюк О., Шевчук В., Габрієль Ю.* Дослідження коефіцієнтів зчеплення та опору коченню автомобільних шин 70
- Крайник Т., Ковалишин С.* Мобільність та керованість руху автомобіля бездоріжжям: формування нормативної бази 80

## Розділ 4

### ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

- Пташник В., Чумакевич Віктор, Пулеко І., Бондаренко Ю., Чумакевич Вікторія, Бабич М.* Обґрунтування вибору системи керування електроприводом насосного агрегату для водоочистки та водопідготовки на основі комп'ютерного моделювання 86

## Розділ 5

### ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

- Levoniuk V., Michailovicz T.* Analiza procesów nieustalonych w fragmencie sieci elektrycznej ultra wysokiego napięcia, która zawiera dławiki powietrzne 94
- Гречин Д., Дробот І., Гошко М., Какула О., Філіпович В.* Дослідження відхилення напруги від номінального значення у системі електропостачання підприємства 101

## Розділ 6

### НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МАШИН

- Колеснікова Т., Лиходій О., Махоркіна Т.* Теоретичні дослідження механізму зміни ступеня стиску в безшатунному двигуні внутрішнього згорання 107
- Пономаренко О., Семерак В., Бурнаєв О., Гавриляк О.* Розподіл напружень у півплощині з круговим отвором при розтягу під кутом до прямолінійного краю 117
- Бубняк Т., Семерак В., Бурнаєв О., Пономаренко О., Шпак Л., Говда О.* Напружений стан трансверсально-ізотропного середовища зі сфероїдальним включенням за умов неідеального контакту 125

<i>Березовецький С., Гуменюк Р., Швець О., Березовецька О., Коруняк П.</i>	Перспективи реорганізації машинобудівних підприємств у великі машинобудівні фірми України	130
<i>Кохан В., Гончарук О.</i>	Шляхи інтенсифікації процесу підготовки деталей для відновлення автомобільної техніки	137

## Розділ 7

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ. УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ ТА ПРОГРАМАМИ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

<i>Фіялковський В., Мозуль Х., Штогрин С., Луб П., Чухрай Л.</i>	Використання онлайн сервісів навчання із штучним інтелектом	142
<i>Тригуба А., Маланчук О., Тригуба І., Мармуляк А., Демчина В., Андрушків О., Олійник Р.</i>	Вплив сучасних інформаційних технологій на процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів	148
<i>Мозуль Х., Луб П., Чухрай Л., Штогрин С., Фіялковський В.</i>	Методика використання Utm-міток для моніторингу трафіку сайту та вебаналітики	159
<i>Железняк А., Пташник В., Падюка Р., Смолінський В., Станько В.</i>	Використання інтелектуальних інформаційних систем для управління простежуваністю сільськогосподарської продукції	166
<i>Луб П., Ковалишин О., Чухрай Л., Станько В., Заплатинський Н.</i>	Використання інтелектуалізованих інформаційних технологій для управління ресурсами сільськогосподарських підприємств	173
<i>Tryhuba A., Zheliezniak A., Tryhuba I., Tatomyr A.</i>	Approach and model for forecasting winter wheat yield using machine learning	182
<i>Луб П., Смолінський В., Падюка Р., Боярчук О., Станько В.</i>	Використання імітаційного моделювання в інформаційних системах підтримки ухвалення рішень	191
<i>Ковалишин О., Чухрай Л., Заплатинський Н.</i>	Вплив використання генеративного штучного інтелекту на продуктивність розробників програмних продуктів	196

## Розділ 8

### ІНЖЕНЕРІЯ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ ТА БЕЗПЕКИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

<i>Миронюк О., Паславський Р., Сукач О., Шевчук В.</i>	Оцінка пристосованості автомобілів-рефрижераторів до перевезення вантажів, що швидко псуються	202
<i>Сивулька П.</i>	Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів в Україні та країнах ЄС	209
<i>Тимочко В., Городецький І., Бурнаєв О., Мазур І., Кохана Т., Войналович В., Вісин О.</i>	Оцінка професійного ризику працівників під час обслуговування та ремонту електричного обладнання	217
<i>Худавердян Г., Сукач О.</i>	Оцінка адекватності імітаційної моделі руху універсальних тягово-транспортних засобів	227
<i>Барабаш Р., Шарибура А., Чухрай В., Михалюк М.</i>	Методика імітаційного моделювання технологічних процесів технічного обслуговування	233

# CONTENT

---

<b>Chapter 1</b>	
<b>PHYSICAL, MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS, AGRICULTURAL AND RAW MATERIALS</b>	
<i>Hoshko Z., Burtak V., Mahats M., Levchuk O., Kokhana T.</i> Study of physical and mechanical properties of Gala apple fruits	9
<i>Hoshko Z., Burtak V., Barabash R., Kohana T., Berezovetska O.</i> Study of the physical and mechanical properties of Lastivka variety beans	16
<b>Chapter 2</b>	
<b>MACHINES AND OPERATION PROCESSES OF AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION</b>	
<i>Shvets O., Berezovetskyi S., Koruniak P., Baranovych S., Sheremeta R.</i> Influence of MIG brazing modes on welding parameters taking into account the synergistic effect of the semi-automatic welding machine	24
<i>Baranovych S., Sheremeta R., Shvets O., Korobka S., Syrotiuk S.</i> Methodological complex for determining cutting force during turning operations	31
<i>Mykhaliuk M., Sholudko Ya., Babych M., Humeniuk R.</i> Analysis and experimental determination of temperature parameters for the working fluid in an adjustable volumetric hydraulic drive for machines	36
<i>Korchak M., Rud A., Hrushetskyi S., Zamoiskyi S.</i> Justification of the influence of the roller on the process of compaction of the combined method of field cultivation after harvesting corn	41
<i>Burnaiev O., Koruniak P., Semerak V., Ponomarenko O., Tymochko V., Horodetskyi I., Mahats M.</i> Experimental study of the influence of vibration load	47
<b>Chapter 3</b>	
<b>TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EFFICIENT MACHINE USE IN AGROENGINEERING</b>	
<i>Berezovetska O., Sharybura A., Krupych O., Berezovetskiy S.</i> Innovative GIS-technologies in agriculture based on the automated platform EOSDA CROP MONITORING	55
<i>Kikhtan A.</i> Analysis of existing designs and formation of a hybrid drive scheme for wheeled off-road vehicles	61
<i>Shevchuk R., Sukach O., Myroniuk O., Shevchuk V., Habriiel Yu.</i> Study of grip and rolling resistance coefficients of automobile tires	70
<i>Krainyk T., Kovalyshyn S.</i> Mobility and controllability of off-road vehicle movement: formation of a regulatory framework	80
<b>Chapter 4</b>	
<b>POWER ENGINEERING OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX</b>	
<i>Ptashnyk V., Chumakevych V., Puleko I., Bondarenko Yu., Chumakevych V., Babych M.</i> Justification of the choice of the electric drive control system for pump unit of water treatment and water conditioning based on computer modeling	86
<b>Chapter 5</b>	
<b>ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS IN AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION</b>	
<i>Levoniuk V., Muchailovich T.</i> Analysis of transient processes in a part of the ultra-high voltage electrical network that contains shunt reactors	94
<i>Hrechyn D., Drobot I., Hoshko M., Kakula O., Filipovych V.</i> Study of voltage deviation from the nominal value in the electrical supply systems of the enterprise	101
<b>Chapter 6</b>	
<b>RELIABILITY AND TECHNICAL SERVICE OF MACHINES</b>	
<i>Kolesnikova T., Lykhodii O., Makhorkina T.</i> Theoretical research of the variable compression ratio mechanism in the rodless internal combustion engine	107
<i>Ponomarenko O., Semerak V., Burnaiev O., Havryliak O.</i> Stress distribution in a half-plane with a circular hole under tension at an angle to a straight edge	117
<i>Bubniak T., Semerak V., Burnaiev O., Ponomarenko O., Shpak L., Hovda O.</i> Stress state of a transversally isotropic medium with a spheroidal inclusion under imperfect contact conditions	125
<i>Berezovetskyi S., Humeniuk R., Shvets O., Berezovetska O., Koruniak P.</i> Prospects for the reorganization of machine-building enterprises into large machine-building companies of Ukraine	130

*Kokhan V., Honcharuk O.* Enhancing the process of preparing parts for automotive equipment restoration 137

## **Chapter 7**

### **INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS. PROJECT MANAGEMENT IN AGROENGINEERING**

*Fiialkovskyi V., Mozul Kh., Shtrohryn S., Lub P., Chukhrai L.* Using online learning services that incorporate artificial intelligence 142

*Tryhuba A., Malanchuk O., Tryhuba I., Marmuliak A., Demchyna V., Andrushkiv O., Oliinyk R.* Impact of modern information technologies on the processes of initiating and planning the community and regional development projects 148

*Mozul Kh., Lub P., Chukhrai L., Shtrohryn S., Fiialkovskyi V.* Methods of using UTM tags for site traffic monitoring and web analytics 159

*Zheliezniak A., Ptashnyk V., Padiuka R., Smolinskyi V., Stanko V.* Intelligent information systems for managing the traceability of agricultural products 166

*Lub P., Kovalyshyn O., Chukhrai L., Stanko V., Zaplatynskyi N.* Utilization of intelligent information technologies for resources management in agricultural enterprises 173

*Tryhuba A., Zheliezniak A., Tryhuba I., Tatomyr A.* Approach and model for forecasting winter wheat yield using machine learning 182

*Lub P., Smolinskyi V., Padiuka R., Boiarchuk O., Stanko V.* Use of simulation modelling in decision support information systems 191

*Kovalyshyn O., Chukhrai L., Zaplatynskyi N.* Impact of using generative artificial intelligence on the productivity of software developers 196

## **Chapter 8**

### **ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION SAFETY**

*Myroniuk O., Paslavskyi R., Sukach O., Shevchuk V.* Assessment of refrigerator vehicles suitability for the transportation of perishable goods 202

*Syvulka P.* Comparative analysis of the methods of agro-ecological assessment of machine-tractor units in Ukraine and EU countries 209

*Tymochko V., Horodetskyi I., Burnaiev O., Mazur I., Kokhana T., Voinalovych V., Visyn O.* Assessment of occupational risk of workers during maintenance and repair of electrical equipment 217

*Khudaverdian H., Sukach O.* Assessment of the adequacy of the simulation model of universal towing vehicles 227

*Barabash R., Sharybura A., Chukhrai V., Mykhaliuk M.* Methodology of the simulation modeling of maintenance technological processes 233



**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ,  
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ І СИРОВИНИ**

УДК 631.358

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛОДІВ ЯБЛУК  
СОРТУ ГАЛА**

*Зіновій Гошко, к. т. н., Володимир Буртак, к. т. н., Мирон Магац, к. т. н.,  
Олександр Левчук, к. т. н., Тетяна Кохана, к. е. н.  
Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: zdenuk@gmail.com, vburtak-78@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.009>

**Гошко З., Буртак В., Магац М., Левчук О., Кохана Т. Дослідження фізико-механічних властивостей плодів яблук сорту Гала**

Стаття присвячена дослідженню фізико-механічних властивостей плодів яблук, які слід враховувати в їх післязбиральному обробітку, адже надалі всі плоди піддаються механічній дії: очищенню, транспортуванню, сортуванню, зберіганню, переробці тощо. Проектування та розрахунок обладнання для здійснення механічних операцій неможливі без знання технологічних властивостей плоду (розмірно-масових показників, міцності, зусилля різання). Значення зусилля різання плодів необхідно знати для встановлення оптимальних та раціональних параметрів робочих органів, що забезпечують подрібнення плодів, а також у проектуванні машин та апаратів переробної промисловості.

Виконання поставлених завдань передбачає розробку програми експериментальних досліджень, зокрема з визначення фізико-механічних властивостей плодів яблук сорту Гала, що добре зарекомендували себе в Україні і добре культивуються в західних областях:

- масових і розмірних показників;
- щільності плодів;
- зусилля різання плодів.

Були проведені дослідження, здійснено аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень та побудовано на їх основі експериментальні криві. Можна зробити такі висновки щодо плодів яблук сорту Гала:

- діаметр  $d_{\min} = 57$  мм,  $d_{\max} = 80$  мм,  $d_{\text{ср}} = 63$  мм,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 7$  %;
- маса  $m_{\min} = 95$  г,  $m_{\max} = 150$  г,  $m_{\text{ср}} = 115$  г,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 6,7$  %;
- об'єм  $V_{\min} = 100$  см<sup>3</sup>,  $V_{\max} = 165$  см<sup>3</sup>,  $V_{\text{ср}} = 129$  см<sup>3</sup>,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 4,6$  %;
- щільність  $g_{\min} = 0,39$  г/см<sup>3</sup>,  $g_{\max} = 0,54$  г/см<sup>3</sup>,  $g_{\text{ср}} = 0,46$  г/см<sup>3</sup>,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 4,7$  %;
- зусилля різання  $P_{\min} = 125$  Н,  $P_{\max} = 210$  Н,  $P_{\text{ср}} = 163$  Н,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 4,3$  %;
- питомий опір різанню  $q_{\min} = 1,31$  Н/см,  $q_{\max} = 2,09$  Н/см,  $q_{\text{ср}} = 1,69$  Н/см,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 5,6$  %.

Отримані результати свідчать, що діапазон коливань значень за розмірно-масовими показниками плодів яблук сорту Гала незначний, а значення коефіцієнта варіації не перевищує 10 %.

**Ключові слова:** плоди, яблука, фізико-механічні властивості, розмірні показники, зусилля різання.

**Hoshko Z., Burtak V., Mahats M., Levchuk O., Kohana T. Study of physical and mechanical properties of Gala apple fruits**

This article focuses on the physical and mechanical properties of apple fruits that must be considered during post-harvest processing. Apples undergo various mechanical actions such as cleaning, transportation, sorting, storage, and processing. Therefore, designing and calculating equipment for these mechanical operations requires a thorough understanding of the fruit's technological properties, including size, weight, strength, and cutting force. Understanding the cutting force of fruit is essential for determining optimal and efficient parameters for the working components that crush the fruit. This knowledge is also vital for designing machines and equipment for the processing industry.

To address these needs, a program for experimental research has been developed, specifically aimed at determining the physical and mechanical properties of Gala apples. This variety is well-established in Ukraine and thrives in the Western regions. The research will focus on the following aspects:

- mass and dimensional parameters
- fruit density
- fruit cutting force

By analyzing the results of the experimental studies and the resulting curves, the authors can draw meaningful conclusions about the Gala apple variety.

- diameter  $d_{\min} = 57$  mm,  $d_{\max} = 80$  mm,  $d_{\text{average}} = 63$  mm,  $V_{\text{coefficient of variation}} = 7$  %;

- weight  $m_{\min} = 95 \text{ g}$ ,  $m_{\max} = 150 \text{ g}$ ,  $m_{\text{average}} = 115 \text{ g}$ ,  $V_{\text{coeff. variation}} = 6.7 \%$ ;
- volume  $V_{\min} = 100 \text{ cm}^3$ ,  $V_{\max} = 165 \text{ cm}^3$ ,  $V_{\text{average}} = 129 \text{ cm}^3$ ,  $V_{\text{coefficient of variation}} = 4.6 \%$ ;
- density  $\rho_{\min} = 0.39 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\max} = 0.54 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{\text{average}} = 0.46 \text{ g/cm}^3$ ,  $V_{\text{coeff. variation}} = 4.7 \%$ ;
- cutting force  $P_{\min} = 125 \text{ N}$ ,  $P_{\max} = 210 \text{ N}$ ,  $P_{\text{average}} = 163 \text{ N}$ ,  $V_{\text{coeff. variation}} = 4.3 \%$ ;
- specific cutting resistance  $q_{\min} = 1.31 \text{ N/cm}$ ,  $q_{\max} = 2.09 \text{ N/cm}$ ,  $q_{\text{average}} = 1.69 \text{ N/cm}$ ,  $V_{\text{coeff. variation}} = 5.6 \%$ .

The obtained results indicate that the range of fluctuations in the size and weight of Gala apple fruits is insignificant, and the value of the coefficient of variation does not exceed 10 %.

**Keywords:** fruits, apples, physical and mechanical properties, dimensional indicators, cutting force.

**Постановка проблеми.** Фізико-механічні властивості плодів яблук є важливими показниками, які слід враховувати в їх післязбиральному обробітку, адже надалі всі плоди піддаються механічній дії: очищенню, транспортуванню, сортуванню, зберіганню, переробці тощо. Проектування та розрахунок обладнання для здійснення механічних операцій неможливі без знання технологічних властивостей плодів (зусилля перерізання). Значення зусилля руйнування шкірки та м'якоті необхідно знати для встановлення оптимальних та раціональних параметрів робочих органів, що забезпечують процес подрібнення, а також у проектуванні машин та апаратів харчової промисловості. Значення щільності м'якоті плодів дає змогу встановити залежність зусилля їх різання [5–9].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Яблуко – це плід яблуні, рослини з родини трояндових. Воно має круглий або яйцеподібний вигляд і зазвичай має діаметр від 5 до 10 сантиметрів. Його шкірка може бути різного кольору – від зеленого до жовтого, червоного і навіть темно-фіолетового. М'якоть яблука зазвичай біла або жовта, соковита і має солодкий або кисло-солодкий смак. У центрі плоду зазвичай розташоване насіння, яке буває білого або коричневого кольору.

Сорти яблук поділяють за вмістом цукрів, твердістю, придатністю до зберігання тощо. За швидкістю визрівання сорти поділяються на такі:

- літні (Мелба (Лазурне), Білий налив, Донешта тощо);
- осінні (Антонівка, Апорт, Гала, Жигулівське, Слава переможцям, Безсім'янка нова, Боровинка, тощо);
- зимові (Антонівка звичайна, Аніс новий, Айдаред, Богатир, Голд, Пепін шафранний, Пам'ять Мічуріна, Спартан, Ренет Симиренко, Кортланд тощо).

Яблуко належить до фруктів із високими показниками поживної цінності та насиченістю вітамінами, макро- та мікроелементами. Серед вітамінів у яблуках найбільше вітаміну С – 14 % від добової потреби людини, вітаміну К – 5 % добової норми, у меншій кількості містяться вітаміни А, Е, В1, В2, В6. Згідно з офіційним ресурсом Міністерства сільського господарства США одне середнє яблуко вагою

182 г містить 25 г вуглеводів, 4 г клітковини, 6 % від добової потреби калію, марганцю та міді [1; 4–9].

Яблука містять клітковину, завдяки чому ефективно нормалізують мікрофлору кишечника, що, своєю чергою, захищає організм від різних хвороб. Регулярне споживання яблук допомагає знизити ризики діабету завдяки високому вмісту поліфенолів та клітковини в їхньому складі. Вони здатні регулювати рівень цукру в крові. Антиоксидант, що називається кверцетин, який міститься в яблуках, має вплив на наш вуглеводний обмін та дозволяє попередити різкі стрибки рівня цукру в крові [10].

Яблука сорту Гала є одним із найпопулярніших сортів у світі і США. У молодих дерев урожайність помірна й щорічна, дорослі формують по 55–80 кг плодів. Сорт схильний до перевантаження врожаєм, при цьому плоди формуються дрібні.

Плоди середніх розмірів (115–145 г) досить одномірні, округлі або округло-зрізано-конічні зі слабкою ребристістю на верхівці, жовті зі смугасторозмитим оранжево-червоним рум'янком на більшій частині поверхні (рис. 1). Шкірочка тонка, щільна, суха. М'якуш світло-жовтий, щільний, соковитий, ламкий, відмінного кисло-солодкого смаку (4,6 бала).



**Рис. 1.** Плоди яблук сорту Гала  
**Fig. 1.** Gala apple fruits

Знімна стиглість настає в другій декаді вересня, споживча – у листопаді. У сховищі з природним охолодженням плоди зберігаються 2–2,5, а у холодильнику – 5–6 місяців. Транспортабельність середня. Використовуються у свіжому вигляді та достатньо добре піддаються переробці [2; 10].

**Постановка завдання.** Наше завдання – визначення фізико-механічних властивостей

плодів яблук сорту Гала, як об'єкта збирання і післязбирального обробітку, з метою подальшого використання отриманих результатів у проектуванні подрібнювальних машин.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення поставлених завдань була розроблена програма експериментальних досліджень, яка передбачала визначення таких фізико-механіч-

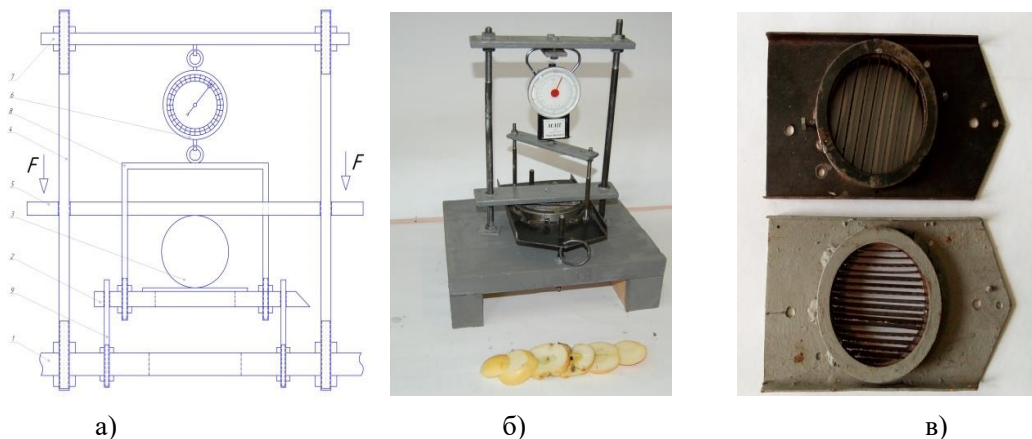
них властивостей плодів яблук сорту Гала, що позитивно зарекомендував себе і активно культивується в західних областях України:

- розмірні показники ( $d$  – діаметр) (рис. 2, а);
- маса ( $m$ ), об'єм ( $v$ ) (рис. 2, б, в), щільність ( $g$ );
- зусилля подрібнення плодів ( $P$ ) (рис. 3).



**Рис. 2.** Вимірювання розмірних і масових показників яблук сорту Гала  
**Fig. 2.** Measurement of dimensional and mass indicators of apples of the Gala variety

Для проведення досліджень здійснювалась вибірка з 30 здорових повноцінних плодів яблук сорту Гала. Дослідження проводились у лабораторних умовах з допомогою перерахованого вимірювального обладнання.



**Рис. 3.** Лабораторна установка для визначення зусилля розрізання (яблука) на пластинки:  
 а) загальна схема; б) загальний вигляд; в) блоки різальних пластин  
**Fig. 3.** Laboratory setup for determining the force of cutting (apples) into plates;  
 а) general scheme; б) general view; в) blocks of cutting inserts

Зусилля різання плодів можна визначити дослідним шляхом, за допомогою приладу (див. рис. 3).

Прилад (див. рис. 3) для дослідження зусилля різання плодоовочевої продукції складається з плити 1, на якій закріплена ножова касета 2 із змінним блоком пластинчастих ножів, двох головних напрямних стрижнів 4, натискної пластини 5, цифрового динамометра 6 із ціною поділки 0,01 кг та опорної плити 7.

Лабораторна установка працює таким чином: при прикладенні зусилля на натискну пластину 5 вона тисне на досліджуваний мате-

ріал 3 і притискає його до ножової касети 2, аж до моменту розрізання плоду на пластівці. Ножова касета 2 за допомогою вилки 8 шарнірно приєднана до механічного динамометра 6, який у верхній частині кріпиться до нерухомої опорної плити 7.

Ножова касета 2 під дією навантаження здійснює плоско-паралельний рух у вертикальній площині по допоміжних напрямних стрижнях 9. Зусилля, що діє на натискну плиту 5, через ножову касету 2 і вилку 8 передається на механічний динамометр 6, який фіксує макси-

мальне зусилля під час розрізання плодово-овочевої продукції.

У процесі випробувань визначали максимальне зусилля  $P$ , яке необхідне для розрізання зразка. На основі результату експериментальних досліджень визначаємо питома навантаження по довжині леза  $q$ , яке розрахуємо за формулою [3]:

$$q = \frac{4 \cdot P}{3 \cdot \sum_{i=1}^n l_i}, \quad (1)$$

де  $P$  – максимальне прикладене зусилля до натискної пластини, Н;

$l_i$  – робоча довжина  $i$ -го леза, см.

Щільність досліджуваного зразка:

$$g = m/V, \quad (2)$$

де  $m$  – маса досліджуваного зразка, г;

$V$  – об’єм досліджуваного зразка,  $cm^3$ .

На основі отриманих експериментальних даних було побудовано гістограми, полігони та криві накопичених дослідних ймовірностей (рис. 4-9).

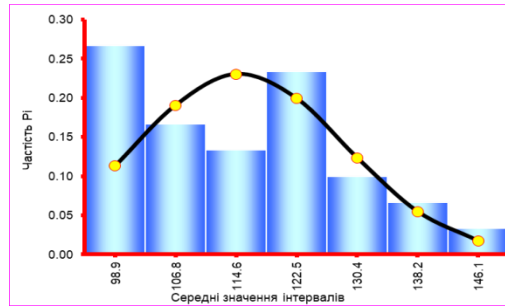


Рис. 4. Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за масою  $m$ , г  
Fig. 4. Histogram of the distribution of Gala apple fruits by mass  $m$ , g

Таблиця 1. Результати статистичних досліджень за масою плодів  
Table 1. Results of statistical studies by fruit weight

Мінімальне значення	Умін	95
Максимальне значення	Умакс	150
Величина вибірки	N	30
Кількість інтервалів	k	7
Крок інтервалу	deltaУ	7.9
Математичне сподівання	Ус	115.167
Серед.-квадр. відхилення	sigma	13.599
Коефіцієнт варіації	niu	0.674

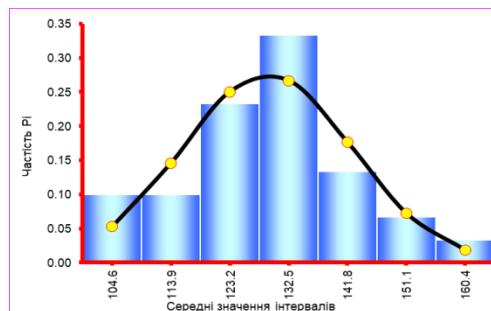
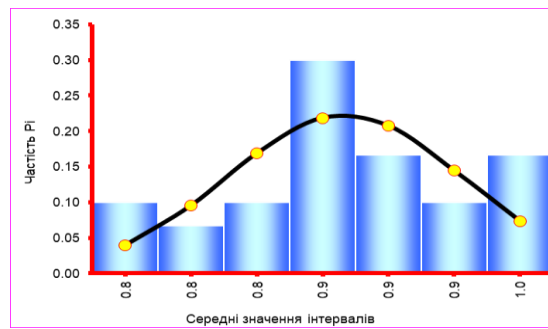


Рис. 5. Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за об’ємом  $V$ ,  $cm^3$   
Fig. 5. Histogram of the distribution of Gala apple fruits by volume  $V$ ,  $cm^3$

Таблиця 2. Результати статистичних досліджень за об’ємом плодів  
Table 2. Results of statistical studies on fruit volume

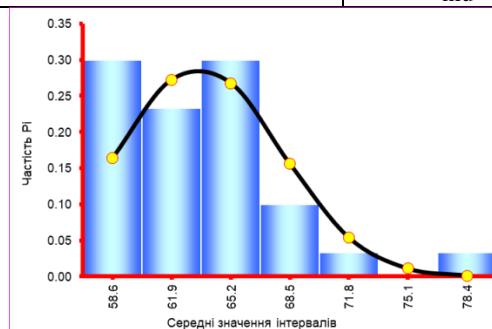
Мінімальне значення	Умін	100
Максимальне значення	Умакс	165
Величина вибірки	N	30
Кількість інтервалів	k	7
Крок інтервалу	deltaУ	9,3
Математичне сподівання	Ус	129,095
Серед.-квадр. Відхилення	sigma	13,453
Коефіцієнт варіації	niu	0,462



**Рис. 6.** Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за щільністю  $g, \text{г/см}^3$   
**Fig. 6.** Histogram of the distribution of Gala apple fruits by density  $g, \text{g/cm}^3$

**Таблиця 3.** Результати статистичних досліджень за щільністю плодів  
**Table 3.** Results of statistical studies on fruit density

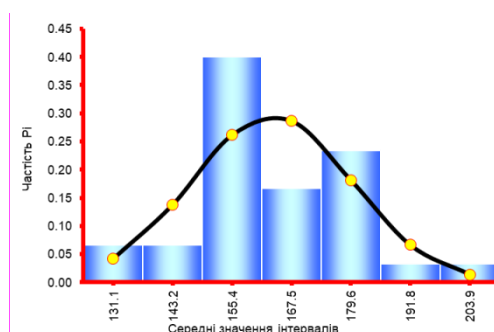
Мінімальне значення	Умін	0,76
Максимальне значення	Умакс	0,99
Величина вибірки	N	30
Кількість інтервалів	k	7
Крок інтервалу	deltaY	0,0
Математичне сподівання	Ус	0,886
Серед.-квадр. відхилення	sigma	0,059
Коефіцієнт варіації	niu	0,468



**Рис. 7.** Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за діаметром плодів,  $d, \text{мм}$   
**Fig. 7.** Histogram of the distribution of Gala apple fruits by fruit diameter,  $d, \text{mm}$

**Таблиця 4.** Результати статистичних досліджень за діаметром плодів  
**Table 4.** Results of statistical studies on fruit diameter

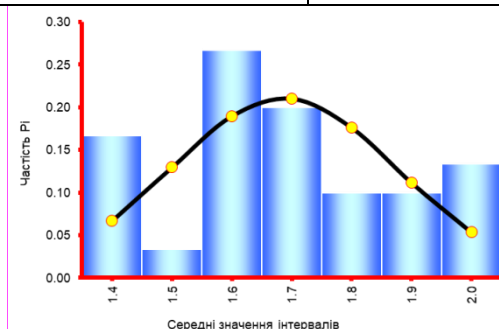
Мінімальне значення	Умін	57
Максимальне значення	Умакс	80
Величина вибірки	N	30
Кількість інтервалів	k	7
Крок інтервалу	deltaY	3,3
Математичне сподівання	Ус	63,462
Серед.-квадр. відхилення	sigma	4,548
Коефіцієнт варіації	niu	0,704



**Рис. 8.** Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за зусиллям різання,  $R, \text{H}$   
**Fig. 8.** Histogram of the distribution of Gala apple fruits according to the cutting effort,  $R, \text{H}$

**Таблиця 5.** Результати статистичних досліджень за зусиллям різання плодів  
**Table 5.** Results of statistical research on fruit cutting effort

Мінімальне значення	У <sub>мін</sub>	125
Максимальне значення	У <sub>макс</sub>	210
Величина вибірки	N	30
Кількість інтервалів	k	7
Крок інтервалу	deltaY	12,1
Математичне сподівання	У <sub>с</sub>	163,452
Серед.-квадр. відхилення	sigma	16,392
Коефіцієнт варіації	niu	0,426



**Рис. 9.** Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за питомим навантаженням по довжині леза,  $q$ , Н/см

**Fig. 9.** Histogram of the distribution of Gala apple fruits according to the specific load along the length of the blade,  $q$ , N/cm

**Таблиця 6.** Результати статистичних досліджень за питомим навантаженням по довжині леза  
**Table 6.** Results of statistical studies on the specific load along the length of the blade

Мінімальне значення	У <sub>мін</sub>	1,31
Максимальне значення	У <sub>макс</sub>	2,09
Величина вибірки	N	30
Кількість інтервалів	k	7
Крок інтервалу	deltaY	0,1
Математичне сподівання	У <sub>с</sub>	1,685
Серед.-квадр. відхилення	sigma	0,211
Коефіцієнт варіації	niu	0,562

**Висновки.** Аналізуючи отримані результати експериментальних досліджень та побудовані на їх основі експериментальні криві, можна зробити такі висновки щодо плодів яблук сорту Гала:

- діаметр  $d$   $мін = 57$  мм,  $d$   $макс = 80$  мм,  $d$   $ср = 63$  мм,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 7$  %;
- маса  $m$   $мін = 95$  г,  $m$   $макс = 150$  г,  $m$   $ср = 115$  г,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 6,7$  %;
- об'єм  $V$   $мін = 100$  см<sup>3</sup>,  $V$   $макс = 165$  см<sup>3</sup>,  $V$   $ср = 129$  см<sup>3</sup>,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 4,6$  %;
- щільність  $g$   $мін = 0,39$  г/см<sup>3</sup>,  $g$   $макс = 0,54$  г/см<sup>3</sup>,  $g$   $ср = 0,46$  г/см<sup>3</sup>,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 4,7$  %;
- зусилля перерізання  $P$   $мін = 125$  Н,  $P$   $макс = 210$  Н,  $P$   $ср = 163$  Н,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 4,3$  %;
- питомий опір різанню  $q$   $мін = 1,31$  Н/см,  $q$   $макс = 2,09$  Н/см,  $q$   $ср = 1,69$  Н/см,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 5,6$  %.

Отримані результати свідчать, що діапазон коливань значень за розмірно-масовими показниками плодів яблук сорту Гала незначний, а значення коефіцієнта варіації не перевищує

10%. Отже, у процесі проєктування сортувальних та калібрувальних машин суттєвих проблем під час розділення плодів виникати не буде. Досліджуваний сорт добре подрібнюється, формуючи дольки однакової товщини при невеликому зусиллі. Отримана продукція не кришиться і добре зберігає свою форму, що можна використати для виробництва сухофруктів та фруктових чіпсів.

#### Бібліографічний список

1. Головченко Г. С., Калнагуз О. М., Сіренко Ю. В. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: конспект лекцій. Суми: РВВ СНАУ, 2012. 59 с.
2. Кондратенко П. В., Шевчук Л. М., Левчук Л. М. Методика оцінки якості плодово-ягідної продукції. Київ, 2008. 80 с.
3. Крунич О. М., Левко С. І., Крунич Р. О. Спосіб визначення об'єму тіл неправильної форми. *Вчені Львівського національного аграрного університету виробництву: каталог інноваційних розробок*. Львів 2014. № 14. С. 63.

4. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: навч. посіб. / А. С. Кобець, Т. Д. Іщенко, Б. А. Волик, О. А. Демидов. Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2009. 84 с.
5. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: практикум / М. В. Бакум, О. М. Горбатовський, В. Ю. Манчинський, Ю. О. Манчинський, А. В. Сергеева. Харків: РВВ ХНТУСГ, 2005. 193 с.
6. Петак Г. М. Практикум з технології зберігання та переробки плодів і овочів. Ужгород, 1998. 98 с.
7. Подпрятів Г. І., Рожко В. І., Скалецька Л. Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. Київ: Аграрна освіта, 2014. 393 с.
8. Хайліс Г. А., Гошко З. О. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: навч. посіб. Луцьк: РВВ ЛДТУ, 1998. 268 с.
9. Царенко О. М., Войтюк Д. Г. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. Київ: РВВ «Мета», 2003. 441 с.
10. Min B., Lim J., Ko S. Environmental friendly preparation of pectins from agricultural byproducts and their structural. *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102, No 4. P. 3855-3860.

*Стаття надійшла 07.05.2024*

УДК 631.358

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КВАСОЛІ СОРТУ ЛАСТІВКА

*Зіновій Гошко, к. т. н., Володимир Буртак, к. т. н., Руслан Барабаш, к. т. н.,  
Тетяна Кохана, к. е. н., Оксана Березовецька, доктор філософії*  
*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: zdenuk@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.016>

### **Гошко З., Буртак В., Барабаш Р., Кохана Т., Березовецька О. Дослідження фізико-механічних властивостей квасолі сорту Ластівка**

Досліджено фізико-механічні властивості квасолі, які варто враховувати під час збирання і подальшого післязбирального обробітку, адже все зерно піддається механічній дії: обмолоту, очищенню, сортуванню, транспортуванню, зберіганню, переробці тощо. Зауважено, що проектування та розрахунок обладнання для здійснення механічних операцій неможливі без знання технологічних властивостей складових зерна (оболонки, ядра). Значення зусилля руйнування оболонки і ядра необхідно знати для встановлення оптимальних та раціональних параметрів робочих органів, а також у проектуванні машин та апаратів збиральної і переробної промисловості.

Для виконання поставлених завдань розроблено програму експериментальних досліджень, яка передбачала визначення таких фізико-механічних властивостей квасолі сорту Ластівка, які добре зарекомендували себе в країнах Європи і добре культивуються в західних областях України: масових і розмірних показників; зусилля, що витрачається на руйнування; модуля пружності.

Отримані результати свідчать, що діапазон коливань значень за розмірно-масовими показниками насіння квасолі сорту Ластівка не суттєвий. Знаючи середню кількість рослин на одному квадратному метрі, кількість стручків на рослині й кількість зернин у стручку, можна легко розрахувати планову врожайність квасолі.

Доведено, що зусилля руйнування насіння є досить високим і має значні межі варіації, що може негативно впливати на його обробку, очищення, транспортування. Неправильно вибрані режими роботи обладнання можуть спричинити руйнування частини насіння.

**Ключові слова:** квасоля, фізико-механічні властивості, розмірні показники.

### **Hoshko Z., Burtak V., Varabash R., Kohana T., Berezovetska O. Study of the physical and mechanical properties of Lastivka variety beans**

This article focuses on the physical and mechanical properties of beans, which are crucial for their post-harvest processing. All grains undergo mechanical actions such as cleaning, sorting, transportation, storage, and processing, making it essential to understand the technological properties of the grain components (shells and kernels). To design and calculate the equipment for these mechanical operations, one needs to know the force required to break the shell and the kernel. This knowledge helps establish optimal parameters for the working components and is vital for the design of machines and devices used in the processing industry. To address these tasks, a program for experimental research was developed to determine several physical and mechanical properties of the Lastivka variety of beans. This variety is well-regarded in European countries and is commonly cultivated in the western regions of Ukraine. The research focused on measuring mass and dimensional indicators, the force required for destruction, and the modulus of elasticity.

The results indicate that the variations in size and mass of the Lastivka beans are minimal. By calculating the average number of plants per square meter, the number of pods per plant, and the number of grains per pod, one can easily estimate the expected yield of beans. However, the force required to destroy the seeds is relatively high and varies significantly, which can negatively impact processing, cleaning, and transportation. If the operational settings of the equipment are not correctly selected, it may result in the destruction of some seeds.

**Keywords:** beans, physical and mechanical properties, dimensional indicators.

**Постановка проблеми.** Фізико-механічні властивості квасолі є важливими показниками, які слід враховувати під час збирання і подальшого післязбирального обробітку, адже надалі все зерно піддається механічній дії: обмолоту, очищенню, сортуванню, транспортуванню, зберіганню, переробці тощо. Проектування та розрахунок обладнання для здійснення

механічних операцій неможливі без знання технологічних властивостей складових зерна. Значення зусилля руйнування зерна необхідно знати для встановлення оптимальних та раціональних параметрів робочих органів, у проектуванні збиральних машин та апаратів переробної промисловості [1-7; 18].



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Квасоля звичайна – бобова рослина, придатна для вживання в їжу. У лікувальних цілях використовуються стулки культури.

Квасоля звичайна є популярною городньою культурою і вирощується повсюдно. Частина сортів має довге в'юнке стебло, у деяких різновидів воно пряме. Рослина гілляста, має черешкове трійчасте складне листя і прилистки. Квасоля зазвичай викидає від двох до шести квіток метеликового типу з довгими квітконіжками. Їхній колір варіюється від білого до рожевого або темно-фіолетового. Квітки зібрані в пазушні кисті. Після цвітіння рослина утворює висячі боби прямого або зігнутого типу. Їхнє забарвлення може бути різним – блідим жовтим або насиченим фіолетовим. У бобах дозріває від двох до восьми насінин (або від трьох до семи). Форма насіння еліптична, колір – однотонний або мозаїчний.

Насіння рослини – джерело рослинного білка, вміст якого сягає 30%. Для квасолі характерний високий рівень вуглеводів — до 50-60%. Також у ній присутні вільні амінокислоти й органічні кислоти, фітостерини, вітаміни групи С, калій, кальцій, магній, фосфор, залізо, мідь, цинк. У плодах міститься кобальт і нікель [9; 10; 14-16].

Рід об'єднує близько 230 видів, з яких тільки 20 обробляють, інші – дикорослі.

Із зерен квасолі можна приготувати безліч страв: супи, соуси, гарніри, чудові консерви тощо. Додавання квасоляної муки при випічці хліба значно підвищує його білковість і поживність. Крім цього, незрілі лопатки квасолі використовують для приготування салатів, других страв, їх маринують і заморожують. Квасоля – дієтичний продукт, її рекомендують при лікуванні хвороб печінки і жовчного міхура, а також гострих інфекційних захворювань центральної нервової системи.

Квасолню продовольчу поділяють на типи за формою і кольором:

- квасоля біла, овальної або подовженої форми,
- квасоля кольорова однотонна (зелена, жовта, коричнева, червона різних відтінків) круглої або овальної форми,
- квасоля кольорова строката (світла або темна).

Квасоля за своїми поживними якостями займає одне з перших місць серед овочевих культур. Вона дає ранню продукцію, багату білками, цукром, вітамінами. У молодих бобах квасолі міститься від восьми до 15 % сухої речовини, яка на  $\frac{1}{3}$  складається з азотистих речовин і на 50-56 % з вуглеводів. Також міститься до 31% високоякісного рослинного

білка, що легко засвоюється, до складу якого входять незамінні амінокислоти лізин – 2-4% і триптофан – 0,1-0,2%; до 3,6% жиру; вітаміни групи А, В (0,5 мг, В2 – 0,2 мг, В3 – 1,2 мг, В6 – 0,9 мг, В9 – 90,0 мкг), РР, Е, вітамін З; фосфор, що сприяє виведенню з організму радіоактивних і токсичних елементів (541,0 мг); мідь, необхідна для процесів кровоутворення і обміну речовин (480,0 мкг); цинк, для зміцнення клітин головного мозку (3210,0 мкг); калій, для зміцнення серцево-судинної системи (1100,0 мг), а також йод (12,1 мкг) [8-13; 19].

Найпопулярніші сорти квасолі цінують за смак, тонку шкірку, яка легко розварюється, й високий вміст білка.

За високий вміст білка (до 26%) та раннє дозрівання відзначено сорти «Зіронька» (рожева), «Первомайська» та «Докучаєвська» (білі «бомбочки»), «Грибівська 92», «Ластівка» «Золотиста», «Подільська кущова», «Харківська штамова», «Рубін», «Мрія господині» [8; 11].

Ластівка – назвою зобов'язана малюнку на плодах, схожому на бардовий ластівчин хвіст на білому тлі. Цінується за посухостійкість, хороший імунітет, невибагливість у догляді. Достатньо швидко вариться, стає м'якою без порушення цілісності оболонки.

**Постановка завдання.** Наше завдання – визначення фізико-механічних властивостей квасолі сорту Ластівка як об'єкта збирання і післязбирального обробітку.

**Виклад основного матеріалу.** Під час проєктування переробних машин, їхніх вузлів та механізмів, необхідно знати фізико-механічні властивості продукції збирання, у нашому випадку зерна квасолі сорту Ластівка [6; 17].

Для вирішення поставлених завдань була розроблена програма експериментальних досліджень, яка передбачала визначення таких фізико-механічних властивостей квасолі сорту Ластівка:

- розмірні показники (*l*-товщина) (рис. 1а);
- маса (*m*) (рис. 1б) [5; 6];
- роботу, що затрачається на руйнування оболонки квасолі (рис. 2) [1; 3];
- модуль пружності.

Для визначення максимального зусилля руйнування зернового матеріалу використовують лабораторну установку (рис. 3 а, б).

Для проведення досліджень здійснювалась вибірка з 40 здорових повноцінних насінин квасолі сорту Ластівка. Дослідження проводили у лабораторних умовах з допомогою перерахованого вимірювального обладнання.

Лабораторна установка для дослідження зусилля стиску зернового матеріалу складається зі столу 4, на якому закріплена пластина 3 (комплект змінних пластини різної жорсткості),

мікрометра 1, індикатора годинникового типу 5 з ціною поділки 0,01 мм.



а) б)  
Рис. 1. Вимірювання розмірних а і масових показників квасолі б  
Fig. 1. Measurement of dimensional a and mass indices of beans b

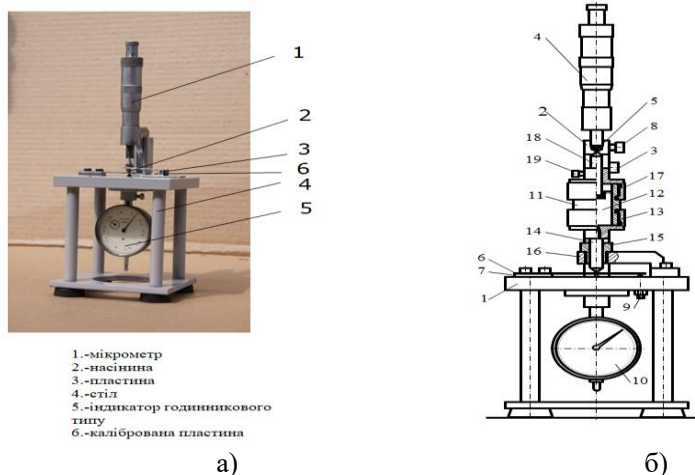


Рис. 2. Процес визначення зусилля руйнування квасолі  
Fig. 2. The process of determining the breaking force of beans

Для визначення максимального зусилля руйнування зернового матеріалу використовуємо лабораторну установку (рис. 3 а, б).

Для проведення досліджень здійснювалась вибірка з 40 здорових повноцінних насінин квасолі сорту Ластівка. Дослідження проводили у лабораторних умовах з допомогою перерахованого вимірювального обладнання.

Лабораторна установка для дослідження зусилля стиску зернового матеріалу складається зі столу 4, на якому закріплена пластина 3 (комплект змінних пластини різної жорсткості), мікрометра 1, індикатора годинникового типу 5 з ціною поділки 0,01 мм.



а) б)  
Рис. 3. Лабораторна установка для визначення зусилля стиску:  
а) загальний вигляд; б) схема пристрою

Fig. 3. Laboratory installation for determining the compression force: a) general view; b) scheme of the device

Розроблений пристрій належить до обладнання для визначення в лабораторних умовах зусилля руйнування зернових матеріалів. Пристрій містить столик 1 зі стійкою 2, верхня частина якої виконана у вигляді вертикальної вилки. В пазу вилки на пальці 3 шарнірно встановлена скоба вимірювальної частини мік-

рометра 4, що контактує з упором 5 й затиснена фіксованом 8.

До столика 1 через проставку 7 прикріплена двоопорна пластинчаста динамометрична балка 6, оберта в конусні вершини гвинтових упорів 9, а під цим столиком встановлений індикатор 10 прогину балки 6.

Пристрій також оснащений стискачем насіння у вигляді порожнистого циліндра 11 з відібраним зразком 12. Знизу на циліндр 11 нагвинчена чашка 13, до якої прикріпленій установлюваний шток 14, розташований у напрямній втулці 15 консолі 16. На верх циліндра 11 нагвинчена кришка 17 з навантажувальним ковзним штоком 18, переміщення якого обмежене фіксатором 19.

Поступово збільшується переміщення штока вимірювальної частини мікрометра 4. Стискається відібраний зразок 12 до моменту руйнування зразка, тобто утворення тріщин, сколів.

Лабораторна установка працює так: дослідний зразок поміщається між мікрометром і пластиною, через мікрометр передаємо зусилля на натисну пластину 3, вона тисне на досліджуваний матеріал 2 і притискає його до каліброваної пластини 6, аж до моменту руйнування зразка (зернини). Прикладене зусилля стиску передається через калібровану пластину 6 на індикатор годинникового типу 5. Під дією навантаження шток індикатора переміщається, відхиляючи стрілку індикатора. Зусилля, що діє на досліджуваний матеріал 2 через калібровану пластину 6 передається штоку мікрометра 10, який переміщається відхиляючи стрілку на його циферблаті. Знаючи ціну поділки мікрометра, можемо визначити зусилля руйнування дослідного зразка.

У процесі випробувань визначаємо максимальне зусилля стиску  $P$ , яке необхідне для руйнування зерна. На основі результату експериментальних досліджень визначаємо максимальне зусилля стиску  $P$ , яке розрахуємо за формулою [3; 4; 6]:

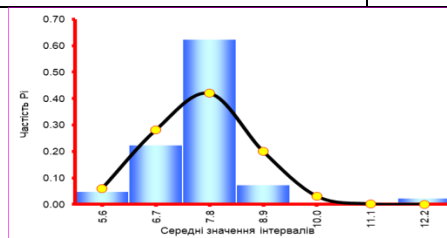
$$P = kn. \quad (1)$$

де  $P$  – максимальне прикладене зусилля до натисної пластини, Н;

**Таблиця 1.** Результати статистичних досліджень за масою плодів квасолі сорту Ластівка

**Table 1.** Results of statistical studies on the weight of beans of the Lastivka variety

Мінімальне значення, г	$Y_{\min}$	0,5
Максимальне значення, г	$Y_{\max}$	1,2
Величина вибірки, шт	$N$	40
Кількість інтервалів	$k$	7
Крок інтервалу, г	$\Delta V$	0,1
Математичне сподівання	$Y_c$	0,920
Серед.-квадр. відхилення	$\sigma$	0,144
Коефіцієнт варіації	$\nu$	0,156



**Рис. 5.** Гістограма розподілу плодів квасолі за товщиною,  $h$  мм  
**Fig. 5.** Histogram of the distribution of bean fruits by thickness,  $h$  mm

$k$  – жорсткість каліброваної пластини, Н/мм;

$n$  – покази індикатора, мм.

Основні механічні характеристики при стисканні можна визначити за такими формулами:

1. Відносний стиск

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2)$$

де  $\Delta l$  – абсолютна деформація насінини, мм;

$l$  – товщина зразка насінини, мм.

2. Нормальне напруження (межа міцності)

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{F}, \quad (3)$$

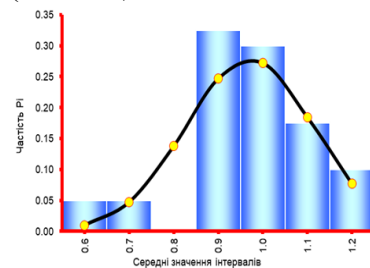
де  $P_{\max}$  – максимальне зусилля руйнування, Н;

$F$  – площа перерізу плунжера, мм<sup>2</sup>.

3. Модуль пружності першого роду

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (4)$$

На основі отриманих експериментальних даних було побудовано гістограми, полігони та криві накопичених дослідних ймовірностей (рис. 4-7) і таблиці результатів досліджень (табл. 1-7).

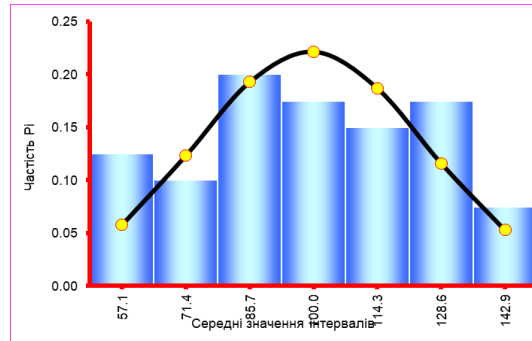


**Рис. 4.** Гістограма розподілу насіння квасолі за масою,  $m$  г

**Fig. 4.** Histogram of the distribution of bean seeds by mass,  $m$  g

**Таблиця 2.** Результати статистичних досліджень за товщиною плодів квасолі сорту Ластівка  
**Table 2.** Results of statistical studies on the thickness of beans of the Lastivka variety

Мінімальне значення, мм	$Y_{\min}$	5
Максимальне значення, мм	$Y_{\max}$	12,8
Величина вибірки, шт	$N$	40
Кількість інтервалів	$k$	7
Крок інтервалу, мм	$\Delta Y$	1,1
Математичне сподівання	$Y_c$	7,619
Серед.-квадр. відхилення	$\sigma$	1,044
Коефіцієнт варіації	$\nu$	0,137

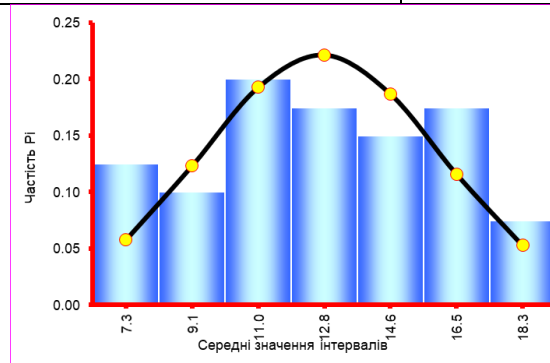


**Рис. 6.** Гістограма розподілу плодів квасолі за зусиллям руйнування,  $PH$   
**Fig. 6.** Histogram of the distribution of bean fruits according to the force of destruction,  $PH$

**Таблиця 3.** Результати статистичних досліджень за зусиллям руйнування плодів квасолі сорту Ластівка

**Table 3.** Results of statistical studies on the effort of destruction of beans of the Lastivka variety

Мінімальне значення, $H$	$Y_{\min}$	50
Максимальне значення, $H$	$Y_{\max}$	150
Величина вибірки, $шт$	$N$	40
Кількість інтервалів	$k$	7
Крок інтервалу, $H$	$\Delta Y$	14,3
Математичне сподівання	$Y_c$	99,286
Серед.-квадр. відхилення	$\sigma$	25,744
Коефіцієнт варіації	$\nu$	0,259

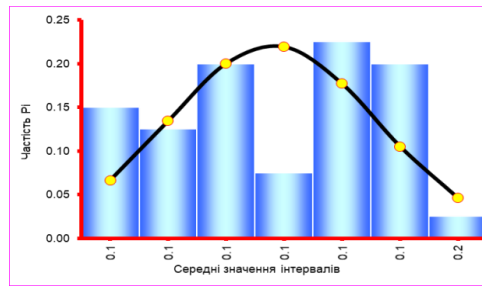


**Рис. 7.** Гістограма розподілу плодів квасолі за нормальним напруженням,  $\sigma MPa$   
**Fig. 7.** Histogram of distribution of bean fruits according to normal stress,  $\sigma MPa$

**Таблиця 4.** Результати статистичних досліджень за нормальним напруженням плодів квасолі сорту Ластівка

**Table 4.** Results of statistical studies on the normal stress of beans of the Lastivka variety

Мінімальне значення, $MPa$	$Y_{\min}$	6,4
Максимальне значення, $MPa$	$Y_{\max}$	19,2
Величина вибірки, шт	$N$	40
Кількість інтервалів	$k$	7
Крок інтервалу, $MPa$	$\Delta Y$	1,8
Математичне сподівання	$Y_c$	12,709
Серед.-квадр. відхилення	$\sigma$	3,295
Коефіцієнт варіації	$\nu$	0,259

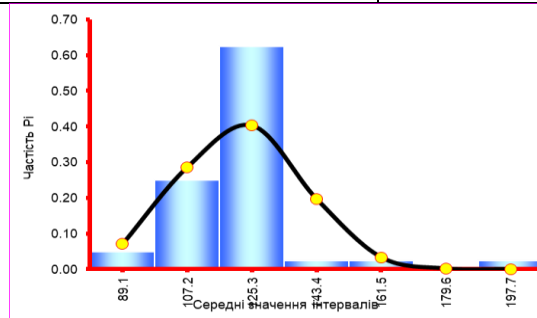


**Рис. 8.** Гістограма розподілу плодів квасолі за відносним стиском,  $\epsilon$   
**Fig. 8.** Histogram of the distribution of bean fruits by relative compression,  $\epsilon$

**Таблиця 5.** Результати статистичних досліджень за відносним стиском плодів квасолі сорту Ластівка

**Table 5.** Results of statistical studies on the relative compression of beans of the Lastivka variety

Мінімальне значення	$Y_{\min}$	0,047
Максимальне значення	$Y_{\max}$	0,17
Величина вибірки, шт	$N$	40
Кількість інтервалів	$k$	7
Крок інтервалу	$\Delta Y$	0,0
Математичне сподівання	$Y_c$	0,105
Серед.-квадр. відхилення	$\sigma$	0,032
Коефіцієнт варіації	$n_{ii}$	0,302



**Рис. 9.** Гістограма розподілу плодів квасолі за модулем пружності,  $E$  МПа  
**Fig. 9.** Histogram of the distribution of bean fruits according to the modulus of elasticity,  $E$  МПа

**Таблиця 6.** Результати статистичних досліджень за модулем пружності плодів квасолі сорту Ластівка

**Table 6.** Results of statistical studies on the modulus of elasticity of beans of the Lastivka variety

Мінімальне значення, МПа	$Y_{\min}$	80
Максимальне значення, МПа	$Y_{\max}$	206,7
Величина вибірки, шт	$N$	40
Кількість інтервалів	$k$	7
Крок інтервалу, МПа	$\Delta Y$	18,1
Математичне сподівання	$Y_c$	122,083
Серед.-квадр. відхилення	$\sigma$	17,589
Коефіцієнт варіації	$n_{ii}$	0,144

**Таблиця 7.** Результати досліджень плодів квасолі сорту Ластівка

**Table 7.** Results of studies of beans of the Lastivka variety

Вид деформації	Площа поперечного перерізу $F$ , мм <sup>2</sup>	Абсолютне скорочення зразка $\Delta$ , мм	Нормальне напруження (граничне) $\sigma$ , МПа	Модуль пружності $E$ , МПа
Стиск	47,8	0,105	19,2	122

**Висновки.** Аналізуючи отримані результати експериментальних досліджень та побудовані на їх основі експериментальні криві, можна дійти таких висновків щодо насіння квасолі сорту Ластівка:

- маса насінин коливається в межах  
 $m_{\min} = 0,5$  г,  $m_{\max} = 1,2$  г,  $m_{\text{ср}} = 0,9$  мм,

$V_{\text{коэф. варіац.}} = 15,6$  %;

- товщина насінин коливається в межах

$h_{\min} = 5$  мм,  $h_{\max} = 12,8$  мм,  $h_{\text{ср}} = 7,6$  мм,

$V_{\text{коэф. варіац.}} = 13,7$  %;

- зусиллям руйнування насіння

$P_{\min} = 50$  Н,  $P_{\max} = 150$  Н,  $P_{\text{ср}} = 99$  Н,

$V_{\text{коэф. варіац.}} = 25,9$  %;

- модуль пружності коливається в межах  $E_{\min} = 50$  МПа,  $E_{\max} = 150$  МПа,  $E_{\text{ср}} = 99$  МПа,  $V_{\text{коэф. варіац.}} = 14,4\%$ .

Отримані результати свідчать, що діапазон коливань значень за розмірно-масовими показниками насіння квасолі сорту Ластівка не суттєвий, а коефіцієнт варіації перебуває в межах 15%. Знаючи середню кількість рослин на одному квадратному метрі, кількість стручків на рослині і кількість зернин у стручку, можна легко розрахувати планову врожайність квасолі.

Зусилля руйнування насіння є досить високим і має значні межі варіації 25,6%, що може негативно впливати на його обробку, очистку, транспортування. Неправильно вибрані режими роботи обладнання можуть спричинити руйнування частини насіння.

Отже, в процесі проєктування сортувальних та калібрувальних машин суттєвих проблем під час розділення плодів квасолі виникати не буде, а от у процесі обробітку такі особливості слід враховувати.

#### Бібліографічний список

1. Хайліс Г.А., Гошко З.О. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: навч. посіб. Луцьк: РВВ ЛДТУ, 1998. 268 с.
2. Царенко О.М., Войтюк Д.Г. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: навч. посіб. Київ: РВВ «Мета», 2003. 441 с.
3. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: практикум / М. В. Бакум та ін. Харків: РВВ ХНТУСГ, 2005. 193 с.
4. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: навч. посіб. / Кобець А. С., Іщенко Т. Д., Волик Б. А., Демидов О. А. Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2009. 84 с.
5. Головченко Г. С., Калнагуз О. М., Сіренко Ю. В. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: конспект лекцій. Суми: РВВ СНАУ, 2012. 59 с.
6. Крупич О.М., Левко С. І., Крупич Р. О. Спосіб визначення об'єму тіл неправильної форми. *Каталог інноваційних розробок*. 2014. № 14. Львів, 2014. С. 63.
7. Подпратов Г.І., Рожко В.І., Скалецька Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. Київ: Аграрна освіта, 2014. 393 с.
8. Силенко С. І. Аналіз сортотразків квасолі звичайної за придатністю до механізованого збирання врожаю. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2010. № 3. С. 68–71.
9. Дупляк О. Т., Бовгира В. А. Використання непрямих ознак та індексів у селекції квасолі звичайної на стабільну продуктивність. *Селекція і насінництво*. 2012. Вип. 102. С. 106–111.
10. Дупляк О. Т., Ганіна О. О. Особливості прояву господарсько-цінних ознак квасолі звичайної в умовах Північного Лісостепу України. *Селекція і насінництво*. 2009. Вип. 97. С. 113–118.
11. Іванюк С. В., Глявин А. В. Оцінка сортотразків квасолі звичайної на основі кореляції кількісних ознак та індексів. *Селекція і насінництво*. 2012. Вип. 101. С. 192–197.
12. Овчарук О. В. Агроекологічна характеристика сортів квасолі звичайної та їх продуктивність в умовах західного Лісостепу. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. Умань, 2014. № 84. С.107–112.
13. Кобизева Л. Н., Безугла О.М., Тертишний О.В. Потенціал зернобобових культур для створення сортів придатних для механізованого збирання. *Селекція і насінництво*. 2012. Вип. 102. С. 10–15.
14. Овчарук О. В. Характеристика сортів квасолі звичайної в умовах Лісостепу Західного. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету*. 2013. Вип. 17 (1) С. 236–239.
15. Оліфірович С. Й. Вивчення сортотразків квасолі звичайної на придатність до механізованого збирання в умовах південної частини Західного Лісостепу. *Збірник наукових праць Селекційно-генетичного ін.* 2015. Вип. 26 (66). С. 148–153.
16. Мазур О. В., Паламарчук В. Д., Роїк М. В., Мазур О. В. Порівняльна оцінка сортотразків квасолі звичайної за зерновою продуктивністю та адаптивністю. *Сільське господарство та лісівництво : збірник наукових праць*. 2016. № 4. С. 143–152.
17. Omae H., Kumar A., Egawa E. and other. Assessing drought tolerance of snap bean (*Phaseolus vulgaris*) from genotypic differences in leaf water relations, shoot growth and photosynthetic parameters. *Plant Production Science*. 2007. Vol. 10. P. 28–35.
18. Omae H., Kumar A., Egawa E. and other. Genotypic differences in plant water status and relationship with reproductive responses in snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) during water stress. *Japanese Journal of Tropical Agriculture*. 2005. Vol. 49. P. 1–7.
19. Vdovenko S. A., Pansyryeva G. V., Palamarchuk, I. I., Lytvyniuk H. V. Symbiotic

potential of snap beans (*Phaseolus vulgaris* L.)  
depending on biological products in agrocoenosis  
of the Right-Bank Forest-steppe of Ukraine.

*Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8, № 3.  
P. 309–314.

*Стаття надійшла 05.03.2024*

УДК 621.791

**ВПЛИВ РЕЖИМІВ MIG-ПАЯННЯ НА ПАРАМЕТРИ ЗВАРНИХ ШВІВ З  
УРАХУВАННЯМ СИНЕРГЕТИЧНОГО ЕФЕКТУ  
РОБОТИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПІВАВТОМАТА**

*Олексій Швець, к. т. н., Сергій Березовецький, к. т. н., Петро Коруняк, к. т. н.,  
Сергій Баранович, к. т. н., Роман Шеремета, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: shvets2882@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.024>

**Швець О., Березовецький С., Коруняк П., Баранович С., Шеремета Р. Вплив режимів MIG-паяння на параметри зварних швів з урахуванням синергетичного ефекту роботи зварювального півавтомата**

У технологічних процесах машинобудування для з'єднання одно- та різнорідних матеріалів усе частіше застосовують метод паяння в інертних газах за допомогою зварювальних півавтоматів. Цей метод ще називають MIG-паяння. Попри всі його переваги, оператори зварювального обладнання не мають чітких рекомендацій щодо вибору режимів роботи обладнання та їх впливу на параметри швів зварних з'єднань.

Дослідження процесу MIG-паяння сталі 09Г2С зварювальним півавтоматом Trans Puls Synergic (TPS) 2700 СМТ від Fronius проводили з використанням спеціального мідно-кремнієвого дроту CuSi3 діаметром 1,2 мм в захисному середовищі чистого аргону з використанням зварювальної колони, призначеної для виконання лінійних зварних швів з метою виявлення особливостей впливу режимів і параметрів технологічного процесу на форму та якість отримуваних з'єднань.

У результаті проведених досліджень встановлено, що процес MIG-паяння сталі за допомогою зварювального півавтомата апаратом Fronius TPS 2700 СМТ має певні особливості налаштування технологічних параметрів на різних режимах його роботи. Синергетика джерела живлення дозволяє задавати основні параметри процесу в певних межах залежно від обраного режиму його роботи.

Найкраща якість MIG-паяння була досягнута при роботі зварювального півавтомата в режимах Synergic та СМТ. Для зварювання листової сталі товщиною 1...3 мм на цих режимах струм зварювання слід задавати в діапазоні 90...160 А при швидкості подачі дроту 3...5 м/хв відповідно. Також встановлено, що зі збільшенням швидкості переміщення пальника ширина шва зменшується, а отже, опуклість шва зростає.

У результаті досліджень сформовані рекомендації щодо налаштування зварювального півавтомата з врахуванням синергетичного ефекту його роботи.

**Ключові слова:** MIG-паяння, зварні шви, параметри процесу, налаштування зварювального півавтомата.

**Shvets O., Berezovetskyi S., Koruniak P., Baranovych S., Sheremeta R. Influence of MIG brazing modes on welding parameters taking into account the synergistic effect of the semi-automatic welding machine**

In the technological processes of mechanical engineering, the method of brazing in inert gas using semi-automatic welding equipment is increasingly used for joining single and dissimilar materials. This method is also known as MIG brazing. Despite all its advantages, there are no clear recommendations for the operators of welding equipment regarding the choice of the operating modes of the equipment and their influence on the welding parameters.

The study of the MIG brazing process of 09Г2С steel with a Trans Puls Synergic (TPS) 2700 SMT semi-automatic welding machine from Fronius was carried out using a special copper-silicon CuSi3 wire with a diameter of 1.2 mm in a protective environment of pure argon with a welding column designed for linear welds, in order to identify the peculiarities of the influence of process modes and parameters on the shape and quality of the resulting joints.

As a result of the research, it was found that the process of MIG brazing of steel using a semi-automatic welding machine with Fronius TPS 2700 СМТ has certain characteristics of setting technological parameters in different operating modes. The synergy of the power supply allows the main process parameters to be set within certain limits, depending on the selected operating mode.

The best MIG brazing quality is achieved when the semi-automatic machine is operated in Synergic and SMT modes. To weld steel sheets with a thickness of 1...3 mm in these modes, the welding current should be set in the range of 90...160 А at a wire feed speed of 3...5 m/min respectively. It was also found that by increasing the speed of the torch movement, the width of the weld decreases, and therefore the weld bulge increases.



As a result of the research, recommendations were made for the construction of a semi-automatic welding machine, taking into account the synergistic effect of its operation.

**Keywords:** MIG brazing, weld seams, process parameters, semi-automatic welding machine settings.

**Постановка проблеми.** У технологічних процесах машинобудівних, монтажних та інших виробництв під час виконання зварювальних робіт усе частіше застосовують метод паяння в інертних газах за допомогою зварювальних напівавтоматів (MIG-паяння). Ця технологія багато в чому подібна до MIG/MAG зварювання, однак відрізняється від нього тим, що під час MIG-паяння не відбувається розплавлення основного матеріалу зварюваних деталей. Процес зварювання відбувається за допомогою суцільного твердого припою на основі міді. Електрична дуга горить між електродним дротом і зварюваним металом. Подача в зону зварювання захисного інертного газу захищає дугу і розплавлений дріт від впливу навколишнього повітря, а особливо від наявного в ньому кисню, який призводить до окиснення розплавленого металу і зниження якості зварювання.

До переваг цього способу можна віднести:

- менше розбрикування металу завдяки його подачі у зварювальну ванну без короткого замикання;
- легшу обробку зварного з'єднання завдяки меншій твердості матеріалу дроту;
- меншу деформацію деталі завдяки зниженню температури зварювання;
- зниження ймовірності пропалювання тонких деталей;
- хороше ущільнення вздовж шва.

Попри всі переваги процесу MIG-паяння та наявність на ринку сучасних зварювальних півавтоматів, які здатні його забезпечувати, зварювальники не мають чітких рекомендацій щодо вибору режимів роботи обладнання та їх впливу на параметри швів зварних з'єднань. Дослідження впливу режимів паяння на параметри зварних швів з врахуванням синергетичного ефекту роботи зварювальних півавтоматів дозволить розробити необхідні рекомендації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для виконання процесу MIG-паяння листової сталі як зварювальний електрод використовують спеціальний мідно-кремнієвий дріт (CuSi3) або бронзовий дріт (CuAl8 і CuSn6) [2; 16]. Температура плавлення таких дротів  $\approx 1060$  °C, що значно нижче за температуру плавлення сталюго дроту при MIG/MAG зварюванні  $\approx 1650$  °C. За таких умов плавиться лише присадковий метал, не розплавляючи при цьому навколишній метал у зоні зварювання. Розплав зварювального дроту формує зварний шов на

поверхні деталі, не проникаючи в основний метал. Завдяки цьому досягають низького тепловкладення та знижується ризик деформації навіть дуже тонких деталей [6; 17]. При цьому міцність з'єднань майже така, як під час зварювання. Для захисту зварювальної ванни і розплавленого дроту рекомендується інертний захисний газ аргон (Ar 100 %) [8; 16; 20].

Дослідженням процесів MIG-паяння присвячено багато праць як вітчизняних, так і закордонних вчених. Зокрема, у праці [11] обґрунтовано можливість заміни контактної точкової зварювання кузовних деталей закритого перерізу. У праці [12] встановлено, що якість процесу MIG-паяння залежить від струму, напруги та технологічної швидкості паяння. Праця [13] присвячена дослідженню впливу чистоти поверхні деталей на якість з'єднань. Авторами встановлено, що стан поверхні деталі впливає на зварне з'єднання. Так, наявність покриття на поверхні деталі може викликати дефекти в зоні зварювання. Воно також впливає на механічні властивості з'єднання.

Окремі праці присвячені дослідженню можливості з'єднання сталі з матеріалами різної міцності методом MIG-паяння. Так, у праці [18] встановлено, що нові процеси з'єднання, такі як лазерне зварювання у вакуумі, MIG-паяння алюмінію зі сталлю або нові технології для з'єднання сталі з пластмасами армованими волокнами спрямовані на створення нових можливостей для виготовлення складних конструкцій. Міцність та працездатність таких з'єднань доведена дослідженнями, викладеними у праці [15]. Її результатами встановлено, що міцність на розрив паяних з'єднань для сталей різного складу майже не відрізняється, а подекуди є вищою, ніж в основного матеріалу.

У працях [4; 5; 21] доведено, що застосування MIG-паяння дозволяє зберегти захисне покриття при з'єднанні оцинкованих деталей. Авторами встановлено, що при дуговому паянні, на відміну від дугового зварювання, захисне покриття не випаровується, а можливе лише розплавлення цинку в прилеглих до шва ділянках за рахунок меншого температурного впливу. Ділянка найбільшого пошкодження покриття при дуговому паянні не перевищує 1 мм. Корозійна стійкість з'єднань оцинкованих деталей, виконаних методом MIG-паяння, є набагато вищою від стійкості зварних з'єднань, а також самі шви є корозійностійкими.

**Постановка завдання.** Проведений аналіз досліджень, присвячених вивченню процесу

MIG-паяння, показав, що незначна їх частина присвячена розробці практичних рекомендацій щодо виконання цього процесу сучасними зварювальними апаратами. Знайдені відомості щодо роботи зварювального обладнання мають загальний характер і не підтверджені експериментальними дослідженнями. Тому метою нашої роботи є дослідження впливу параметрів процесу MIG-паяння конструкційної сталі з врахуванням синергетичного ефекту роботи зварювального півавтомата.

**Виклад основного матеріалу.** Для виконання поставленого в роботі завдання на першому етапі проводили наплавлення валиків спеціальним мідно-кремнієвим дротом CuSi3 діаметром 1,2 мм. Наплавлення здійснювали на пластині товщиною 6 мм зі сталі 09Г2С.

Для експериментальних досліджень використовували зварювальний півавтомат Trans Puls Synergic (TPS) 2700 CMT інверторного типу фірми Fronius з мікропроцесорним керуванням та вбудованим 4-роликівим механізмом подачі зварювального дроту. Апарат був оснащений пальником Fronius PullMig з додатковим механізмом подачі дроту. З основним механізмом подачі дроту він з'єднаний шланговим пакетом Pull Mig Job Master з демпферним пристроєм. Зварювання виконували в захисному середовищі чистого аргону (Ar 100 %) в автоматичному режимі за допомогою зварювальної колони APS, призначеної для лінійного переміщення пальника зварювального автомата відносно зони зварювання (виконання лінійних зварних швів) [8–10].



**Рис. 1.** Установка для автоматичного зварювання:

a – загальний вигляд; b – панель керування зварювальної колони; c – панель керування джерела струму

**Fig. 1.** Automatic welding unit:

a – general view; b – welding column control panel; c – control panel of power source

У процесі досліджень валики наплавляли в чотирьох різних режимах роботи джерела живлення: Standard – стандартний; Synergic – синергетичний; Pulse Synergic – пульсуючий синергетичний; Cold Metal Transfer – холодне перенесення металу [9; 20]. Джерело живлення

було налаштоване на струм зварювання  $I_{зв} = 155$  А, а швидкість зварювання (швидкість переміщення пальника) забезпечувалась зварювальною колоною на рівні  $V_{зв} = 2,5$  м/хв. Загальний вигляд отриманих наплавлених валиків наведено на рис. 2.



**Рис. 2.** Наплавлені валики методом MIG-паяння в режимах:

CMT – Cold Metal Transfer; PS – Pulse Synergic; S – Synergic; St – Standard

**Fig. 2.** Welded rollers by MIG brazing in the modes:

CMT – Cold Metal Transfer; PS – Pulse Synergic; S – Synergic; St – Standard

Як бачимо (рис. 3), найкраща якість формування зварного валика отримана під час зварювання в режимі «Synergic». Дуга горіла стабільно без розбризкування розплавленого металу електродного дроту. При напавленні валиків у режимах CMT і Pulse Synergic спостерігалось

незначне розбризкування розплавленого металу та несплавлення валиків з основним матеріалом. Найгірша якість валиків була при MIG-паянні в режимі Standard. Дуга горіла нестабільно з обривами, метал розбризкувався, шов був нерівномірний з підрізами та місцями не сплавлявся

з основним металом.

Джерело живлення TPS 2700 CMT, як і більшість сучасних зварювальних півавтоматів, здатне забезпечувати ефект синергетичного керування. Цей ефект (синергетика) ґрунтується на використанні мікропроцесорних систем (мікроконтролерів) для вибору та забезпечення оптимальних величин, параметрів імпульсів і виду зварювального струму з урахуванням марки, товщини та властивостей металу виробу, а також особливостей зварювальних матеріалів: діаметра та марки дроту, виду та складу захисного газу тощо. Синергетика дозволяє користувачу змінювати всі налаштування зварювального апарата, змінюючи лише один з пара-

метрів процесу зварювання. Якщо, наприклад, змінити на апараті товщину зварюваних деталей, це спричинить зміну зварювального струму та напруги, швидкості подачі дроту і вплине на індуктивність дуги та кількість імпульсів у ланцюзі змінного струму [1; 3].

Другий етап досліджень полягав у визначенні впливу синергетики на параметри процесу MIG-паяння. У налаштуваннях джерела живлення задавалась постійна товщина зварюваної деталі та визначали значення струму зварювання  $I_{зв}$ , швидкості подачі дроту  $V_d$  та напруги зварювання  $U_{зв}$  на різних режимах роботи півавтомата. Отримані результати досліджень наведені в табл. 1.

**Таблиця 1.** Параметри процесу MIG-паяння металу товщиною 3 мм на різних режимах роботи зварювального півавтомата TPS 2700 CMT

**Table 1.** Parameters of the MIG brazing process for 3 mm thick metal in different operating modes of the TPS 2700 CMT semi-automatic welding machine

Режим MIG-паяння	Товщина деталі $\delta$ , мм	Швидкість зварювання $V_{зв}$ , м/хв	Струм зварювання $I_{зв}$ , А	Швидкість подачі дроту $V_d$ , м/хв	Напруга зварювання $U_{зв}$ , В
Synergic	3	2,5	158	5,0	14,7
Pulse Synergic			89	2,9	19,6
Cold Metal Transfer			225	9,6	20,5
Standard*			-	0-22	17,5

\* Для режиму Standard джерело живлення Fronius TPS 2700 CMT відображає поточні значення зварювального струму та швидкості подачі дроту під час запалювання і горіння дуги

У результаті досліджень встановлено, що, задаючи постійне значення товщини зварюваних деталей на різних режимах роботи, мікропроцесорна система джерела живлення TPS 2700 CMT задає різні значення інших параметрів процесу зварювання. За сталої швидкості зварювання це призводить до отримання звар-

них швів з різними геометричними параметрами (табл. 2).


Розміри наплавлених валиків вимірювали електронним штангенциркулем з точністю до 0,01 мм (рис. 3). Середні значення результатів вимірювання наведені в табл. 2.



**Рис. 3.** Вимірювання розмірів зварного шва  
**Fig. 3.** Measuring of weld dimensions

**Таблиця 2.** Параметри зварних валиків, отриманих методом MIG-паяння металу товщиною 3 мм на різних режимах роботи зварювального півавтомата TPS 2700 CMT

**Table 2.** Parameters of welded rolls produced by MIG brazing of 3 mm thick metal in different operating modes of the semi-automatic welding machine TPS 2700 CMT

Режим MIG-паяння	$q$ , мм	$e$ , мм	Вигляд шва
Synergic	1,58	6,34	
Pulse Synergic	2,21	8,28	
Cold Metal Transfer	2,27	12,88	
Standard	2,38	9,93	

У результаті досліджень встановлено, що синергетичний ефект керування працює тільки в межах обраного режиму. При постійній товщині деталей на різних режимах зварювання необхідно додатково коригувати параметри струму, подачі дроту та швидкості зварювання.

**Таблиця 3.** Параметри процесу MIG-паяння зварювальним півавтоматом TPS 2700 CMT

**Table 3.** Process parameters for MIG brazing with the TPS 2700 CMT semi-automatic welding machine

Режим MIG-паяння	Товщина деталі $\delta$ , мм		Струм зварювання $I_{зв}$ , А		Швидкість подачі дроту $V_d$ , м/хв		Напругазварювання $U_{зв}$ , В	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Synergic	0,8	5,3	58	270	2,0	8,9	12,4	25,2
Pulse Synergic	0,6	5,9	17	270	1,0	10,2	15,8	25,8
Cold Metal Transfer	0,6	2,9	23	225	0,8	9,6	6,5	20,5
Standard**	-	-	-	-	0,5	22	17,2	

\*\* У режимі Standard для джерела живлення Fronius TPS 2700 CMT можна регулювати тільки швидкість подачі дроту. Інші параметри можна визначити тільки під час горіння дуги

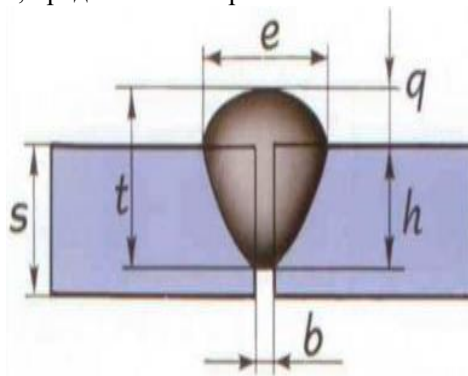
Оскільки одним з основних завдань технологічного процесу зварювання є отримання зварних з'єднань необхідної якості, яка характеризується властивостями металу шва та деталей у пришовній зоні, а також їх геометричними параметрами, то одними з основних характеристик зварного шва, які визначаються його геометричними параметрами, є коефіцієнт форми шва  $K_\phi = e/t$  та коефіцієнт опуклості шва  $K_o = e/q$  (рис. 4).

За допомогою зміни параметрів процесу зварювання (наприклад, полярності) можна забезпечити зменшення ширини шва зі збільшенням глибини проплавлення і навпаки. У першому випадку це призведе до зменшення коефіцієнтів форми та опуклості, а в іншому – до їх збільшення.

Збільшення сили струму призводить до зростання глибини проплавлення  $h$  і зменшення підсилення шва  $q$ . У результаті це забезпечує зниження коефіцієнта форми  $K_\phi$  та коефіцієнта опуклості шва  $K_o$ . Регулюванням величини зварювального струму змінюють глибину проплавлення основного металу. Вища швидкість зварювання дає меншу ширину шва, що, своєю чергою, призводить до зменшення коефіцієнта форми та збільшення коефіцієнта опуклості.

Як уже згадувалося раніше, у процесі MIG-паяння температура плавлення дроту зна-

чно менша від температури плавлення деталі. Матеріал зварюваних деталей не розплавляється, а розплав електрода лягає зверху, не змішуючись з ним. Зразки поперечних перерізів зварних швів сталі, виконаних методом MIG-паяння, представлені на рис. 5.

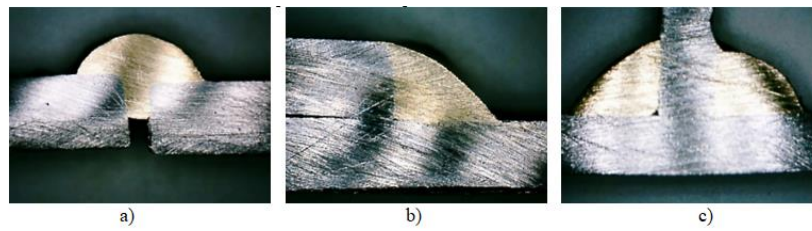


**Рис. 4.** Геометричні параметри стикового зварного шва:

$b$  – зазор в стику;  $s$  – товщина деталі;  $e$  – ширина шва;  
 $t$  – товщина шва;  $h$  – глибина проплавлення;  $q$  – підсилення шва

**Fig. 4.** Geometric parameters of the butt weld  
 $b$  – joint gap;  $s$  – part thickness;  $e$  – weld width;  $t$  – weld thickness;

$h$  – penetration depth;  $q$  – weld reinforcement



**Рис. 5.** Поперечні перерізи зварних швів:  
а – стиковий; б – напускний; с – тавровий  
**Fig. 5.** Cross sections of welds:  
a – butt weld; b – overlap weld; c – tack weld

Як бачимо, метал розплавленого електродного дроту формує шов, не змішуючись з основним металом деталі. Оскільки основний метал не досягає температури плавлення, то його структура та властивості не змінюються, а ризик пропалювання тонкого листового матеріалу зменшується. Крім того, за відсутності змішування металів електрода і деталі під час зварювання деталей встик без зазору з аналізу геометричних параметрів шва можна виключити глибину проплавлення  $h$ , а товщина шва  $t$  буде рівна величині його підсилення  $q$  ( $t = q$ ).

При порівнянні режимів MIG-паяння чітко видно, що в режимах Synergic та СМТ зварювані валики шва є більш однорідними і рівномірними без слідів розбризкування.

Аналіз розмірів наплавлених валиків (див. рис. 2, 3), виконаних на різних режимах, показав, що підсилення шва  $q$  для режиму СМТ суттєво збільшується порівняно з іншими режимами на нижчих струмах зварювання. Також аналіз показав, що зі збільшенням струму зварювання ширина шва збільшується. Характер зміни цієї величини однаковий для всіх режимів MIG-паяння. Аналогічна залежність спостерігається і для швидкості зварювання. Зі зростанням швидкості переміщення пальника ширина шва зменшується. Однак для забезпечення рівномірності поверхні шва та зниження розбризкування для режимів СМТ і Standard швидкість зварювання має бути в 1,5-2 рази вищою, ніж для режимів Pulse Synergic і Synergic за тих же параметрів процесу.

Окремими дослідженнями міцності швів, виконаних методом MIG-паяння, на розрив встановлено, що максимальне навантаження, яке може витримувати такий шов, всього на 10...12 % нижче від міцності аналогічних швів, виконаних звичайним MIG-зварюванням.

### Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що процес MIG-паяння сталі за допомогою зварювального півавтомата апаратом Fronius TPS 2700 СМТ має певні особливості налаштування технологічних параметрів на різ-

них режимах його роботи. Синергетика джерела живлення дозволяє задавати основні параметри процесу в таких межах:

- товщина зварюваних деталей – 0,6...6 мм;
- струм зварювання – 17...270 А;
- напруга зварювання – 6,5...25,8 В;
- швидкість подачі дроту – 0,5...22 м/хв.

Найкраща якість MIG-паяння досягається за роботи зварювального півавтомата в режимах Synergic та СМТ. Для зварювання листової сталі товщиною 1...3 мм на цих режимах струм зварювання слід задавати в діапазоні 90...160 А при швидкості подачі дроту 3...5 м/хв відповідно.

На геометричні параметри швів також впливає швидкість зварювання. Зі збільшенням швидкості переміщення пальника ширина шва зменшується, а отже, опуклість шва зростає. Тому для отримання методом MIG-паяння з'єднань необхідної якості слід забезпечувати сталу швидкість зварювання.

### Бібліографічний список

1. Гуменюк І. В., Іваськів О. В., Гуменюк О. В. Технологія електродугового зварювання: підручник. Київ: Грамота, 2006. 512 с.
2. ДСТУ EN ISO 14171:2015. Зварювальні матеріали. Дроти електродні суцільні й порошкові та комбінації дрот електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом нелегованих та дрібнозернистих сталей. Класифікація (ENISO 14171:2010, IDT; ISO 14171:2010, IDT). URL: <http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id> (дата звернення: 03.05.2024).
3. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання: навч. посіб. Миколаїв: УДМУ, 2003. 437 с.
4. Максимова С. В., Зволінський І. В., Юрків В. В. Геометричні параметри паяного шва та його структура при плазмовому паянні оцинкованої сталі. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 6. С. 35-39. doi: 10.37434/as2020.06.06.
5. Максимова С. В., Зволінський І. В., Юрків В. В. Геометричні параметри паяного шва та його

структура при плазмовому паянні оцинкованої сталі. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 6. С. 35-39. doi: 10.37434/as2020.06.06.

6. Матвієнків О. М. Збереження захисного покриття при з'єднанні оцинкованих труб дуговим паянням. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 4. С. 7-14. URL: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/4149> (дата звернення: 03.05.2024).

7. Матвієнків О. М. Напружено-деформований стан MIG-паяних з'єднань оцинкованих труб. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2023. № 1(54). С. 23–30. doi: 10.31471/1993-9965-2023-1(54)-23-30.

8. Особливості прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталі SUS304 з використанням випромінювання дискового лазера / В. Ю. Хаскін, В. М. Коржик, А. В. Бернацький, А. М. Войтенко, Є. В. Ілляшенко, Д. Саї. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 4. С. 29-33. doi: 10.37434/as2020.04.04.

9. Швець О. П., Березовецький С. А., Коруняк П. С. Вплив параметрів режиму MIG-пайки на формування зварного шва. *Perspectives of contemporary science: theory and practice: proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua"*. Lviv, 2024. P. 341-344. URL: <https://sci-conf.com.ua/> (дата звернення: 03.05.2024).

10. Швець О. П. Автоматизовані технології зварювання та різки металів: метод. рекомендації до виконання практичних робіт студентами ОС «Бакалавр» інженерних спеціальностей. Львів: ЛНУП, 2024. 48 с.

11. Швець О. П. Технології та обладнання зварювання металів і пластмас: метод. рекомендації до виконання практичної роботи на тему «Вивчення конструкції та органів керування зварювального апарата Trans Puls Synergic 2700 CMT» студентами ОС «Бакалавр» спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія», 274 «Автомобільний транспорт», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Львів: ЛНУП, 2023. 15 с.

12. Arc welding technology for automotive steel sheets/ S. Kodama, S. Furusako, M. Yasunobu, Y. Ishida, M. Saito, T. Nose. *Nippon steel technical report*. May 2013. No. 103. P. 83-90.

13. Berczeli M., Weltsch Z. Experimental Studies of Different Strength Steels

MIG Brazed Joints. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2018. № 46(2). P. 63-68. doi: 10.3311/PPtr.11565.

14. Cemil Çetinkaya, Ali Akay, Uğur Arabacı, Uğur Özdemir. Effect of shop-primer coating on S235JR steel on MAG weldability. *Advances in materials science*. June 2022. Vol. 22, No. 2 (72). P. 49-63. doi: 10.2478/adms-2022-0007.

15. Chovet, C., Guiheux, S. Possibilities offered by MIG and TIG brazing of galvanized ultra-high strength steel for automotive applications. *La metallurgia Italiana*. 2006. № 7-8. P. 47-53.

16. Miklós Berczeli, Zoltán Weltsch. Experimental studies of different strength steels MIG brazed joints. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2018. № 46(2). P. 63-68. doi: 10.3311/PPtr.11565/.

17. MIG/MAG: навч. док. URL: [https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Training%20Documents/PW\\_TD\\_MIG\\_MAG\\_RU.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Training%20Documents/PW_TD_MIG_MAG_RU.pdf) (дата звернення: 03.05.2024).

18. Muthuraju K., Abburi Lakshman Kumar. Experimental studies of different thick steel sheets and variable clearance in MIG brazing. *Materials Science and Engineering 912 (2020) 032078 IOP Publishing*. doi: 10.1088/1757-899X/912/3/032078.

19. Reisgen U., Stein L. Joining of steel and dissimilar material joints with highest strength – there are other ways than conventional welding. *Автоматичне зварювання*. 2019. №2. С. 30-35. doi: 10.15407/as2019.02.04.

20. Seungmin Shin, Sehun Rhee. Porosity characteristics and effect on tensile shear strength of high-strength galvanized steel sheets after the gas metal arc welding process. *Metals*. 2018. № 8. P.1077. doi: 10.3390/met8121077.

21. Trans Synergic 4000/5000 Trans Puls Synergic 2700 Trans Puls Synergic 3200/4000/5000 TIME 5000 Digital CMT 4000 Advanced. Джерела струму MIG/MAG: інструкція з експлуатації. URL: [https://www.fronius.com/~downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%2C0114%2CRU.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%2C0114%2CRU.pdf) (дата звернення: 03.05.2024).

22. Vinas J., Kascak L., Abel M. Mig brazed hot-dip galvanized sheets. *Lebanese Science Journal*. 2010. Vol. 11, issue 2. P. 75-85.

Стаття надійшла 13.05.2024

УДК 621.374

## МЕТОДИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ ТОКАРНИХ ОПЕРАЦІЙ

*Сергій Баранович, к.т.н., Роман Шеремета, к.т.н., Олексій Швець, к.т.н., Сергій Коробка, к.т.н., Сергій Сиротюк, к.т.н.*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: baranovich1977@ukr.net; romansheremeta@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.031>

**Баранович С., Шеремета Р., Швець О., Коробка С., Сиротюк С. Методичний комплекс для визначення сили різання під час виконання токарних операцій**

У праці запропоновано методичний комплекс для визначення сили різання під час виконання токарних операцій, оскільки зменшення споживання енергії під час механічної обробки металів є важливим технологічним елементом для оптимального виробництва. Споживання енергії може бути визначене за допомогою прямого або непрямого вимірювання. Щоб мінімізувати витрати часу на вимірювання сили різання, під час механічної обробки, а також інших технологічних параметрів можна застосувати методи комп'ютерного вимірювання і моделювання. Таке вимірювання і визначення необхідних технологічних параметрів механічної обробки металів можна реалізувати використанням віртуальних засобів у програмному середовищі LabVIEW виробництва National Instruments. Це програмне забезпечення має декілька переваг, зокрема: використовується візуальна мова програмування; зручний та інформативний інтерфейс для користувача; можливість використання зовнішніх пристроїв введення/виведення даних у реальному часі; має потужні засоби візуалізації даних, що дозволяє відображати дані у вигляді графіків, діаграм, таблиць; підтримує різні операційні системи, такі як Windows, macOS, Linux, що дозволяє використовувати його на різних пристроях тощо. Тому для визначення технологічних параметрів токарної механічної обробки пропонується застосовувати це програмне середовище. Вимірювання основної складової сили різання можна здійснити за допомогою безперервного потоку вхідних даних з використанням динамометра кручення ДК1, оснащеного програмно-апаратним комплексом для отримання цифрового сигналу вимірювальних величин, а інші складові визначити аналітичним методом за допомогою програмного середовища LabVIEW. Цей метод вимірювання дає змогу проводити дослідження в широкому діапазоні вимірюваних технологічних параметрів механічної обробки металів на токарно-гвинторізних верстатах у режимі реального часу, візуалізувати та аналізувати вимірювані параметри на ПК.

**Ключові слова:** токарно-гвинторізний верстат, сила різання, середовище LabVIEW, методичний комплекс вимірювання, прикладне програмне забезпечення.

**Baranovych S., Sheremeta R., Shvets O., Korobka S., Syrotiuk S. Methodological complex for determining cutting force during turning operations**

The work presents a comprehensive methodology for determining cutting force during turning operations. Reducing energy consumption in mechanical metal processing is crucial for optimizing production. Energy consumption can be measured directly or indirectly. To minimize the time spent measuring cutting force and other technological parameters, computer-based measurement and modeling methods can be employed. This assessment of necessary technological parameters in mechanical metal processing can be facilitated using virtual tools in the LabVIEW software environment developed by National Instruments. This software offers several advantages: it utilizes a visual programming language, features an intuitive user interface, allows for real-time use of external input/output devices, and provides robust data visualization tools that can display data in graphs, diagrams, and tables. Additionally, it supports various operating systems, including Windows, macOS, and Linux, making it versatile for use on different devices. The LabVIEW environment is thus proposed for determining the technological parameters of turning operations. The primary component of cutting force can be established by continuously inputting data from a torque dynamometer (DK1) that includes a hardware-software system for obtaining a digital signal of the measured quantities. Other components of cutting force can be estimated using analytical methods within the LabVIEW software. This approach enables research across a wide range of technological parameters in mechanical metal processing on turning-milling machines, while allowing for real-time visualization and analysis of the measured parameters on a PC.

**Keywords:** turning-milling machine, cutting force, LabVIEW environment, methodological measurement complex, application software.

**Постановка проблеми.** Вивчення технологічних параметрів процесу обробки металів різанням у режимі реального часу зіштовхується з проблемою їх отримання і обробки, що

вимагає розробки спеціальних алгоритмів для усунення стохастичного впливу одержуваних сигналів та знижує достовірність отриманих результатів. Застосування методичного

комплексу з використанням комп'ютерного моделювання дозволяє суттєво спростити та знизити час отримання відповідних вимірюваних і розрахункових даних. Комп'ютерне моделювання є потужним інструментом дослідника, оскільки дає змогу в емпіричній формі представити основні функціональні властивості досліджуваного об'єкта, а також за допомогою введення додаткових елементів досліджувати їх вплив на основні технологічні показники токарної обробки або експлуатацію токарно-гвинторізного верстата. Визначення сили різання під час токарної обробки особливо потребує комп'ютерного вимірювання, оскільки на технологічні параметри роботи токарно-гвинторізного верстата впливає значна кількість чинників.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд літературних джерел підтвердив значний інтерес дослідників до теми визначення технологічних параметрів під час процесу обробки заготовок або деталей різанням. Дослідження характеру зміни технологічних параметрів від впливу чинників, які задаються в процесі обробки, є важливим для пошуку раціональних алгоритмів вибору цих параметрів для виготовлення деталей.

У працях [1; 6–10; 12; 15] розглянуто методичні засади та обладнання для визначення сили різання під час технологічних операцій токарної обробки.

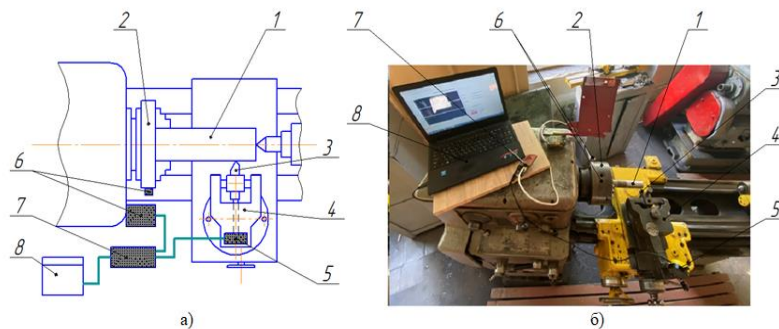
Для вимірювання параметрів і випробування різних дослідних установок застосовують програмний комплекс *LabVIEW* [2; 14; 16], який може використовуватися також для дослідження технологічних операцій. Цей комплекс може бути доповнений інструментарієм *Fuzzy-Logic*

[3] для подальшої оптимізації технологічних процесів.

**Постановка завдання.** Для дослідження сил різання під час поздовжнього токарного оброблення та отримання індикаторних діаграм їх зміни в часі доцільно розробити апаратно-програмний комплекс, який дасть змогу відображати та реєструвати миттєві значення та зміни сил різання за попередньо заданих режимів роботи токарного верстата, таких як подача, глибина та швидкість різання, й виконувати обробку результатів у реальному часі. Крім того, оперативність математичної обробки отриманих даних спростить і прискорить дослідження та визначення сили різання.

Відповідно до програми досліджень сили різання під час поздовжнього токарного оброблення, верстат з обладнанням, за допомогою якого проводяться дослідження, повинен задовольняти такі вимоги щодо апаратного складу, а саме стосовно наявності: токарного верстата, що дозволяє змінювати технологічні параметри обробки заготовки; засобів для стеження та передачі інформації електричними сигналами для реєстрації поточного значення показів індикатора та давача обертів; комплекту приладів для реєстрації вимірюваних параметрів; контрольно-вимірювальних пристроїв для реєстрації вимірюваних параметрів.

**Виклад основного матеріалу.** Для проведення експериментальних досліджень як основу було використано токарно-гвинторізний верстат 1Б61А з доукомплектуванням деякими необхідними технічними засобами. Схема стенда наведена на рис. 1, а, загальний вигляд – на рис. 1, б.



**Рис. 1.** Стенд для дослідження сили різання на токарно-гвинторізному верстаті: а – схема стенда; б – загальний вигляд стенда; 1 – заготовка для токарного обробітку; 2 – трикулачковий самоцентрувальний патрон; 3 – токарний різець; 4 – динамометр кручення ДК1; 5 – індикатор з цифровим відліковим пристроєм; 6 – давач обертів; 7 – плата Arduino Mega 2560; 8 – ПК

**Fig. 1.** Bench for researching the cutting force on a lathe and screw-cutting machine: а – diagram of the bench; б – general view of the stand; 1 – workpiece for turning; 2 – three-jaw self-centering cartridge; 3 – turning cutter; 4 – torsion dynamometer DK1; 5 – indicator with a digital counter; 6 – speed encoder; 7 – Arduino Mega 2560 board; 8 – PC



Стенд включає заготовку для токарного обробітку 1, яка закріплена в трикулачковому самоцентрувальному патроні 2, різець токарний 3 встановлено на динамометр кручення ДК1 4, який через систему торсіонів та важелів передає переміщення на вимірювальний штифт, в який впирається наконечник індикатора з цифровим відліковим пристроєм 5. Для вимірювання частоти обертання трикулачкового самоцентрувального патрона, в який встановлено заготовку, передбачено давач обертів 6.

Індикатор з цифровим відліковим пристроєм обладнано засобами для можливості отримання сигналу в електричному вигляді.

Реєстрація сигналів здійснюється за допомогою давачів та плати Arduino Mega 2560, яка програмується за допомогою середовища розробки Arduino IDE, яке підтримує мову програмування C і C++, а відтворення здійснюється на ПК в програмному середовищі LabVIEW з широким діапазоном налаштування сигналу. Для вимірювання переміщення проміжного стрижня демпферного пристрою використано індикатор з цифровим відліковим пристроєм типу ИЧЦ(5)-13-0,01-IP65 класу точності 1.

Вирішення завдання щодо підключення нестандартних приладів до ПК індивідуальне для кожного випадку, але можна виділити низку загальних підходів [11]. Передусім ПК має бути оснащений пристроєм введення/виведення аналого-цифрової інформації. Підключення вимірювального приладу до ПК може реалізуватися такими пристроями: плата (DAQ-плата) промислового виготовлення, що вставляється в слот ПК, або модулі віддаленого введення/виведення (наприклад, серії I – 7000 фірм ICP DAS або ADAM – 5000 фірм Advantech). Автоматизована вимірювальна система може бути побудована на основі послідовного інтерфейсу (наприклад, RS - 485).

Для розробки програмного забезпечення зупинились на використанні алгоритмічної мови графічного програмування в середовищі LabVIEW [13], яка має низку переваг: простота освоєння для непрофесійних програмістів і висока швидкість створення програм; наявність широкого спектра отримання, обробки, зберігання і візуалізації вимірюваної інформації; можливість роботи з драйверами різних пристроїв, розроблених у вигляді бібліотек DLL, що динамічно підключаються, а також використання елементів ActiveX; підтримка стандартних інтерфейсів ПК і можливість простого введення-виведення цифрових даних через порти (аналогічно функціям мови програмування C *inport* і *outport*).

Крім того, пряма робота з портами DAQ-плат у Windows при виконанні поодиноких ввідів/виводів інформації вимагає значно менших затрат часу порівняно з використанням функцій DLL.

Для визначення прогину балки динамометра кручення використано цифровий індикатор МІКРОТЕХ ИЧЦ-13 (рис. 2) з діапазоном вимірювання 0-13 мм та дискретністю 0,01 мм [4]. Для виведення даних цифровий індикатор оснащений роз'ємом micro-USB. Цифровий індикатор пройшов метрологічний контроль в акредитованій за ISO 17025 метрологічній лабораторії.



**Рис. 2.** Цифровий індикатор МІКРОТЕХ ИЧЦ-13  
**Fig. 2.** Digital Indicator MICROTTECH ICHC-13

Під'єднання до роз'єму micro-USB цифрового індикатора дозволило зчитувати виміряне ним значення з періодичністю 140 мс. Індикатор живиться від батареї CR2032 напругою 3,3 В. Але протокол передачі даних, нестандартна схема під'єднання до роз'єму micro-USB та напруга сигналів, яка становить 1,5 В, не дозволяє зчитати сигнал штатними засобами ПК.

Щоб виміряти оберти трикулачкового самоцентрувального патрона, було використано давач КУ-033, який є оптичним модулем для виявлення білих або чорних ліній. Основою цього модуля є оптопара TCRT5000, що містить у собі інфрачервоний світлодіод та фототранзистор. Встановивши світлу мітку на шківі та розмістивши давач КУ-033 прямо перед нею, можна вимірювати час, необхідний для виконання двигуном одного повного оберту.

Для комутації сигналів від давачів до програми, створеної у середовищі LabVIEW, використано електронну платформу прототипування з відкритим кодом – Arduino, а саме плату Arduino Mega 2560 на базі 8-бітного AVR мікроконтролера ATmega2560 з тактовою частотою 16 МГц [5]. На платі знаходиться 16 аналогових, а також 54 цифрових входів/виходів (з яких 15 можуть використовуватися як ШІМ-виходи).

Введення/виведення сигналів до програмної частини вимірювального комплексу на ПК здійснюється через послідовний порт (UART).

Програмна частина вимірювального комплексу являє собою програмне середовище *LabVIEW* з алгоритмічною мовою графічного програмування.

Програма дає змогу створити екранний інтерфейс віртуального осцилографа (рис. 3)

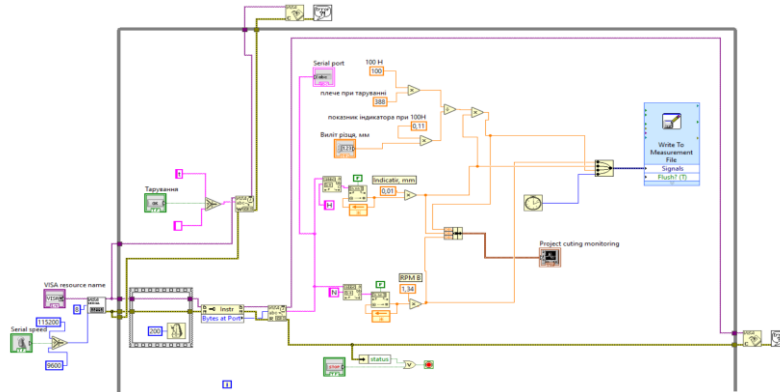


**Рис. 3.** Робоче вікно експериментального дослідження сили різання з використанням екранного інтерфейсу віртуального осцилографа

**Fig. 3.** Working window of the experimental study of cutting force using the screen interface of a virtual oscilloscope

Функціональні взаємозв'язки між елементами і панель блок-діаграми віртуального осцилографа подано на рис. 4. Кожних 200 мс здійснюється зчитування вхідних даних у вигляді рядка та розділяється на значення індикатора та частоту обертання трикулачкового патрона,

які домножуються на перевідні коефіцієнти. З використанням даних тарування визначається сила різання, виміряні значення виводяться на робоче вікно, а також для подальшого аналізу зберігаються в табличному вигляді у форматі Excel.



**Рис. 4.** Фрагмент панелі блок-діаграми функціонального взаємозв'язку між елементами вимірювальної системи

**Fig. 4.** Fragment of the block diagram panel illustrating the functional interconnection between elements of the measurement system

Попередньо проводили тарування динамометра, а оскільки при встановленні різних різців, вони будуть мати різний виліт різця від середньої лінії торсіонних брусків, то передбачено поле для введення цього значення у робочому вікні програмного комплексу.

Стенд для дослідження сили різання на токарно-гвинторізному верстаті із застосуванням програмного комплексу *LabVIEW* фірми *National Instruments* дозволяє відобразити, записати та проаналізувати миттєві значення вимірних параметрів та їх взаємозалежність у реальному масштабі часу.

### Висновки

Розроблений методичний комплекс для визначення сил різання під час виконання

токарних операцій у середовищі *LabVIEW* може використовуватися як інструмент дослідження широкого діапазону технологічних параметрів.

Результати дослідження за допомогою методичного комплексу відображають характеристику технологічного процесу за різних значень змінних впливових чинників у реальному режимі часу.

Цей методичний комплекс із застосуванням середовища *LabVIEW* може застосовуватися для визначення потужностей, які затрачуються під час різання, для оптимального завантаження токарних верстатів на виробництві під час виконання відповідних технологічних операцій.

**Бібліографічний список**

1. Майданюк С. В., Плівак О. А. Модуль вимірювання сил різання. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*. 2016. № 2 (77). С. 15-22.
2. Моделирование фотоэлектричной панели в среде LabVIEW / В. Боярчук та ін. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 26. С. 71-76. doi: 10.31734/agroengineering2022.26.071.
3. Сиротюк С., Сиротюк В., Гальчак В. Fuzzy-Logic контроллер управления режимами работы ветро-электрической установки. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery*. 2015. Vol. 17, No 4. P. 39-46.
4. Цифровий індикатор МІКРОТЕХ ІЧЦ-13. URL: [https://microtech-ua.com/index.php?id\\_product=11763&controller=product&id\\_lang=2](https://microtech-ua.com/index.php?id_product=11763&controller=product&id_lang=2) (дата звернення: 29.04.2024).
5. Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/> (Last accessed: 29.04.2024).
6. Chen W. Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2000. 40. P. 455-466.
7. Cutting force excursion in turning / E. Kushnir, T. Portman, V. A. Aguilar, W. Clark. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 118. P. 495-500. doi: 10.1016/j.procir.2023.06.085
8. Cutting forces during turning with variable depth of cut / M. Sadílek, J. Dubský, Z. Sadílková, Z. Poruba. *Perspectives in Science*. 2016. 7. P. 357-363.
9. Design And Research Of Computer Model Of Wind Turbine Using Labview / S. Syrotyuk et al. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2024. Nr 4. P. 281-285. doi: 10.15199/48.2024.04.58.
10. Determination of Energy Consumption during Turning of Hardened Stainless Steel Using Resultant Cutting Force / R. Nur, N. M. Yusof, I. Sudin, F. M. Nor, D. Kurniawan. *Metals*. 2021. 11(4). 565 p. doi: 10.3390/met11040565.
11. Kring J., Travis J. *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*: 3rd edition. Prentice Hall, 2006. 1032 p.
12. Lalwani D. I., Mehta N. K., Jain P. K. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. *Journal of materials processing technology*. 2008. Vol. 206. P. 167-179.
13. Larsen R. W. *LabVIEW for Engineers*. Prentice Hall, 2011. 396 p.
14. Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW / A. Chouder, S. Silvestre, B. Taghezouit, E. Karatepe. *Solar Energy*. 2013. Vol. 91. P. 337-349.
15. Niruban Projoth T., De Poures Melvin V., Nanthakumar P. Analysis and prediction of cutting force through lathe tool dynamometer in CNC turning process. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46, part 9. P. 4174-4179. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.681.
16. Real time simulation of solar photovoltaic module using labview data acquisition card / Y. Yadav, R. Roshan, S. Umashankar, D. Vijayakumar, D. P. Kothari. *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*. 2013. P. 512-523.

Стаття надійшла 12.05.2024

УДК 625.7.08.002.5

## АНАЛІТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОЇ РІДИНИ РЕГУЛЬОВАНОВОГО ОБ'ЄМНОГО ГІДРОПРИВОДУ МАШИН

*Микола Михалюк, к. т. н., Ярослав Шолудько, к. т. н.,*

*Михайло Бабич, к. т. н., Руслан Гуменюк, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування,*

*вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна*

*e-mail: gazowod@ukr.net, sholudko@email.ua, m.babych@ukr.net, ruslan video@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.036>

### **Михалюк М., Шолудько Я., Бабич М., Гуменюк Р. Аналітичне та експериментальне визначення температурних параметрів робочої рідини регульованого об'ємного гідроприводу машин**

Розглянуто гідросистему сучасного навантажувача JCB 4CX Sitemaster Pro. Встановлено вплив температури робочої рідини на потужність гідравлічного приводу в цілому та його залежність від технічного стану елементів гідравлічної системи. Проведені розрахунки та дослідження показали, що теоретично нові насоси, які мають експлуатаційний знос, мають різну раціональну температуру робочої рідини. Проведено аналіз проблем підвищення ефективності потужності маніпулятивного гідроприводу і мехатронних систем, а також гідравлічного приводу сільськогосподарської техніки, транспортних засобів, дорожньо-будівельної техніки та вантажопідйомного обладнання, що працює у важких умовах експлуатації. Розглянуто перспективні напрями вдосконалення існуючих та створення нових візців і моделей силового гідроприводу вищезазначених систем, установок, машин та обладнання. Розглянуті способи підвищення ККД регульованого об'ємного гідравлічного приводу з використанням кількох об'ємних гідромоторів. Проведені дослідження показують, що втрата тиску в нагнітальній магістралі від насоса до входу в гідромотор повинна бути мінімальною. Запропонований метод побудови кривих сталої гідромотора, використання якого дає уявлення про значення витрати і максимального тиску, що розвивається насосним агрегатом. Пропонуються методи зниження енергії: значення параметрів потоку повинні бути підібрані максимально наближеними до значень подачі насосного агрегату. У разі конструктивної складності необхідно зменшити втрати енергії на дроселювання за рахунок використання регуляторів витрати і клапанів тиску.

**Ключові слова:** регульований насос, робоча рідина, витрата рідини, робочий тиск, температура, потужність, гідравлічний привод, дроселювання, кондиціонування, гідромотор, регулятор, в'язкість, клапан, експеримент.

### **Mykhaliuk M., Sholudko Ya., Babych M., Humeniuk R. Analysis and experimental determination of temperature parameters for the working fluid in an adjustable volumetric hydraulic drive for machines**

The hydraulic system of the modern loader JCB 4CX Sitemaster Pro is examined. The influence of the working fluid temperature on the hydraulic drive power as a whole, and its dependence on the technical condition of the hydraulic system components, has been established. Calculations and studies have shown that new pumps with operational wear theoretically have different optimal working fluid temperatures. An analysis has been conducted on the issues of increasing the efficiency of the power manipulative hydraulic drive and mechatronic systems, as well as the hydraulic drive of agricultural machinery, vehicles, road construction equipment, and lifting equipment operating under harsh conditions. Promising directions for improving existing and creating new samples and models of power hydraulic drives for the aforementioned systems, installations, machines, and equipment are determined. The methods for increasing the efficiency of a variable displacement hydraulic drive using multiple displacement hydraulic motors have been considered. The research shows that the pressure loss in the supply line from the pump to the inlet of the hydraulic motor should be minimal. The proposed method for constructing constant hydraulic motor curves provides insight into the values of flow rate and maximum pressure developed by the pump unit. Methods for reducing energy are proposed: the flow parameter values should be selected as closely as possible to the values of the pump unit output. In case of design complexity, it is necessary to reduce energy losses due to throttling by using flow regulators and pressure valves.

**Keywords:** adjustable pump, working fluid, fluid flow, working pressure, temperature, power, hydraulic drive, throttling, conditioning, hydraulic motor, regulator, viscosity, valve, experiment.

**Постановка проблеми.** Гідравлічний привід є основою в конструкціях новітньої сільськогосподарської техніки, дорожніх та будівельних машин. Неодноразово підтверджено високу ефективність гідравлічного приводу підйомно-транспортних машин та гідрос-

татичних трансмісій приводу ведучих коліс. Під час визначення показників ефективності роботи гідроприводів необхідно особливу увагу приділити температурним режимам та їх впливу на працездатність гідроприводу в цілому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для надання руху механізмам і машинам у гідروприводах застосовують як робочу рідину гідравлічні оливи, які додатково виконують функцію змащення поверхонь елементів систем гідроприводів. Важливою функцією робочої рідини є відведення теплоти у навколишнє середовище через систему кондиціонування [1;3]. У гідросистемах необхідно використовувати робочі рідини, які характеризуються невеликою в'язкістю, хорошими мастильними властивостями, високою температурою кипіння та низькою температурою загушення. Для досягнення оптимальних температурних параметрів робочої рідини слід застосовувати новітні системи кондиціонування гідравлічних оливок, що є обов'язковим для підвищення ефективності експлуатації гідравлічного приводу [1].

**Постановка завдання.** Порівняльну оцінку ефективності роботи гідравлічних систем проводять, як правило, на основі економічних критеріїв. Основним серед них є оцінка

$$N_{дв}(t_k \cdot \eta_q) = N_n(t_k \cdot \eta_q) - \sum_{i=1}^n \Delta P_i(t_k \cdot \eta_q) \cdot \Delta Q_i(t_k \cdot \eta_q), \quad (1)$$

де  $N_n(t_k \cdot \eta_q)$  – потужність насоса, що залежить від температури робочої рідини і коефіцієнта подачі;  $\Delta P_i(t_k \cdot \eta_q)$ ,  $Q_i(t_k \cdot \eta_q)$  – відповідно втрати тиску і витрата на ділянках залежно від температури робочої рідини і коефіцієнта подачі. Загальна витрата рідини становить:

$$Q = Q_n + Q_p + Q_{ГЦ} = \pi d_n \left[ \frac{\Delta P S_n^3}{12 \mu_0 \left(\frac{50}{t}\right)^m L} - \frac{v_{ch} S_n}{2} \right] + \frac{\Delta P S_p}{12 \mu_0 \left(\frac{50}{t}\right)^m \frac{R}{L_r}} + Q_p + Q_{ГЦ} \quad (2)$$

де  $Q_n$ ,  $Q_p$ ,  $Q_{ГЦ}$  – відповідно внутрішні перетікання в насосі, розподільнику та гідроциліндрі;  $\Delta p = p_1 - p_2$  – різниця тисків на вході й виході насоса;  $S_n$ ,  $S_p$  – відповідно зазори в поршневому і в розподільному блоках насоса;  $N$  – кількість поршнів у насосі;  $v_{ch}$ ,  $d_n$  – середня швидкість руху і діаметр поршня насоса;  $R$ ,  $r$  – відповідно відстані від осі до зовнішньої та внутрішньої кромки розподільного отвору насоса;  $L$  – довжина ущільнювальної частини поршня насоса;  $m$  – показник ступеня, залежний від властивостей робочої рідини;  $\mu_0$  – динамічна в'язкість робочої рідини [2; 6].

Джерелом енергії є регульований аксіально-поршневий насос. Регулятори зміни робочого об'єму гідромашин бувають слідкуючими, із заданням режиму регулювання оператором, та автоматичними [5]. Схема гідронасоса показана на рис. 1. Слідкуючі регулятори застосовують в об'ємних гідроприводах із замкненим або розімкненим ланцюгами циркуляції робочої рідини в системах машинного (об'ємного) регулювання швидкості гідромотора, а автоматичні – у системах дросельного регулювання гідромотора або гідроциліндра. За використання дросельного регулювання швидкості руху вихідної ланки гідродвигуна спостерігаються підвищення температури робочої рідини внаслідок такого явища, як дроселювання [5].

Характеристики регуляторів слідкуючого типу наведені на рис. 2 у вигляді залежності подачі насоса  $Q_n$  від положення регулювального органа  $\chi$ : кута нахилу  $\gamma$  ручки переміщення приводу слідкуючого золотника (гідро-

затрат енергоносіїв на одиницю виконаної роботи. Наше завдання – дослідити вплив температури робочої рідини, що використовується в системах гідравлічного приводу машин, на параметри гідропередачі з урахуванням таких чинників, як в'язкість рідини, витрата рідини, втрати тиску.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження впливу температури робочої рідини на параметри гідропередачі розглянемо схему з послідовно сполучених складових гідроприводу навантажувача JCB 4CX Sitemaster Pro: насос – гідророзподільник – гідроциліндр – гідророзподільник – фільтр – бак. Умовно розділимо цей ланцюг на лінійні ділянки і окремі місцеві опори. При визначенні споживаної потужності гідродвигуна залежно від робочих параметрів гідравлічної оливи (температура, в'язкість) та загального об'ємного ККД гідроприводу запропоновано математичну модель:

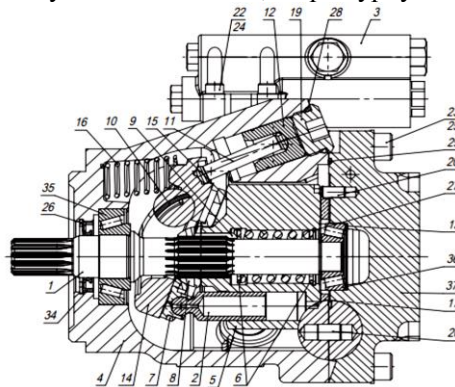
механічний регулятор типу МН), тиску керування  $P_u$  редукційним гідроклапаном на вході в гідроциліндр, зміни кута похилого диска (гідравлічний регулятор типу HD) або значення струму  $I$  на пропорційних електромагнітах (пропорційний регулятор типу EP). Незалежно від конструктивних відмінностей регуляторів їх теоретичні характеристики мають лінійний характер [4]. Загальне допустиме зниження об'ємного ККД гідроприводу визначається можливістю забезпечити своє функціональне призначення, економічною доцільністю використання або забезпеченням безпеки [2; 8]. Були розглянуті регульовані насоси з  $\eta=0,98$ ,  $0,8$  і  $0,65$  (новий, граничний стан за економічним критерієм і технічний граничний стан унаслідок втрати працездатності) в інтервалі температур від  $10$  до  $70$  °С.

Втрати тиску в гідроагрегатах не піддаються аналітичному розрахунку, тому їхні

характеристики визначаються експериментально.

$$\Delta P_{Q_i} = \Delta P_{Q_n} \left( \frac{Q_i}{Q_n} \right)^m \cdot \left( \frac{V_i}{V_n} \right)^n; \quad (3)$$

де  $\Delta P_{Q_n}$  – втрати тиску в гідроагрегаті за номінальної витрати й номінальної в'язкості;  $\Delta P_{Q_i}$  – втрати тиску в гідроагрегаті при розрахунковій витраті та при розрахунковій в'язкості. При цьому для ламінарного режиму показники ступеня  $m = 1, n = 1$ , а при турбулентному –  $m = 2, n = 0$ .



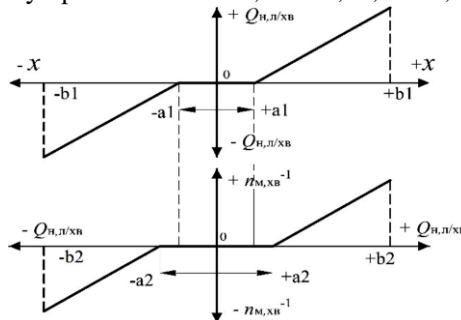
**Рис. 1.** Аксіально-поршневий насос серії PVC (PVC1):

- 1 – вал; 2 – плунжер із під'ятником; 3 – регулятор робочого об'єму; 4 – корпус; 5 – блок циліндрів; 6 – шайба; 7 – сепаратор; 8 – втулка сферична; 9 – штир; 10 – підшипник; 11 – шток управління; 12 – поршень управління; 13 – кільце регулювальне; 14 – люлька; 15 – пружина; 16 – пружина люльки; 17 – розподільник; 18 – пробка дренажу; 19 – пробка управління; 20 і 21 – штифти; 22 і 23 – гвинти; 24 і 25 – шайби; 26 і 27 – кільця стопорні; 28...33 – кільця ущільнювальні; 34 – манжета; 35 і 36 – підшипники; 37 – кришка задня

**Fig. 1.** Axial-piston pump of the PVC series (PVC1):

- 1 – shaft; 2 – plunger with thrust bearing; 3 – displacement regulator; 4 – body; 5 – cylinder block; 6 – washer; 7 – separator; 8 spherical bushing; 9 pin; 10 bearing; 11 control rod; 12 control piston; 13 – adjusting ring; 14 – cradle; 15 – spring; 16 – cradle spring; 17 – distributor; 18 drainage plug; 19 – control plug; 20 and 21 – pins; 22 and 23 – screws; 24 and 25 – washers; 26 and 27 – retaining rings; 28...33 – O-rings; 34 – cuff; 35 and 36 – bearings; 37 – rear cover

Через велику кількість місцевих опорів у цих гідроагрегатах виникає нестійкий перехідний режим руху робочої рідини. Тому приймають  $m = 1,75 \dots 1,85, n = 0,15 \dots 0,25$  [6].



**Рис. 2.** Теоретичні характеристики зміни подачі насоса від керувального сигналу регулятора робочого об'єму насоса  $Q_n$  та частоти обертання  $n_m$  гідромотора від подачі насоса  $Q_n$  для об'ємного гідроприводу із замкнутою циркуляцією

**Fig. 2.** Theoretical characteristics of the change in pump supply from the control signal of the regulator of the working volume of the pump  $Q_n$  and the frequency of rotation  $n_m$  of the hydraulic motor from the supply of the pump  $Q_n$  for a volumetric hydraulic drive with closed circulation

На рис. 3 зображена схема гідроприводу з гідромашин серії Н у складі стенда для дослідницьких випробувань. До блоку насоса БН входять регульований насос Н, насос живлення Нп, запобіжний клапан КПп, зворотні (антикавітаційні) клапани КО1 і КО2. До складу гідророзподільника Р зі слідкуючим золотником включена система управління гідроциліндрами Ц1 і Ц2, що відповідає за зміну кута нахилу диска

регулятора робочого об'єму насоса. Два редуційних клапани КР1 і КР2 з електромагнітним пропорційним управлінням забезпечують переміщення слідкуючого золотника гідророзподільника Р. Тяга зворотного зв'язку ЗЗ з'єднує спостережний золотник і гідроциліндри. Система дроселів ДР1...ДР3 призначена для регулювання часу виходу регулятора насоса на задану подачу робочої рідини [7].

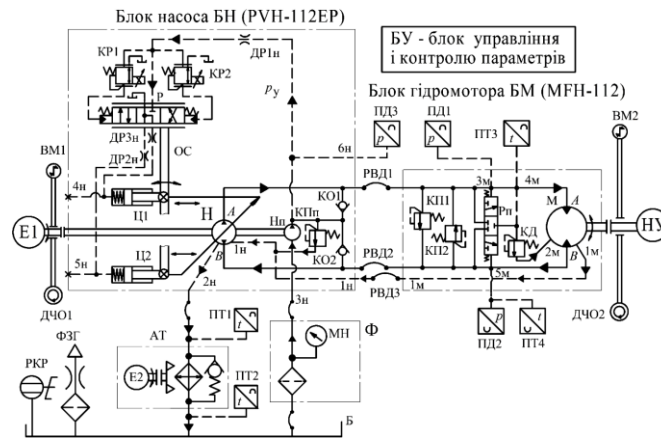


Рис. 3. Гідравлічна принципова схема стендового об'ємного гідроприводу, яка складається з аксіально-поршневих гідромашин серії Н (Н2)

Fig. 3. Hydraulic principle diagram of bench volume hydraulic drive, which consists of axial-piston hydraulic machines of the H series (H2)

Втрати корисної потужності на окремих ділянках гідроприводу:

$$\Delta N_i = \Delta P_i \cdot Q_i. \quad (4)$$

Загальний ККД гідроприводу визначають за співвідношенням

$$\eta = \frac{N_{e\partial}}{N_n}, \quad (5)$$

де  $N_{e\partial}$  – корисна потужність гідродвигуна (гідродвигунів), кВт;

$N_n$  – потужність на привід насоса (насосів), кВт.

Якщо гідродвигуни працюють неодноразово, то необхідно визначити загальний ККД для гідроприводу кожного робочого органу. У разі одночасної роботи гідродвигунів у співвідношенні (5) підставляють сумарну повну потужність вихідних ланок і сумарну потужність насосів.

Втрати потужності в гідроприводі перетворюються на тепло. Щоб гідропривід не перегрівався, тепло має передатись навколишньому середовищу.

Кількість тепла, що виділяється гідроприводом за секунду у розрахунковому режимі його роботи, дорівнює  $N_n(1-\eta)$ , кВт. З рівняння теплового балансу для усталеного теплового режиму визначається середня температура  $T$  робочої рідини гідроприводу:

$$T = T_o + \frac{N_n(1-\eta)}{\sum \alpha_i \cdot S_i}, \quad (6)$$

де  $T_o$  – температура навколишнього середовища, °С;

$\alpha_i$  – коефіцієнт тепловіддачі  $i$ -го елемента, кВт·град/м<sup>2</sup>;

$S_i$  – площа поверхні  $i$ -го елемента, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт  $\alpha_i$  залежить від конструктивних особливостей елемента та умов обтікання його повітрям. Наближені значення  $\alpha_i$  для елементів з гладкими стінками: у разі ускладненої циркуляції повітря – 0,009; вільної циркуляції – 0,015; примусового обдуву – 0,023 [3; 5].

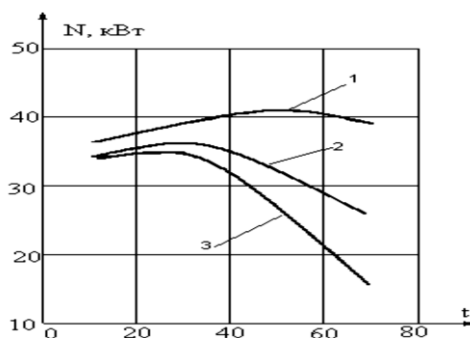
Площа  $S$  розраховується наближено, виходячи з габаритних розмірів елементів гідроприводу. Найраціональнішою формою гідробака вважають паралелепіпед. Рівень робочої рідини в ньому не перевищує звичайно 0,5 висоти бака. За цієї умови і співвідношення сторін паралелепіпеда від 1:1 до 5:3 розрахункова площа поверхні охолодження бака визначається за виразом [2]:

$$S_o \approx 6,6\sqrt[3]{W^3}, \quad (7)$$

де  $W$  – об'єм робочої рідини (місткість) бака, м<sup>3</sup>.

За загальним ККД і питомою металомісткістю оцінюють технічну досконалість розглядуваного гідроприводу.

Зі збільшенням температури робочої рідини її в'язкість зменшується і зменшуються втрати тиску й потужності в магістралях гідроприводу. Однак при цьому збільшуються внутрішні перетікання всередині гідроагрегатів, що призводить до збільшення втрат потужності [5;6]. Нові насоси ( $\eta = 0,98$ ), дійсно, найбільшу потужність подають до гідродвигуна за температури 50 °С (крива 1, рис. 4).



**Рис. 4.** Вплив температури робочої рідини на потужність гідродвигуна  
**Fig. 4.** The influence of the temperature of the working fluid on the power of the hydraulic motor

Експериментальні дослідження вказують на те, що показник експлуатаційного зносу насоса прямо пропорційний зменшенню його коефіцієнта подачі, що, своєю чергою, призводить до зниження температури робочої рідини, при якій найбільша потужність надходить до гідродвигуна. Для насосів, що мають коефіцієнт подачі  $\mu_0 = 0,8$ , ця температура дорівнює 30...35 °C (крива 2, рис. 4), а для насосів, що мають  $\mu_0 = 0,65 - 10...20$  °C (крива 3, рис. 4).

**Висновки.** У гідромашинах із регульованим робочим об'ємом застосовані ефективні регулятори з автоматичними та електрогідравлічними пропорційними системами. Проведено аналіз технічного рівня, суттєво підвищеного останніми роками, і наведено номограми для вибору типорозмірів гідромашин. Проведені дослідження дають розуміння того, що нові насоси й які мають експлуатаційний знос, мають різну раціональну температуру робочої рідини. За раціональних значень температури до гідродвигуна зношеними насосами може бути подана майже вдвічі більша потужність, ніж при температурі 50 °C, рекомендованій для нових насосів (крива 1, 2 і 3, рис. 3). Споживана потужність насоса при цьому практично не змінюється.

#### Бібліографічний список

1. Буренніков Ю. А., Немировський І. А., Козлов Л. Г. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2013. 273 с.
2. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривод / В. А. Ді-

дур, О. Д. Савченко, С. І. Пастушенко, С. І. Мовчан. Запоріжжя: Прем'єр, 2005. 464 с.

3. Гідро- та пневмосистеми в автотракторобудуванні: навч. посіб. / В. Б. Самородов, Г. А. Аврунін, І. Г. Кириченко, А. І. Бондаренко, Є. С. Пелипенко; за ред. В. Б. Самородова. Харків: ФОП Панов А. М., 2020, 524 с.

4. Метод поліпшення динамічних характеристик процесу пуску об'ємного гідропривода з замкненим ланцюгом циркуляції робочої рідини / Я. Лур'є, В. Б. Самородов, Г. А. Аврунін, Є. Н. Цента. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. 2019. № 2. С. 68–76.

5. Михалюк М. А., Барабаш Р. І. Аналіз залежностей параметрів та показників ефективності технологічного процесу ТО-2 та ТО-3 тракторів ХТЗ–1613. *Науковий вісник ТДАТУ імені Дмитра Моторного*. 2021. Вип. 11, т. 2. С. 264-271. doi: 10.31388/2220-8674-2021-2-23.

6. Михалюк М. А., Боярчук В. М., Шолудько Я. В. Гідроприводи: навч. посіб. Львів: ЛНУП, 2024. 175 с.

7. Fluid power systems and components ISO 1219-1. Graphic symbols and circuit diagrams. Part 1: Graphic symbols for conventional use and data-processing applications. ISO 1219-12-1:2006 (E/F). 88 p.

8. Hydraulic Motor/Pump Series F11/F1 2 Fixed Displacement. PARKER HYDRAULICS; HY17-8249/UK. October, 2000. 31 p.

Стаття надійшла 12.06.2024



УДК 631.312.024.001.63

## ОБГРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ КОТКА НА ПРОЦЕС УЩІЛЬНЕННЯ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ ОБРОБІТКУ ПОЛЯ ПІСЛЯ ЗБИРАННЯ КУКУРУДЗИ

*Микола Корчак, к. т. н., доцент, Анатолій Рудь, к. т. н., доцент,  
Сергій Грушецький, к. т. н., доцент, Степан Замойський, к. т. н., доцент  
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»  
вул. Шевченка, 12, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька область, Україна  
e-mail: korchak\_nikolay@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.041>

### **Корчак М., Рудь А., Грушецький С., Замойський С. Обґрунтування впливу котка на процес ущільнення комбінованого способу обробітку поля після збирання кукурудзи**

При запропонованому комбінованому способі обробітку поля, засміченого рослинними залишками кукурудзи, послідовно здійснюються процеси: переріз довгих та грубих рослинних залишків; розподіл по рядках; ущільнення; подрібнення згорненої рослинно-земляної маси; вирівнювання обробленої поверхні ґрунту. Кожен процес сприяє кращому протіканню наступного.

Котки при запропонованому комбінованому способі обробітку поля після збирання кукурудзи здійснюють один із найважливіших технологічних процесів – ущільнення розрізаних та згорнених стебел по смугах обробітку, забезпечуючи при цьому більш ефективно протікання наступних процесів запропонованого способу.

Проведені теоретичні дослідження впливу котка на процес ущільнення розрізаних і згорнених рослинних залишків кукурудзи по смугах обробітку, зокрема обґрунтовано його основні технологічні параметри. Дослідження впливу котка на процес ущільнення рослинних залишків дають можливість його науково обґрунтувати.

Обґрунтовано основні технологічні параметри котка, враховуючи отримані раніше дослідні дані характеру засміченості поля рослинними залишками кукурудзи: діаметр котка  $D_k = 0,20 \dots 0,24$  м, ширина котка  $B_k = 0,20 \dots 0,25$  м.

Теоретично обґрунтований коток реалізований у розробці комбінованого подрібнювача рослинних залишків кукурудзи. Отримано подальший розвиток досліджень з обґрунтування ущільнення стеблових залишків та котків, що застосовуються в комбінованих ґрунтообробних агрегатах для обробітку ґрунту після збирання кукурудзи.

**Ключові слова:** коток, рослинні залишки кукурудзи, теоретичне обґрунтування, вплив на процес ущільнення, ґрунт.

### **Korchak M., Rud A., Hrushetskyi S., Zamoiskyi S. Justification of the influence of the roller on the process of compaction of the combined method of field cultivation after harvesting corn**

With the proposed combined method of cultivating fields with corn plant residues, several processes are carried out in sequence, namely cutting long and coarse plant residues, distributing them in rows, compacting the materials, crushing the compacted plant-earth mass, and leveling the treated soil surface. Each step is designed to improve the effectiveness of the subsequent processes.

The proposed combined method suggests that after harvesting corn rollers perform a crucial technological function - compacting the cut and rolled stalks along the cultivation lanes. This step ensures a more efficient flow of the subsequent processes in the proposed method.

Theoretical studies were conducted to examine how the roller impacts the compaction of cut and rolled corn plant residues along the cultivation strips. These studies helped establish the roller's main technological parameters based on experimental data regarding field clogging with corn plant residues.

The key technological parameters of the roller include a diameter ( $D_k$ ) of 0.20 to 0.24 meters and a width ( $B_k$ ) of 0.20 to 0.25 meters.

A theoretically justified roller has been incorporated into the design of a combined shredder for corn plant residues. Further research is needed to optimize the compaction of stem residues and rollers that are used in combined tillage units for soil cultivation following corn harvest.

**Keywords:** roller, plant residues of corn, theoretical justification, influence on the process of compaction, soil.

**Постановка проблеми.** Удосконалення способу обробітку поля, засміченого рослинними залишками кукурудзи після її збирання, здійснюється шляхом поєднання послідовних процесів впливу на рослинні залишки та ґрунт, що дозволяє забезпечити: якісний обробіток по-

ля, подрібнення і загорання рослинних залишків по всьому фронту ширини захвату за один прохід агрегату; ефективно використання енергії, що витрачається на привод засобів подрібнення залишків, а тим самим досягти можливості збільшення ширини захвату агрегату та

його продуктивності; залишити вирівняну поверхню поля. Реалізація цього способу полягає у розробленні та обґрунтуванні технологічних параметрів та режимів роботи комбінованого подрібнювача рослинних залишків завдяки дослідженню технологічних процесів.

При запропонованому комбінованому способі обробітку поля, засміченого рослинними залишками кукурудзи, послідовно здійснюються процеси: переріз довгих та грубих рослинних залишків; розподіл по рядках; ущільнення; подрібнення згорненої рослинно-земляної маси; вирівнювання обробленої поверхні ґрунту. Кожен процес сприяє кращому протіканню наступного.

Процес перерізу здійснює перерізування довгих та грубих стебел в міжряддях. Процес розподілу призначений для спрямування рослинних залишків з міжрядь на рядки посіву. Процес ущільнення забезпечує втрамбування згорнених рослинних залишків та сприяє кращому підготовленню до процесу подрібнення. Процес подрібнення здійснює подрібнення рослинних залишків і перемішування їх з ґрунтом. Процес вирівнювання забезпечує вирівнювання обробленої поверхні поля.

Технологія запропонованого способу відбувається таким чином. При переміщенні машини вздовж рядків поля після збирання кукурудзи розподільники рухаються в міжряддях, забезпечуючи процес розподілу розрізаних стебел в зони подрібнення (до рядків посіву), де вони разом з прикореневими залишками подрібнюються ножами фрезерних секцій і перемішуються з ґрунтом. Для перерізування довгих та грубих стебел, а також для запобігання забиванню розподільників встановлені плоскі дискові ножі, що забезпечують процес перерізу довгих та грубих рослинних залишків та подання їх на бокові стінки напрямних крил розподільників, якими вони вільно переміщуються. Далі відбувається втрамбування згорненої рослинної маси прикочувальними котками, що працюють по рядках посіву, забезпечуючи процес ущільнення. Після вищеписаних процесів відбувається процес подрібнення фрезерними барабанами, що працюють в зонах подрібнення. Ґрунт і рослинні залишки, що відкидаються ножами, за допомогою вирівнювальних щитків забезпечують процес вирівнювання поверхні поля.

Котки при запропонованому комбінованому способі обробітку поля після збирання кукурудзи здійснюють один із найважливіших технологічних процесів – ущільнення розрізаних та згорнених стебел по смугах обробітку, забезпечуючи при цьому більш ефективне протікання наступних процесів запропонова-

ного способу. Тому саме цей робочий орган, який реалізує технологічний процес, що він виконує, потребує теоретичних досліджень впливу на процес ущільнення рослинних залишків.

Теоретичні дослідження технологічного процесу впливу котка на процес ущільнення рослинних залишків дають можливість науково обґрунтувати конструктивні параметри котків. Дослідження потрібні у першу чергу для теоретичного аналізу роботи саме цих робочих органів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Пасивні робочі органи в комбінованих ґрунтообробних машинах удосконалюють фірми зарубіжних країн: Kongskilde, Kverneland, Dal – Vo, Franquet та ін. Вони впроваджують різні типи котків та вирівнювальні робочі органи із забезпеченням стабільної дії на ґрунт [1-6].

Наукові дослідження взаємодії з ґрунтом ущільнюючих пасивних робочих органів опубліковано в працях [7-9], де досліджуються технологічні параметри та ущільнюючий вплив різних типів котків. Такі котки задовільно працюють, однак є масивними та мають великий тяговий опір [1; 2; 10; 11]. Усе це зменшує можливості їхнього використання в енергоощадних комбінованих ґрунтообробних машинах.

Сьогодні котки використовуються в різних комбінованих ґрунтообробних машинах [2; 12-17]. Однак у публікаціях вітчизняних учених недостатньо обґрунтовано розміри котків залежно від умов і режимів роботи. Залишається недослідженою взаємодія котків з іншими типами робочих органів, не вивчено процес ущільнення рослинних залишків котками по рядках посіву кукурудзи та не встановлено умови надійного його виконання, відсутні рекомендації стосовно ефективності застосування котків в комбінованих подрібнювачах для обробітку ґрунту, засміченого рослинними залишками кукурудзи.

**Постановка завдання.** Наше завдання – теоретично обґрунтувати вплив котка на процес ущільнення рослинних залишків кукурудзи по смугах обробітку.

**Виклад основного матеріалу.** *Обґрунтування основних технологічних параметрів котка.* Робочим органом котка є циліндрична поверхня, а основні технологічні параметрами – діаметр і ширина. Коток ущільнює згорнену рослинну масу по рядках посіву кукурудзи. Щоб дослідити (виявити) дію котка на рослинні залишки, розглянемо його взаємодію із сформованим стебловим валком (рис.).

Від дії сили  $N$  на стебла виникають сили тертя  $F_2$  (див. рис.) між ободом котка і стебла-

ми, які направлені в сторону, зворотно напрямку руху котка. Защемлення стебел між котком і поверхнею поля проходить у тому випадку, коли

$$F_1 + F_2 \cdot \cos \alpha > N', \quad (1)$$

але  $N' = N \cdot \sin \alpha$ . (2)

$$F_2 = N \cdot \operatorname{tg} \varphi_2, F_1 = Q \cdot \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (3)$$

$$Q = N'' + F_2 \sin \alpha = N \cdot \cos \alpha + N \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Провівши скорочення на  $N$ , і розділивши на  $\cos \alpha$ , одержимо:

$$\alpha \leq \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2}{1 - \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}, \text{ або } \operatorname{tg} \alpha \leq \operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2). \quad (5)$$

Стебла не будуть переміщуватись перед котком за умови:

$$\alpha \leq \varphi_1 + \varphi_2. \quad (6)$$

де  $\alpha$  – кут між горизонталлю і дотичною до кола котка, проведений у точці дотику його із стеблами [18].

Кут  $\alpha$  залежить від висоти стебел  $h_{\text{заг.ст}}$  і діаметра котка  $D_{\kappa}$ .

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}}{\cos \alpha} = \frac{2\sqrt{hD_{\kappa} - h^2}}{D_{\kappa} - 2h}. \quad (7)$$

Відповідно

$$\operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2) \geq \frac{2\sqrt{hD_{\kappa} - h^2}}{D_{\kappa} - 2h}. \quad (8)$$

Знаючи кути тертя  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  та діаметр котка  $D_{\kappa}$ , можна визначити висоту стебел, які ущільнює коток, не переміщуючи їх вперед.

Кут обхвату обода котка:

$$\cos \alpha = \frac{(r - h)}{r} = \frac{(D_{\kappa} - 2h)}{D_{\kappa}} = 1 - \frac{2h}{D_{\kappa}}, \quad (9)$$

де  $D_{\kappa}$  – діаметр котка;  $h$  – глибина колії котка.

Задавши глибину колії котка і кут обхвату, можна визначити допустимий мінімальний діаметр котка

$$D_{\kappa} \geq \frac{2h_{\text{заг.ст}}}{(1 - \cos \alpha)}. \quad (10)$$

Отже, для ущільнення згорнених стебел висотою  $h_{\text{заг.ст}}$  діаметр котка повинен задовольняти умову:

$$D_{\kappa} \geq h_{\text{заг.ст}} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}, \quad (11)$$

де  $h_{\text{заг.ст}}$  – загальна висота згорнених стебел;  $\varphi_1, \varphi_2$  – відповідно кути тертя стебел до котка та ґрунту.

Враховуючи одержані раніше експериментальні дані стану засміченості та статистичну характеристику результатів досліджень, приймаємо діаметр котка в межах  $D_{\kappa} = 0,20 \dots 0,24$  м [19].

Ущільнюючу дію котка визначаємо за формулою:

$$P = 9,8 \cdot \frac{m}{b}, \quad (12)$$

де  $m$  – маса котка, кг;

$b$  – ширина котка, см;

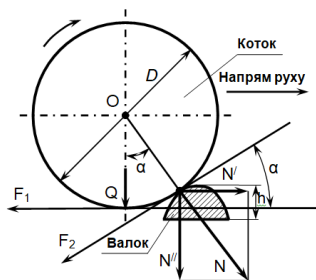
$P$  – питомий тиск, що припадає на 1см ширини котка, Н/см.

Мінімальне значення діаметра котка можна визначити за умовою недопущення намотування стебел на коток із співвідношення:

$$D_{\kappa} \geq \frac{l_{c \max}}{\pi}, \quad (13)$$

де  $D_{\kappa}$  – діаметр барабана котка, см;

$l_{c \max}$  – максимальна довжина стебел (одержані нами дослідні дані [19]), см.



**Рис.** Схема дії котка на згорнені стебла:  $h$  – висота валка згорнених стебел;  $D$  – діаметр котка;  $\alpha$  – кут між горизонталлю і дотичною до кола котка, проведений у точці дотику його із стеблами;  $N$  – сила, нормальна до поверхні котка в точці дотику із стеблами

**Fig.** Scheme of action of a rolling pin on rolled stems:  $h$  – height of the swath of rolled stems;  $D$  – diameter of the roller;  $\alpha$  – the angle between the horizontal and the tangent to the rolling circle drawn at the point of contact with the stems;  $N$  – force normal to the surface of the roller at the point of contact with the stems

Ширина котка дорівнює:

$$B_k = B_{фр} = d_k, \quad (14)$$

де  $B_{фр}$  – ширина фрези, см;  
 $d_k$  – діаметр кореневища (одержані дослідні дані), см.

Враховуючи одержані раніше експериментальні дані діаметрів кореневищ та їхню характеристику, приймаємо ширину котка в межах  $B_k = 0.20 \dots 0.25$  м [19].

Тяговий опір котка:

$$P_k = 0,86 \cdot k \cdot \sqrt[3]{\frac{G^4}{g_o \cdot B_k \cdot D_k}}, \quad (15)$$

де  $G$  – сила тиску котка на рослинні залишки та ґрунт;  
 $g_o$  – коефіцієнт об'ємної деформації ґрунту.

Затрати потужності:

$$N_k = P_k \cdot V_n, \quad (16)$$

де  $P_k$  – тяговий опір котка;  
 $V_n$  – поступальна швидкість.

Процес ущільнення стеблових залишків кукурудзи та коток для його реалізації обґрунтовані та реалізовані нами у розробці комбінованого подрібнювача рослинних залишків кукурудзи [20; 21], досліджувалися раніше та були частково розглянуті в матеріалах конференцій та наукових виданнях [22-33].

**Висновки.** 1. Теоретично обґрунтовано вплив котка на процес ущільнення рослинних залишків кукурудзи по смугах обробітку.

2. Аргументовано основні технологічні параметри котка, враховуючи отримані нами раніше дослідні дані характеру засміченості поля рослинними залишками кукурудзи: діаметр котка  $D_k = 0,20 \dots 0,24$  м, ширина котка  $B_k = 0,20 \dots 0,25$  м.

3. Отримано подальший розвиток досліджень з обґрунтування ущільнення стеблових залишків та котків, що застосовуються в

комбінованих ґрунтообробних агрегатах для обробітку ґрунту після збирання кукурудзи.

### Бібліографічний список

1. Каталог фірми "Kvernelend" (Oferta produkcyjna), на польській мові, Toruń, 1998. 62 с.
2. Каталог фірми "Kongsilde" (Cennik), на польській мові, Kutno, 1999. 150 с.
3. Каталог фірми "Franquet" на англійській мові, Guignicourt, 1997. 4 с.
4. Каталог фірми "Dal – Bo" (Preisliste) на німецькій мові, Langendorf, Udbye Grafisk, 1999. 44 с.
5. Gach S. Maczyny rolnicze. Elementy teorii i obliczeń / Gach S., Kuczewski J., Waszkiewicz C. Warszawa: SGGW, 1991. 664 s.
6. Kuczewski J. Mechanizacja rolnictwa. Maczyny i urządzenia do produkcji roślinnej i zwierzęcej / Kuczewski J., Waszkiewicz C. Warszawa : SGGW, 1997. 552 s.
7. Woźniak W. Ciągniki i maszyny rolnicze. Budowa, przeznaczenie / Woźniak W. Poznań: PIMR, 2002. 905 s.
8. Шевченко І. А. Обґрунтування технологій та технічних засобів для обробітку ґрунтів на базі їх агрофізичних показників: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Київ, 2002. 36 с.
9. Залужний В. І., Грицишин М. І. Особливості компонування і використання ґрунтообробних комбінованих агрегатів з пасивними робочими органами. *Машиновипробування на службі прогресу машинобудування і сільськогосподарського виробництва: зб. наук. праць*. Дослідницьке: УкрНДІПВТ. 1997. С. 87–92.
10. Войтюк Д. Г., Дубровін В. О., Іщенко Т. Д. Сільськогосподарські та меліоративні машини / за ред. Войтюка Д. Г. Київ: Вища освіта, 2004. 544 с.
11. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. Сільськогосподарські машини.

Основи теорії та розрахунку / за ред. Войтюка Д.Г. Київ: Вища освіта, 2005. 464 с.

12. Лотоненко І. В. Обробіток ґрунту для різних ґрунтово-кліматичних зон України: навч. посібник / Лотоненко І. В., Литвинюк Р. С., Синявін В. Д.; Харк. держ. аграр. ун-т ім. В. В. Докучаєва. Харків, 1998. 54 с.

13. Ільченко В. Ю., Нагірний Ю. П. [та ін.]. Машиновикористання в землеробстві. Київ: Урожай, 1996. 384 с.

14. Медведєв В. В., Булигін С. Ю., Трускавецький Р. С., Лактіонова Т. М. та інші. Сучасний стан земель України і заходи для його поліпшення. *Вісник аграрної науки*. 1996. № 12. С. 5–13.

15. Нагорний Н. Н. Технологии и технические средства почвозащитного контурно-мелиоративного земледелия. Киев: Урожай, 1994. 248 с.

16. Оптимізація комплексів машин і структури машинного парку та планування технічного сервісу : навч. посібник. Укладачі: Мельник І.І., Гречкосій В.Д., Марченко В.В. та ін. Київ: Видавничий центр НАУ. 2001. 48 с.

17. Мельник І.І., Бондар С.М. Аналіз умов використання ґрунтообробних комплексів у зоні Полісся України. *Збірник наукових праць Національного аграрного університету “Механізація с/г. виробництва”*. Том Х. Київ: НАУ, 2001. С. 131–138.

18. Заяц О. М. Сівозміни: теоретичні основи, проектування та освоєння. Харків, 1999. 90с.

19. Корчак М. М., Єрмаков С. В. Дослідження характеру засміченості поля листостебельними та кореневими залишками після збирання кукурудзи. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету*. Кам'янець-Подільський, 2007. Вип. 15. С. 498–504.

20. Пат. № 152751, Україна, МПК (2006.01) А01В 49/02. Комбінований подрібнювач рослинних залишків грубостеблових культур зі шлейфовими робочими органами / Корчак М. М. № у 2022 03673; заявл. 03.10.2022; опубл. 05.04.2023, Бюл. № 14. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=284698> (дата звернення: 20.03.2024).

21. Пат. № 154183, Україна, МПК (2006.01) А01В 49/02. Комбінований подрібнювач рослинних залишків грубостеблових культур з регулюванням вирівнювальних робочих органів / Корчак М. М. № у 2023 01645. заявл. 12.04.2023; опубл. 18.10.2023, Бюл. № 42. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=286622> (дата звернення: 20.03.2024).

22. Корчак М. М. Обґрунтування параметрів дискового робочого органу для розрізання стебел кукурудзи. *Abstracts of XXXIV International Scientific and Practical Conference «Problems of the development of modern science»*, 30 August – 02 September 2022), Madrid, Spain 2022. С. 319–326. DOI – 10.46299/ISG.2022.1.34).

23. Корчак М. М. Розробка комбінованого способу та подрібнювача для ґрунту, засміченого рослинними залишками. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2009. №13, т. 1. С. 155–163.

24. Korchak M., Yermakov S., Maisus V., Oleksiyo S., Pukas V., Zavadskaya I. Problems of field contamination when growing energy corn as monoculture. *E3S Web of Conferences*. Krynica, Poland. 6th International Conference – Renewable Energy Sources. 2020. Volume 154. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015401009>.

25. Sheichenko V., Marynchenko I., Dudnikov I., Korchak M. Development of technology for the hemp stalks preparation. *Independent Journal of Management and Production.State agrarian and engineering university in Podilia*. 2019. V. 10, № 7. P. 687–701.

26. Korchak M., Yermakov S., Hutsol T., Burko L., Tulej W. Features of weediness of the field by root residues of corn. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference*. 2021. Rezekne, Latvia, Volume 1. P. 122–126. DOI: 10.17770/etr2021vol1.6541.

27. Bliznjuk O., Masalitina N., Mezentseva I., Novozhylova T., Korchak M. Development of safe technology of obtaining fatty acid monoglycerides using a new catalyst. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022. Volume 2, № 6 (116), P. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253655>

28. Korchak M. Use and quality assessment of test technologies in the educational process. *International Science Journal of Education & Linguistics*. National Centre for Poland, Poland. 2022. Volume 1, № 3. P. 57–63 (2022). DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20220103.5>

29. Korchak M. Substantiation of agrotechnical requirements for soil preparation for sowing grain crops. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. National Centre for Poland, Poland. 2022. Volume 1, № 3. P. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20220103.5>

30. Korchak M. Characteristics and mechanical and technological properties of the soils of the Podillya and Polissya zone of Ukraine. *International Science Journal of Engineering &*

*Agriculture*. National Centre for Poland, Poland. 2022. Volume 1, № 4. P. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220104.08>

31. Korchak M. Features of training masters in teaching the discipline "Management of technological processes in plant production". *International Science Journal of Education & Linguistics*. National Centre for Poland, Poland. 2022. Volume 1, № 4. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20220104.07>

32. Korchak M. Justification of the constituent factors of production safety. *International Science Journal of Management, Economics &*

*Finance*. National Centre for Poland, Poland. 2022. Volume 1, № 4. P. 916. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjmef.20220104.05>

33. Korchak M., Bliznjuk O., Nekrasov S., Gavrish T., Petrova O., Shevchuk N., Strikha L., Kostyrkin O. Semenov, E. Saveliev D. Development of rational technology for sodium glyceroxide obtaining. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Volume 5, № 6 (119), P. 16-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265087>.

*Стаття надійшла 12.04.2024*

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

*Олексій Бурнаєв, к. ф.-м. н., Петро Коруняк, к. т. н., Віктор Семерак, к. ф.-м. н.,  
Олександр Пономаренко, к. ф.-м. н., Василь Тимочко, к. т. н.,  
Іван Городецький, к. т. н., Мирон Магац, к. т. н.  
Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: alexislviv@gmail.com, semerakviktor@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.047>

### **Бурнаєв О., Коруняк П., Семерак В., Пономаренко О., Тимочко В., Городецький І., Магац М. Експериментальне дослідження впливу вібраційного навантаження**

Проведено експерименти з аналізу оптимальних характеристик розробленого пристрою для трамбування сінажу і силосу ущільнювачами віброударного типу для селянського сімейного господарства з метою перевірки і уточнення передумов для визначення ефективності ущільнення силосної маси за різних умов і режимів роботи. При завантаженні подрібненої рослинної маси на силос або сінаж потрібно постійно здійснювати трамбування. Воно викликає ущільнення і вентиляцію подрібненої маси, доступ свіжого повітря, що не дає можливості нагрітися масі до надмірної температури, з ростом якої різко підвищується швидкість біохімічних реакцій, яке призводить до погіршення якості корму і втрати поживних речовин. Надмірному нагріву силосної маси при заповненні сховищ запобігає інтенсивне трамбування. Досліджено легкий, дешевий, але потужний і продуктивний віброущільнювач для силосування в селянських господарствах сімейного типу. Досліди проведено при заготівлі сінажу із зернофуражних культур. Одержані результати можна використати для характеристики процесу трамбування сінажу із традиційних культур – злакових, бобових і їхніх сумішей. Обрано оптимальні параметри компактного вібратора для малих сховищ. Доведено, що ущільненням силосної маси електричним робочим органом віброударного типу із параметрами, прийнятими для виробничих умов, можна швидко досягти залишкової щільності силосної маси, що дорівнює середній щільності силосної маси в баштових сховищах в процесі зберігання. Найінтенсивніше ущільнюється силосна маса протягом перших 10...30 секунд. Таку тривалість можна взяти за основну для трамбування на одному місці робочими органами ударного типу. Зазначено, що у процесі трамбування силосної маси із злакових трав при радіусі кривошипа 0,03 м, частоті ударів штовхача 8 Гц, тривалості трамбування 10 секунд і масі механізму еквівалентній 80 кг, що припадають на 1 м<sup>2</sup> площі башмака штовхача, досягнуто щільності проби 377 кг/м<sup>3</sup>. Такої щільності можна досягнути, ущільнюючи пробу зеленої маси статичним тиском, що створюється вантажем 1200 кг на 1 м<sup>2</sup> протягом 72 годин.

**Ключові слова:** віброударне навантаження, ущільнення силосу і сінажу, мала механізація.

### **Burnaiev O., Koruniak P., Semerak V., Ponomarenko O., Tymochko V., Horodetskyi I., Mahats M. Experimental study of the influence of vibration load.**

Experiments were conducted to analyze the optimal characteristics of a vibro-impact type compactor for tamping hay and silage in the context of a peasant family farm. The goal was to establish the appropriate duration for compacting silage mass under various conditions and operational modes. When loading chopped plant material into silos or hay storage, it is essential to ram the material constantly. This ramming process ensures compaction and ventilation of the crushed mass, allowing for fresh air to circulate and preventing the material from overheating. Excessive temperatures can accelerate biochemical reactions, leading to a decline in feed quality and nutrient loss. To prevent overheating during the filling of storage, intensive tamping is necessary. The aim of this study is to investigate a lightweight, cost-effective, yet powerful and productive vibratory compactor for use in family farms' silage preparation. The experiments were conducted while preparing hay from grain and fodder crops. The results obtained can be used to characterize the tamping process for traditional silage crops, such as cereals, legumes, and their mixtures. After analyzing the overall results of the experiments, several key findings were established:

- Optimal parameters for a compact vibrator suitable for small storage units have been identified.
- By using a vibration-impact type working body with parameters suitable for production conditions, it is possible to quickly achieve a residual density of the silage mass comparable to the average density found in tower storages during the storage process.
- The silage mass is compacted most efficiently during the first 10 to 30 seconds. This time frame can be considered optimal for tamping in one location using impact-type working bodies.
- In the process of tamping silage made from cereal grasses, a crank radius of 0.03 m, a pusher stroke frequency of 8 Hz, a tamping duration of 10 seconds, and a mechanism weight of 80 kg per square meter of the pusher shoe area resulted in a sample density of 377 kg/m<sup>3</sup>. This density can also be achieved by applying a static pressure from a load of 1200 kg per square meter over a period of 72 hours.

**Keywords:** vibration impact load, silage and hay compaction, small mechanization.

**Постановка проблеми.** Для заготівлі сінажу селянськими господарствами у непромисловому масштабі традиційні траншейні технології замінюють силососховищами невеликої місткості, що вимагають нових засобів малої механізації. Для порівняння у дослідженні прийнято два технологічні процеси заготівлі силосу – традиційний [4; 8-11] з трамбуванням подрібненої рослинної маси трактором Т-150К і експериментальним [3; 12] електричним ущільнювачем віброударного типу для домашніх ферм. Це порівняння не цілком коректне, тому що вказані технологічні процеси не альтернативні. Ці дві машини працюють зовсім у різних умовах. Для трамбування в силососховищах невеликої місткості трактор Т-150К непридатний. А для трамбування у великих траншейних сховищах використовувати ручні ущільнювачі також неможливо, тому що в цих сховищах потрібно ще й розрівнювати подрібнену масу, що трактор виконує одночасно з трамбуванням.

Практика заготівлі силосу і сінажу показує, що при заповненні зеленою масою траншей великої місткості силосна маса інтенсивно самозігрівається через дихання живих рослинних клітин та окислення жирів і вуглеводів. Зі збільшенням температури різко зростає швидкість біологічних і хімічних реакцій. Це призводить до погіршення якості корму і до втрати поживних речовин. Надмірному нагріву силосної маси при заповненні траншей запобігає інтенсивне трамбування.

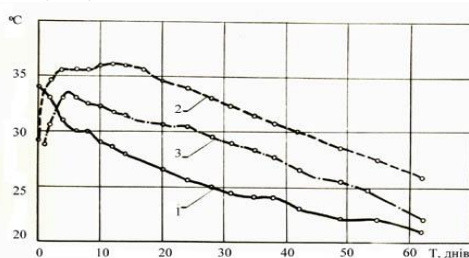
Для визначення температурного режиму в сховищі раніше проводили численні дослідження на сінажній масі. Посередині траншей в сінажну масу були закладені термодавачі з виведеними зовні провідниками. Один давач був установ-

лений на глибині 0,2 м від поверхні сінажної маси, один на віддалі 0,2 м від дна траншей і один на віддалі 0,8 м від дна. Загальна глибина траншей становила 2,2 м.

Результати вимірювань показали, що температура зеленої маси під час заповнення траншей не перевищувала  $33^{\circ}\text{C}$ , що значно нижче, ніж допустима –  $40^{\circ}\text{C}$ . Під час неперервного трамбування верхні шари охолоджувалися до  $27^{\circ}\text{C}$ , а після 5...6-годинної перерви нагрівалися до  $33^{\circ}\text{C}$ . Датчик, встановлений на віддалі 0,2 м від дна, реєстрував більш стабільну температуру –  $32...33^{\circ}\text{C}$ . Це можна пояснити тим, що верхні шари подрібненої маси при трамбуванні добре вентильовалися і температура різко падала, а під час перерви в трамбуванні маса нагрівалася, тому що між частинками рослинної маси залишалося багато свіжого повітря. При трамбуванні нижні шари подрібненої маси вентильовалися незначно, тому їх температура більш стабільна.

Отже, при завантаженні подрібненої рослинної маси на силос або сінаж потрібно постійно здійснювати трамбування, і перерви повинні бути мінімальними. Трамбування викликає вентильовання подрібненої маси, тобто доступ свіжого повітря, проте це не дає можливості нагрітися масі до надмірної температури.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На рис. 1 наведено графік зміни температури сінажної маси в траншей після герметизації протягом часу зберігання. Трамбування [15] цієї траншей при завантаженні здійснювали трактором Т-150К.



**Рис. 1.** Зміна температури сінажної маси в траншей під час зберігання:

1 – на віддалі 0,2 м від дна; 2 – на віддалі 0,8 м від дна; 3 – на глибині 0,2 м від поверхні сінажної маси.

**Fig. 1.** Change in the temperature of the hay mass in the trench during storage:

1 – at a distance of 0.2 m from the bottom; 2 – at a distance of 0.8 m from the bottom; 3 – at a depth of 0.2 m from the surface of the hay mass.

Давач, встановлений на віддалі 0,2 м від дна, показує, що після герметизації траншей в нижніх шарах подрібненої маси температура зразу починає спадати. Це добре узгоджується з фактом, що вуглекислий газ, який утворився від

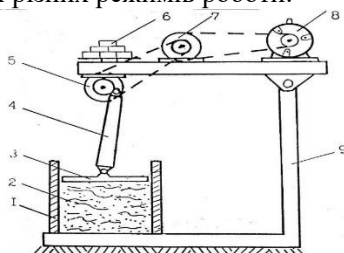
дихання рослин, опускається в нижні шари і тут процеси життєдіяльності клітин рослин і аеробних мікроорганізмів зразу припиняються. При трамбуванні сюди мало проникає свіжого повітря.



Температура верхніх шарів спершу зростає. Це відбувається доти, доки не витратиться весь вільний кисень у повітрі, розташований між частинками подрібненої маси. У цих дослідях температура верхніх шарів різко зростала протягом майже 5 днів. Далі почала спадати. Характер лінії зміни температури на графіку показує, що на верхній шар частково впливали коливання температури атмосферного повітря. У шарі на глибині 0,8 м від дна температура зростала протягом 5 днів і досягла  $38,5^{\circ}\text{C}$ , після чого почала спадати. Вищу температуру в цьому шарі можна пояснити низькою теплопровідністю сінажної маси. У сховищах малої місткості або в секційних сховищах заповнення однієї секції триває короткий час і трамбування подрібненої маси мало впливає на тепловий режим у сховищі. Тому процес трамбування [8-11] в таких сховищах слід розраховувати без урахування наслідків теплового режиму.

**Постановка завдання.** Наше завдання – дослідити легкий, дешевий, але потужний і продуктивний віброущільнювач для впровадження силосування в селянських господарствах сімейного типу. Досліди [4; 6; 13; 15; 16] проведено при заготівлі сінажу із зернофуражних культур. Одержані результати можна використати і для характеристики процесу трамбування сінажу із традиційних культур – злакових, бобових і їх суміші.

**Виклад основного матеріалу.** Проведено експерименти з трамбування сінажу і силосу ущільнювачами віброударного типу в умовах селянського сімейного господарства для перевірки і уточнення передумов для визначення необхідної тривалості ущільнення силосної маси за різних умов і різних режимів роботи.



**Рис. 2.** Схема лабораторної установки: 1 – обичайка; 2 – силосна маса; 3 – опора; 4 – шатун; 5 – кривошипний механізм; 6 – вантаж; 7 – контрпривід; 8 – електродвигун

**Fig. 2.** Scheme of the laboratory installation: 1 – shell; 2 – silage mass; 3 – support; 4 – connecting rod; 5 – crank mechanism; 6 – load; 7 – counter drive; 8 – electric motor.

У результаті проведених дослідів визначено оптимальні режими ущільнення силосної маси. За оптимальні режими ущільнення при-

йнято такі співвідношення між масою ущільнювача (що в дослідях імітується вантажем 6), частотою коливань кривошипного механізму 5, амплітудою коливань штовхача (в дослідях – опори 3) та тривалістю ущільнення, за яких максимальне ущільнення проби силосу ( $450...500\text{ кг/м}^3$ ) здійснюється за мінімальних витрат енергії.

Такий експеримент багатofакторний. Тому був складений раціональний план проведення експерименту. Досліди проведені на подрібненій масі із злакових трав і кукурудзи. Біометричні характеристики матеріалу такі:

**Злакові трави.**

Ботанічний склад: злаки – 90,45%; різнотрав'я – 9,55%. Середня довжина рослин – 62,8 см. Середня довжина січки – 3,22 см. Фаза розвитку – колосіння.

**Кукурудза.**

Довжина рослин – 275 см, співвідношення маси частин рослин: стебла – 64,43%; листя – 11,86%; початки – 23,71%. Фаза розвитку – молочно-воскова стиглість зерен.

Обичайку 1 наповнювали подрібненою зеленою масою, призначеною для заготівлі силосу. Попередньо масу не ущільнювали. Згідно з планом експерименту встановлювали амплітуду і частоту коливань кривошипного механізму. Частоту встановлювали, змінюючи передаточне число пасової і ланцюгової передач від електродвигуна до кривошипного механізму. Амплітуду коливань встановлювали, змінюючи радіус кривошипа. Встановлювали і закріплювали необхідний вантаж 6. Опору 3 із шатуном 4 ставили на пробу силосної маси, вмикали електродвигун. Під дією ударів, що здійснюються кривошипом через шатун і опору, зелена маса ущільнюється. Через певний час, що вибраний згідно з планом експерименту, електродвигун вимикали, опору 3 піднімали із камери ущільнення зеленої маси, залишкову висоту проби вимірювали і записували у журнал спостережень. Після цього пробу висипали із камери і зважували. Виходячи із розмірів проби і її ваги, визначали залишкову щільність проби зеленої маси.

Далі насипали свіжу зелену масу в обичайку 1, відповідно до плану експерименту встановлювали нові частоту і амплітуду коливань та інший вантаж. Дослід повторювали.

**Результати експериментів.**

У результаті обробки експериментальних даних одержана формула, яка виражає функціональну залежність залишкової щільності утрамбованої силосної маси  $\gamma$  від факторів, що впливають на процес ущільнення.

Для злакових трав ця залежність така:

$$\gamma = 0,04 \cdot \left(\frac{M_0}{S}\right)^{0,61} \cdot \ln(t+1) \cdot (f^{2,39} \cdot R^{0,41} + 1) + 0,79 \cdot W^{1,3} + 38,53, \quad (1)$$

де  $M_0$  – маса механізму, кг;  $S$  – площа опори штовхача, м<sup>2</sup>;  $f$  – частота ударів штовхача, Гц;  $R$  – радіус кривошипа, м;  $t$  – тривалість трамбування, с;  $W$  – вологість, %.

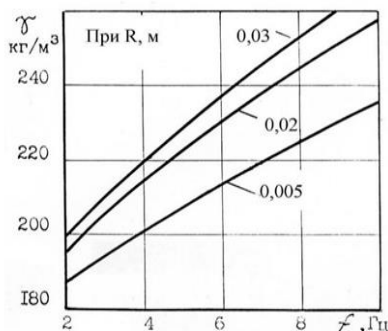
Для кукурудзи залишкова щільність виражається аналогічною залежністю:

$$\gamma = 0,31 \cdot \left(\frac{M}{S}\right)^{0,45} \cdot \ln(t+1) \cdot (f^{2,12} \cdot R^{0,67} + 1) + 1,31 \cdot W^{1,3} + 50,3. \quad (2)$$

Для аналізу впливу кожного фактора на процес ущільнення за приведеними залежностями побудовані окремі графіки. На рис. 3 зображений графік залежності залишкової щільності від частоти ударів штовхача. Цей графік належить до випадку, коли робочим матеріалом була подрібнена маса із злакових трав вологістю 50%.

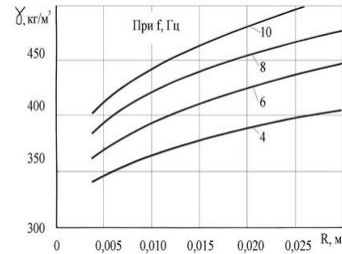
Графічний вигляд приведених залежностей свідчить про те, що частота ударів – найвпливовіший фактор. В умовах дослідів ця функція не досягає екстремуму, який був би критичним значенням частоти при виборі її оптимальних значень. Тому за оптимальне потрібно приймати найбільше із можливих значень частоти з врахуванням конструктивних можливостей кривошипного механізму.

На рис. 4 зображений графік залежності залишкової щільності силосної маси із кукурудзи від радіуса кривошипа, тобто від амплітуди коливань штовхача. Графік належить до випадку, коли тривалість трамбування дорівнювала 10 секундам. Графік побудований для чотирьох значень частоти коливань штовхача і показує, що із збільшенням радіуса кривошипа різко зростає залишкова щільність, хоча не так інтенсивно, як при зростанні частоти. При виборі параметрів конструкції ущільнювача радіус кривошипа потрібно вибирати максимальний, із конструктивно можливих значень.



**Рис. 3.** Залежність величини залишкової щільності силосної маси вологістю 50% від частоти ударів штовхача для тривалості трамбування 10 с

**Fig. 3.** Dependence of the value of the residual density of the silage mass with a moisture content of 50% on the frequency of blows of the pusher for a duration of tamping of 10 s



**Рис. 4.** Залежність величини залишкової щільності утрамбованої силосної маси із кукурудзи вологістю 70% від радіуса кривошипа для тривалості трамбування 10 с

**Fig. 4.** Dependence of the value of the residual density of the compacted corn silage mass with a moisture content of 70% on the radius of the crank for the duration of tamping of 10 s

На рис. 5 зображений графік залежності залишкової щільності силосної маси із кукурудзи вологістю 70% від тривалості трамбування при різній частоті ударів штовхача. Для злакових трав ця залежність аналогічна.

Графік показує, що найінтенсивніше ущільнення проходить у перші 5...10 секунд. Далі воно продовжується, але менш інтенсивно. Тривалість трамбування не є параметром ущільнювача. Його потрібно враховувати лише з технологічної точки зору процесу трамбування. Але при виборі конструкції ущільнювача ефект від тривалості трамбування враховується. Враховуючи характер впливу тривалості трамбування на залишкову щільність силосної маси, а також умови роботи ущільнювача, можна для розрахунків вважати доцільним прийняти тривалість трамбування на одному місці в межах 10...30 секунд.

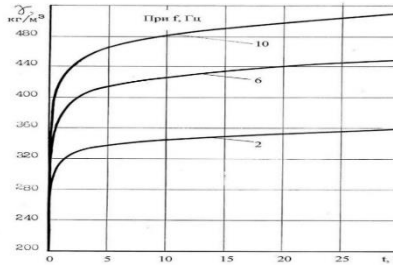
Проаналізувавши загалом результати експериментів, можна констатувати:

- ущільненням силосної маси робочим органом віброударного типу із параметрами, прийнятими для виробничих умов, можна досягти залишкової щільності силосної маси, що дорівнює середній щільності силосної маси в баштових сховищах в процесі зберігання.

- найінтенсивніше ущільнюється силосна маса протягом перших 10...30 секунд. Таку тривалість можна вважати основною для трамбування на одному місці вібраційними робочими органами;

- у процесі трамбування силосної маси із злакових трав при радіусі кривошипа 0,03 м, частоті штовхача 8 Гц, тривалості трамбування 10 секунд і масі механізму еквівалентній 80 кг, що припадають на 1 м<sup>2</sup> площі башмака штовхача, досягнута щільність проби 377 кг/м<sup>3</sup>.

Такої щільності можна досягнути, ущільнюючи пробу зеленої маси статичним тиском, що створюється вантажем 1200 кг на 1 м<sup>2</sup> протягом 72 годин.



**Рис. 5.** Залежність величини залишкової щільності силосної маси із кукурудзи вологістю 70% від тривалості трамбування для радіуса кривошипа 0,02 м  
**Fig. 5.** Dependence of residual density corn silage with a moisture content of 70% on the duration of tamping for a crank radius of 0.02 m

### Виробничі випробування експериментального зразка ущільнювача

Експериментальний зразок віброущільнювача виготовлений із параметрами, оптимальні значення яких визначені при дослідженні режимів ущільнення силосної та сінажної маси. Попередні випробування експериментального зразка ущільнювача перевірені в лабораторних умовах, наближених до виробничих. При цьому визначали такі показники:

- ступінь ущільнення зеленої маси залежно від тривалості трамбування;
- витрати електроенергії й часу праці людини на одиницю продукції. Ступінь ущільнення зеленої маси залежно від тривалості вібровпливу.

Дослідження проведені в такій послідовності. У металевий ящик із квадратним дном 1,7×1,7 м і висотою 85 см була насипана подрібнена зелена маса кукурудзи (вологість 70,3%, встановлена довжина різки – 1 см, середня довжина – 1,84 см, кількість зеленої маси – 498,5 кг). На поверхню зеленої маси опускали ущільнювач, вмикали електродвигун і починали процес ущільнення. Ущільнювач по чергово переносили з місця на місце по поверхні зеленої маси. Через певні проміжки часу вимірювали висоту шару зеленої маси і записували у відомість. Потужність двигуна визначали за величиною сили струму, що споживається електродвигуном. Для цього використовували спеціальний прилад Ц -90.

Дослід продовжували до практично повного ущільнення. Отримані результати порівнювали із експериментами на лабораторній установці.

Виробничі випробування ущільнювача проведено з врахуванням вимог керівних нор-

мативних документів КНД-3-6-93 і КНД 46.16.02.12-96 [1-13].

Випробування проведені в умовах селянського господарства. Ущільнювач працював на ущільненні подрібненої зеленої маси із кукурудзи. Вологість – 59,5%, середня довжина подрібнених частинок – 18,5 см. Бетонувана силосна яма була діаметром 1,5 м і глибиною 2,85 м. Вона розрахована на силос для однієї корови. В яму помістилось 1650 кг зеленої маси.

Випробування проведено в такій послідовності. Із автомобіля-самоскида подрібнена комбайном КСС-2,6 зелена маса висипана на подвір'ї на віддалі до 4 м від силосної ями. Із купи зелену масу вручну набирали в кошики і висипали в яму. Через кожних 200...300 кг масу в ямі вирівнювали і ущільнювали експериментальним ущільнювачем. Так повторювали до моменту заповнення ями. Після заповнення ями подрібнену масу трамбували до повного ущільнення. На операції ущільнення проводили хронометраж. На інших роботах хронометраж не робили, бо вони були не типовими і висновку зробити з такого хронометражу не було потреби.

У результаті одержали такі показники:

- продуктивність основного часу роботи ущільнювача, т/год;
- потужність електроприводу, кВт;
- питомі витрати електроенергії, кВт.год/т;
- ступінь ущільнення подрібненої маси, кг/м<sup>2</sup>;
- необхідну кількість обслуговуючого персоналу, чол.

Схема ущільнювача силосу зображена на рис. 6. Конструкція складається з ущільнюючої плити 1, шатуна 2, кривошипа 3, валу 4, елек-

тродвигуна 7 і клинопасової передачі від електродвигуна до валу. Маса ущільнювача становить 250 кг, потужність електродвигуна – 11 кВт, частота опори об кормову масу – 8 Гц. Конструкцією передбачена зміна радіуса кривошипа, що видно на рис. 6. Це потрібно для того, щоб у процесі перевірки роботи ущільнювача вибрати такий радіус, який забезпечив би завантаження електродвигуна на 70...90% потужності. В подальшому був вибраний радіус кривошипа 3 см (амплітуда коливань – 6 см). З таким радіусом кривошипа були проведені всі заплановані досліди і виробничі випробування. Теоретичні розрахунки показують, що при вказаних параметрах сила удару може досягати 17 000Н (приблизно 1 700 кгс). Для переміщення ущільнювача по площі сховища виготовлена тринога, до якої на тросі з лебідкою підвішений ущільнювач. При потребі тринога може легко переставлятися, щоб охопити всю площу сховища.

#### Виробничі випробування

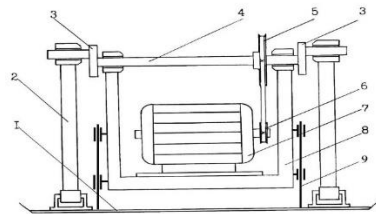
Попередні випробування експериментального зразка ущільнювача провели в лабораторних умовах. Подрібнену масу в кількості 498,5 кг в металевому ящику розміром 1,7×1,7×0,85 м ущільнювали протягом 55 хвилин. Зміна щільності подрібненої маси показана на рис.8. На осі абсцис позначені питомі витрати часу на ущільнення (у хвилинах на квадратний метр площі поверхні подрібненої маси). Із графіка випливає, що для ущільнення верхнього шару подрібненої зеленої маси розробленим ущільнювачем віброударного типу із вказаними вище параметрами потрібно витратити близько 15 хвилин часу на кожний квадратний метр поверхні подрібненої маси.

Отож, для ущільнення верхнього шару подрібненої маси із кукурудзи у сховищі з найбільш імовірною площею 3х6=18 м<sup>2</sup> потрібно витратити 4,5 години. Після закінчення ущільнення визначили розподіл щільності подрібненої маси за товщиною шару. Як зазначено в методиці досліджень, після взяття проб, їх зважування і проведених розрахунків побудований відповідний графік (рис. 7). На графіку вісь абсцис  $h$  показує глибину розміщення проби в шарі, а на осі ординат відкладені значення щільності (у кг/м<sup>3</sup>). Цю залежність описують формулою

$$\gamma = 330,9 \cdot h^{1,08} + 227 \quad (3)$$

У результаті встановлено, що після ущільнення подрібненої маси протягом 45 хвилин (що відповідає питомим витратам часу 15,1 хв/м<sup>2</sup>) маса ущільнилась з 197,6 (насіпна щільність) до 383,5 кг/м<sup>3</sup>. При цьому середня щільність усього об'єму досягла 357,6 кг/м<sup>3</sup>. Ці

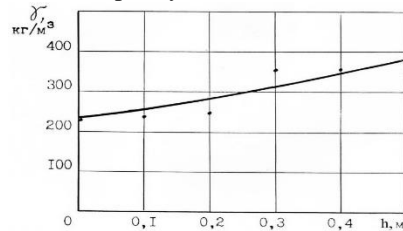
дані стосуються тільки поверхневого шару. Варто зауважити: під час роботи ущільнювача вібрація передається за межі захвату опори і верхній шар навколо неї частково розрихлюється. Але розрихлення поверхні виявлено лише на глибину 5...10 см. Це практично не впливає на процес ущільнення. У процесі заготівлі силосу в умовах селянського господарства ущільнення подрібненої маси здійснювали упродовж усього часу заповнення сховища. Після заповнення масу ущільнювали до припинення зменшення товщини шару. Процес ущільнення маси після заповнення сховища показаний на графіку (рис. 8).



**Рис. 6.** Схема експериментального ущільнювача: 1 – опора; 2 – шатун; 3 – кривошип; 4 – вал; 5 і 6 – шків; 7 – електродвигун; 8 – рама

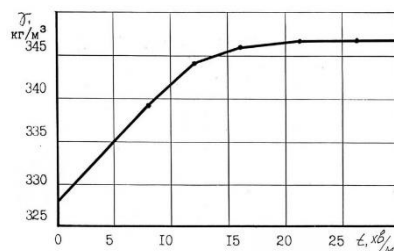
#### Fig. 6. Scheme of the experimental seal:

1 – support; 2 – connecting rod; 3 – crank; 4 – shaft; 5 and 6 – pulleys; 7 electric motor; 8 – frame



**Рис. 7.** Розподіл щільності силосної маси за товщиною поверхневого шару у сховищі

**Fig. 7.** Distribution of the density of the silage mass by the thickness of the surface layer in the storage



**Рис. 8.** Зміна середньої щільності подрібненої маси в залежності від тривалості трамбування (після заповнення сховища і 17 годин перерви)

**Fig. 8.** Change in average density of crushed mass depending on the duration of tamping (after filling the storage and 17 hours of break)

У результаті виробничого випробування ущільнювача одержали такі дані:

- продуктивність чистої роботи ущільнювача становить 3,27 т/год;
- потужність, яку споживає ущільнювач, – 9,9 кВт;
- питомі витрати енергії – 3,02 кВт.год/т;

- щільність подрібненої маси за вологості 59,5% –  $347,4 \text{ кг/м}^3$  (це відповідає щільності подрібненої маси в перерахунку на вологість 70% з врахуванням наявної сухої речовини –  $442,8 \text{ кг/м}^3$ );

- необхідна кількість обслуговуючого персоналу – 2 чоловіки.

У процесі виробничої перевірки виявлено такі недоліки:

а) установка потребує ручної підтримки у вертикальному положенні під час роботи. Для цього потрібний додатковий пристрій, який би не допускав перекидання установки при роботі. З таким пристроєм установку може обслуговувати одна людина;

б) у процесі роботи між корпусом ущільнювача і опорою набивається подрібнена маса, що потребує регулярної очистки;

г) тринога для підвішування ущільнювача над силосною ямою дуже обмежує маневреність установки. Підвіска повинна забезпечувати легке і зручне переміщення ущільнювача по площі сховища, це може бути найпростіша кран-балка з ручним приводом.

г) для опускання і піднімання ущільнювача за допомогою ручної лебідки потрібно докладати великих зусиль. Для цього потрібний електричний привід.

Отже, розроблена установка працездатна, якість її роботи відповідає агрозоотехнічним вимогам на процес заготівлі силосу та сінажу, витрати енергії та праці людини допустимі для умов селянських господарств регіону. Установку можна рекомендувати для впровадження у виробництво.

### Висновки

1. Досліджено закономірності ущільнення силосної маси ущільнювачем віброударної дії у сховищах малої місткості.

2. Встановлені аналітичні залежності між кінематичними і динамічними параметрами конструкції ущільнювача, залежності від них зусиль ущільнення і енергетичних витрат:

- сили трамбування пропорційні масам складових частин системи вібрації, радіусу кривошипа і квадратів частоти коливань;

- споживана енергія електродвигуна при вібрації пропорційна масам складових частин системи, квадратів радіуса кривошипа і квадратів частоти коливань;

- споживана потужність пропорційна масам складових частин системи, квадратів радіуса кривошипа і кубові частоти коливань.

3. На основі аналітичних досліджень встановлено, що важливим фактором, який впливає на ефективність ущільнення кормової маси, є

робота вібратора в режимі резонансу. Визначені співвідношення між амплітудою коливань вібратора і радіусом кривошипа для роботи в режимі резонансу. Це співвідношення не залежить від мас складових частин системи вібрації.

4. У конструкції ущільнювача кормової маси повинно бути передбачене ручне або автоматичне керування частотою обертань кривошипа з метою підтримання роботи ущільнювача в режимі резонансу.

5. Визначені аналітичні залежності залишкової щільності силосної і сінажної маси від факторів, що діють у процесі ущільнення за допомогою робочого органа віброударного типу. Ці залежності є основою для вибору конструкційних параметрів ущільнювача. Найінтенсивніше ущільнюється силосна маса протягом перших 10...15 секунд. Таку тривалість можна прийняти як розрахункову для трамбування на одному місці.

6. У процесі трамбування силосної маси із злакових трав з вологістю 50 відсотків при радіусі кривошипа 0,03 м, частоті ударів штовхача 8 Гц, тривалості трамбування 10 с і масі механізму, еквівалентній 80 кг, що припадають на  $1 \text{ м}^2$  площі опори штовхача, досягнута щільність проби  $337 \text{ кг/м}^3$ . Такої щільності можна досягнути, ущільнюючи пробу статичним тиском, що створюється вантажем  $1200 \text{ кг}$  на  $1 \text{ м}^2$  протягом 72 годин.

Для експериментального ущільнювача вибрані такі технічні параметри:

- потужність – 10 кВт;

- маса – 250 кг;

- радіус кривошипа – 3 см;

- частота штовхача – 8 Гц;

- площа опори штовхача –  $0,35 \text{ м}^2$ ;

Експериментально визначений розподіл щільності за товщиною поверхневого шару подрібненої кукурудзи після завершення трамбування експериментальним ущільнювачем. Встановлено, що для шару товщиною 50 см щільність зростає з глибиною від 227 до  $383,5 \text{ кг/м}^3$  за середньої щільності  $357,6 \text{ кг/м}^3$ .

7. Проведене випробування експериментального зразка ущільнювача силосу і сінажу в умовах селянського господарства. Одержали такі дані:

- продуктивність чистої роботи – 3, 27 т/год;

- потужність, яку споживає ущільнювач – 9,9 кВт;

- питомі витрати енергії – 3,02 кВт.год/т;

- щільність подрібненої зеленої маси при вологості 59,5% –  $347,4 \text{ кг/м}^3$  (у перерахунку на 70% вологості з врахуванням наявної сухої речовини це відповідає щільності  $442,8 \text{ кг/м}^3$ ).

8. Випробування ущільнювача в умовах селянського господарства показали, що розроблена установка працездатна, якість її роботи відповідає агрозоотехнічним вимогам на процес заготівлі подрібненої зеленої маси, витрати енергії та живої праці людини допустимі для умов селянських господарств регіону. Економічна оцінка розробленого ущільнювача показала, що приведені витрати на трамбування, які припадають на одну тонну корму, при його роботі нижчі, ніж при роботі на трамбуванні трактора Т-150К.

#### Бібліографічний список

1. Випробування сільськогосподарської техніки. Методи вимірювання і аналізування вібрації механізмів та вузлів. СОУ 74.3-37-134:2004, 2006-08-01 РД 10.2.34-91
2. Техніка сільськогосподарська. Методика випробувань елементної бази на віброміцність та вібростійкість. М 46.16.02.07-96, 1997-03-01
3. Техніка сільськогосподарська. Машина і обладнання для заготівлі кормів нетрадиційними методами (консервування в полімерних рукавах, обмотування рулонів та тюків плівкою). Методи випробувань. ГСТУ 46.013-2000, 2001-02-01
4. Мала механізація. Робочі органи. Параметри та приєднувальні розміри/ ГСТУ 3-37-126-96, 1996-07-01
5. Техніка сільськогосподарська. Машина та установки сушильні. Методи функціональних випробувань. КНД 46.16.10.01-94, 1994-06-01
6. Сільськогосподарська техніка. Обладнання для вирощування та відгодівлі великої рогатої худоби. Методи випробувань. СОУ 74.3-37-730:2009, 2010-01-01
7. Техніка сільськогосподарська. Комплекси обладнання для молочних ферм. Методи випробувань. СОУ 74.3-37-274:2005, 2006-08-01
8. Випробування сільськогосподарської техніки. Машина і обладнання для тваринництва і кормовиробництва. Методи оцінки безпечності і ергономічності. СОУ 74.3-37-133:2004, 2006-08-01
9. Корми рослинні. Сінаж. Заготівля та зберігання. Типовий технологічний процес. Настанова 01.3-37-63:2005, 2006-01-01
10. Корми рослинні. Силос із зелених рослин. Заготівля і зберігання. Типовий технологічний процес. Настанова 01.3-37-61:2005, 2006-01-01.
11. Корми для тварин. Соево-кукурудзяна суміш для заготівлі силосу консервованого. Технічні умови. СОУ 15.71-37-542:2007, 2007-09-01
12. Техніка сільськогосподарська. Машина та обладнання для приготування кормів. Методи функціональних випробувань. ГСТУ 46.007-2000, 2001-01-01 РД 10.19.2-
13. Методика оцінки якості виготовлення та прогнозування надійності і конкурентоспроможності сільськогосподарської техніки на стадії її розробки, випробувань і виробництва. М 46.16.02.09-2000, 2001-06-01.
14. Нормативи трудомісткості випробувань техніки для кормовиробництва і тваринництва. МР 46.16.02.04-95, 1996-01-02.
15. Техніка сільськогосподарська. Випробування. Методи визначення біоенергетичної ефективності машин для рослинництва. КНД 46.16.02.11-95, 1996-04-01
16. Випробування сільськогосподарської техніки. Оцінювання показників надійності при скорочених ресурсних випробуваннях. СОУ 74.3-37-04604309-904:2011, 2011-05-01

*Стаття надійшла 15.05.2024*

### ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

---

УДК 631.171

#### ІННОВАЦІЙНІ ГІС-ТЕХНОЛОГІЇ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ НА БАЗІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ *EOSDA CROP MONITORING*

*Оксана Березовецька, доктор філософії, Андрій Шарибура, к.т.н.,  
Олег Крупич, к.т.н., Сергій Березовецький, к.т.н.*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: shtoykoog@gmail.com; ascharibura@gmail.com;  
krupycholeh@gmail.com; qsikoq@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.055>

#### **Березовецька О., Шарибура А., Крупич О., Березовецький С. Інноваційні ГІС-технології в сільському господарстві на базі автоматизованої платформи *EOSDA CROP MONITORING***

Інноваційні ГІС-технології на базі автоматизованої платформи *EOSDA Crop Monitoring* відіграють ключову роль у модернізації сільського господарства, забезпечуючи можливість швидкого збору та аналізу польових даних. Ці дані надаються не тільки з традиційних земельних установок, але й за допомогою супутникового моніторингу та дронів, що дозволяє отримати точну інформацію про стан полів, рослин та кліматичні умови.

Одним із основних напрямків використання таких даних є прогнозування врожайності, що дозволяє фермерам заздалегідь планувати свої дії, знижуючи ризики втрат та оптимізуючи використання ресурсів. Технології точного землеробства на основі ГІС (геоінформаційні системи) дають можливість регулювати кількість добрив та засобів захисту рослин на конкретних ділянках поля, що забезпечує ефективність господарства.

Платформа *EOSDA Crop Monitoring* дає змогу відстежити переміщення та чисельність худоби, що має вирішальне значення для управління великими сільськогосподарськими підприємствами. Інтеграція супутникових даних з іншими джерелами інформації, створеними підприємствами різного масштабу, досягає не лише короткострокових фінансових результатів, але й сприяє реалізації довгострокових цілей сталого розвитку в агросекторі.

Платформа також має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що робить технологію доступною для малих фермерських господарств. Впровадження інноваційних ГІС-технологій дозволяє оцінювати ризики, пов'язані з кліматичними змінами, шкідниками та хворобами рослин. Точне дозування добрив і пестицидів зменшує їхнє використання, покращуючи якість ґрунту. Інтегровані системи підтримки ухвалення рішень забезпечують рекомендації для оптимізації агрономічних практик. Важливу роль відіграє також співпраця між учасниками аграрного сектору, що сприяє спільному розвитку та обміну знаннями.

**Ключові слова:** геоінформаційні системи, платформа, аналіз даних, прогнозування врожайності посівів.

#### **Berezovetska O., Sharybura A., Krupych O., Berezovetskiy S. Innovative GIS-technologies in agriculture based on the automated platform *EOSDA CROP MONITORING***

Innovative GIS technologies based on the *EOSDA Crop Monitoring* automated platform play a key role in the modernization of agriculture, providing the ability to quickly collect and analyze field data. This information is gathered not only from traditional ground installations but also through satellite monitoring and drones, facilitating accurate assessments of field conditions, plant health, and climatic factors.

One of the primary applications of this data is yield forecasting, which empowers farmers to strategize in advance. This proactive approach reduces the risk of losses and optimizes resource utilization. GIS-based precision farming technologies enable the precise regulation of fertilizers and plant protection products in specific areas of the field, thereby enhancing farm efficiency.

Furthermore, the *EOSDA Crop Monitoring* platform provides tools for tracking livestock movements and populations, which is essential for managing large agricultural operations. By integrating satellite data with information from various enterprise sources, the platform achieves short-term financial outcomes and supports long-term sustainable development goals within the agricultural sector.

The platform features an intuitive interface, making these technologies accessible to small farms. The adoption of innovative GIS technologies helps assess risks linked to climate change, pests, and plant diseases. Additionally, accurate dosing of fertilizers and pesticides minimizes their usage, improving soil quality. Integrated decision support

systems offer recommendations to optimize agronomic practices. Collaboration among stakeholders in the agricultural sector is crucial, as it encourages joint development and knowledge sharing.

**Keywords:** geoinformation systems, program, data analysis, crop yield forecasting.

**Постановка проблеми.** Отримана за допомогою ГІС-технологій візуалізація даних у сільському господарстві дає змогу визначати шляхи і закономірності росту рослин, вчасно виявляти різноманітні зміни та усувати виявлені проблеми. У точному землеробстві ГІС-технології застосовують для оптимізації процесу збирання та обробки масиву даних про поля і сприяють правильному вибору ефективних управлінських рішень [5; 6]. Агросектор, застосовуючи ГІС-технології для дистанційного моніторингу великих площ і швидкого реагування на виявлені проблеми, може підтримувати високу продуктивність [1]. Саме через це ГІС-вирішення поставлених задач, з можливістю багатофакторної оцінки проблем, мають популярність у різних галузях сільського господарства. Ці технології складаються з апаратного і програмного забезпечення. Щодо апаратного забезпечення, то до нього належать такі пристрої, як персональні комп'ютери, ноутбуки, планшети, а також дрони і супутники [3]. Для створення карт застосовують спеціалізоване (профільне) програмне забезпечення. Карті відображають георозташування і вегетаційний стан культур, різновиди ґрунту, добрив тощо [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наукові технології всіх галузей промисловості постійно оновлюються і вдосконалюються, і сільське господарство не виняток, тому всі підприємства змушені відмовлятися від старих технологій і застосовувати нові, що покращить продуктивність, якість, кількість продукції тощо [3; 4; 7].

ГІС відрізняються від інших тим, що мають ефективні можливості аналізу просторових даних і на його основі можуть виконувати просторове моделювання об'єктів, процесів та явищ. Сучасні ГІС володіють потужним інструментарієм для просторового аналізу. Саме тому просторовий аналіз називають «серцем» ГІС, які дозволяють зберігати величезні об'єми різноманітних даних у розподілених базах даних, узагальнювати й аналізувати інформацію набагато швидше, ніж будь-які інші традиційні методи досліджень. Аналітичні можливості ГІС дозволяють отримувати відповіді на безліч просторових запитів, вирішувати величезну кількість просторових задач у різних предметних галузях. Усе розмаїття задач просторового аналізу можна умовно поділити на 5 узагальнених категорій: 1) аналіз місця розташування; 2) задоволення просторових умов; 3) часо-

вий аналіз; 4) виявлення структури; 5) оцінка різноманітних сценаріїв [12].

Сучасні ГІС мають потужний інструментарій для візуалізації інформації. Тематична інформація в ГІС відображається за допомогою картографічних образів, діаграм, графіків, оформлених багатим арсеналом образотворчих засобів, адаптованих для зручного сприйняття інформації [12].

Аналіз процесів реформування земельних відносин показав, що впродовж останніх років значно збільшилася кількість сільськогосподарських. Це свідчить про необхідність трансформації механізму регулювання земельних відносин, пов'язаного із загостренням проблеми раціонального використання земель, тобто є необхідність у пошуку новітніх наукових підходів до розроблення оптимізованих моделей структури земель сільського господарства [3; 7].

Використовуючи геоінформаційні системи, можемо перейти до нового рівня інформації про земельні ресурси. Сьогодні багато науковців, зокрема із сільського господарства, вирішують питання ефективного застосування у господарствах ГІС-технологій під час управління земельними ресурсами [7-9].

Сканування поверхні нашої планети з повітря чи космосу називається дистанційним зондуванням. Світлини, які робить супутник «*Landsat*» та «*Sentinel*», є середньої роздільної здатності, і їх застосовують для моніторингу посівів, наявності шкідників, вологості тощо. Завдяки геоінформаційним технологіям сільського господарства зібрана інформація візуалізується як цифрові зображення. Це зроблено для того, щоб більш ефективно вирішувати такі завдання, як зрошування чи наявність хворіб рослин у стеблостоях [10].

Для багатьох головна проблема використання знімків дослідницьких супутників – частота оновлюваності світлин. Супутники *Landsat* 7, 8 фотографують поверхню один раз у вісім днів, *Sentinel 2a, 2b* – 1 раз на 3-5 днів. Також можуть використовуватись щоденні світлини супутників *Terra* та *Aqua*, але вони мають низьку роздільну здатність (від 250 м). Через це *EOSDA* планують до кінця 2025 року запустити власне сузір'я супутників *EOS SAT*, першим агроорієнтованим сузір'ям серед компаній, які використовують технологію дистанційного зондування. Це буде комерційне рішення, орієнтоване під аграрні господарства всіх типів. Сьогодні для отримання даних *EOSDA* використовує



світлина супутників *Landsat-8* та *Sentinel-2* (роздільна здатність до 10 м).

Також доступні дані з радарних та оптичних систем супутникового спостереження, таких як *SMAP*, *AMSR*, *SPOT* [13].



**Рис. 1.** Оцінка технологічного процесу внесення мінеральних добрив на основі даних з обладнання на полях

**Fig. 1.** Assessment of the technological process of applying mineral fertilizers based on data from field equipment

Спеціалісти EOSDA не працюють із «сирими» даними (як це робить багато компаній). Вони аналізують хмарність, ідентифікують тіні на світликах, вирівнюють і опрацьовують дані в ручному режимі, завдяки чому клієнти отримують на 10-12 світлин на рік більше, ніж у конкурентів [8; 13].

Упровадження ГІС- та GPS-технологій у сільське господарство уможливило збір даних в online-режимі реального часу з прив'язкою до географічних координат, що дозволяє аналізувати сорти сільськогосподарських культур, рівнів рельєфу, меж полів тощо. Водночас GPS-давачі техніки сільськогосподарського призначення на полях (рис. 1) застосовуються для доповнення отриманої інформації із супутників (наприклад, давачі на комбайнах, сівалках тощо) та іншої сільськогосподарської техніки. І можна аналізувати різні показники стану посівів із зазначенням конкретної ділянки поля у режимі реального часу [12; 13].

**Постановка завдання.** Застосування геоінформаційних систем дає змогу збільшити масштаби виробництва, зменшити витрати на обробіток, кількість добрив, збирання і транспортування, а також передбачити врожай та обсяг збуту. Геоінформаційна система може аналізувати велику кількість даних одночасно: електронні карти вирощування сільськогосподарських культур; інформацію про вміст мінеральних речовин у ґрунті та його характеристики; рельєф; погода, клімат; врожайність; інформація про внесення добрив, хімічну обробку; дані про захворювання сільськогосподарських культур, шкідників; інформацію про збут продукції; дані про можливий обсяг для зберігання сільськогосподарської продукції. Обробити таку кількість даних без застосування єдиної системи

аналітики нереально, оскільки це важкий та довготривалий процес [12].

Для ухвалення єдиного правильного рішення потрібно багато часу і висококваліфікованих фахівців. Програмне забезпечення для нього наповнене залежно від поставлених завдань – одні показують вид сільськогосподарської культури, інші – вологість ґрунту тощо [15].

**Виклад основного матеріалу.** Дискусійне питання українських аграріїв під час війни – чи на часі впровадження технологій точного землеробства. Зрозуміло, що всі сьогодні вимушені економити, та що краще економити: гроші чи ресурси? Оскільки впровадження технологій точного землеробства не з дешевих, для того, щоб зекономити, доводиться витратити. Особливість супутникового моніторингу в тому, що це один із найдоступніших інструментів для оптимізації агровиробництва [13].

Коли йдеться про геоінформаційні системи (ГІС) і технології супутникового моніторингу в сільському господарстві, до конкурентів EOSDA (*EOS Data Analytics*) входять такі компанії, як *Planet Labs*, *Sentinel Hub* та *John Deere Operations Center*. Кожна з цих платформ має свої особливості:

*Planet Labs* пропонує високочастотні супутникові знімки Землі з даними високої роздільної здатності. Їхні супутники знімають земну поверхню майже щодня, що дозволяє отримувати актуальні зображення для моніторингу змін у полях і виявлення проблем із урожаєм в режимі реального часу [16].

Сервіс *Sentinel Hub* надає доступ до даних із супутників *Sentinel* (програма Європейського космічного агентства *Copernicus*). *Sentinel Hub* спеціалізується на великомасштабному аналізі й пропонує безкоштовний доступ до супутни-

кових даних, що дозволяє фермерам отримувати зображення для аналізу стану рослинності, вологості ґрунту та інших параметрів [17].

Платформа *John Deere Operations Center* дозволяє фермерам аналізувати та керувати даними безпосередньо з техніки John Deere. Вона інтегрує польові дані з різних джерел і пропонує комплексне рішення для управління обладнанням, спостереженням за полями та підвищення ефективності операцій [18].

*EOSDA Crop Monitoring* – це інноваційна платформа, яка комбінує супутникові знімки та аналітичні інструменти для моніторингу полів, прогнозування врожаю, відстеження стану посівів та управління ресурсами. Платформа виділяється інтуїтивним інтерфейсом і можливістю швидкого аналізу великих обсягів даних для ухвалення аграрних рішень [19; 20].

Супутники дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) надають цінну інформацію для аналізу стану посівів та умов росту рослин. Компанія *EOS Data Analytics (EOSDA)* – це глобальний провайдер аналітики супутникових даних із клієнтською базою понад 700 тис. користувачів по всьому світу, який співпрацює з державними, комерційними та науковими організаціями. Компанія застосовує технології ДЗЗ для надання послуг у понад 20 галузях,

зокрема для аграріїв. Основним продуктом *EOSDA* у сільськогосподарській галузі є *EOS Crop Monitoring*, онлайн-сервіс для супутникового моніторингу полів, який збирає всю важливу інформацію щодо стану посівів в одному місці.

Моніторинг за допомогою автоматизованої платформи *EOSDA Crop Monitoring* дає змогу дистанційно управляти полями за допомогою однієї платформи. Ця платформа є хорошим прикладом застосування ГІС-технологій в аграрній сфері, яка містить архівні дані про поля, точні прогнози погоди на 2 тижні тощо. Такий функціонал універсальної платформи наочно показує важливість використання геоінформаційних систем у сільському господарстві [13].

Геоінформаційні системи дозволяють створювати карти вегетації та продуктивності полів, а це водночас допомагає відразу оптимізувати управлінські рішення в аграрному комплексі. Для контролю полів за вмістом калійно-фосфорних добрив, на платформі *EOSDA Crop Monitoring*, створюючи карти продуктивності полів, можемо використовувати дані за попередні роки, які допомагають визначити ділянки полів, що потребують додаткової обробки (рис. 2) [2; 8].



**Рис. 2.** Карта продуктивності на основі архівних даних із визначенням ділянок полів, що потребують додаткової обробки

**Fig. 2.** Productivity map based on archived data, identifying areas of fields that need additional processing

Моніторинг стану посівів, проведений вручну, – повільний та трудомісткий метод контролю стану посівів на великих сільськогосподарських площах. Тут зондування та ГІС-технології допомагають розв’язати цю задачу. Геоінформаційні системи в точному землеробстві дають змогу визначити, які саме рослини на угіддях потребують догляду особливого значення (наприклад, завдяки *GPS*-давачам можна відстежувати температуру культур, яка, найпевніше, вказує на наявність хвороби, шкідників або обезводнення рослин) [15].

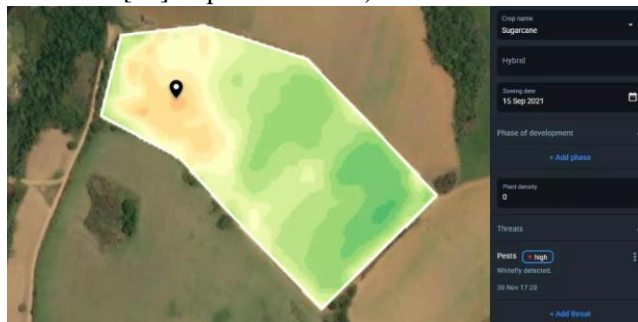
Сучасні ГІС-технології для сільського господарства – настільки універсальні засоби контролю, що підходять також для відстеження

переміщення худоби. Завдяки цьому фермери мають можливість проводити моніторинг випасу худоби, стежити за її станом здоров’ям, плодючістю, харчуванням, розвитком тощо [11]. Однак для того, щоб почати використовувати відповідний модуль програми, необхідні трекери, які встановлені безпосередньо на тваринах та портативний пристрій, який отримуватиме та відображатиме дані трансльовані цими трекерами.

Завдяки вегетаційним індексам на універсальній платформі *EOSDA Crop Monitoring* можна виявляти різноманітні небезпеки на полях, такі як забур’яненість посівів чи хвороби культурних рослин [13; 15].

Окрім того, завдяки геоінформаційним технологіям аграрного напрямку на індексній карті позначаються ділянки поля з поганою вегетацією, що дає змогу відповідним службам не інспектувати все поле повністю [13]. Провівши

перевірку обраних ділянок, відповідна служба може відразу надіслати світлини з типами небезпек на зазначеній площі поля, завдяки мобільному додатку *EOSDA Crop Monitoring* (рис. 3).



**Рис. 3.** Визначення ділянок поля з низькою рослинністю для зменшення площі перевірки відповідними службами завдяки *EOSDA Crop Monitoring*.

**Fig. 3.** Identifying areas of the field with low vegetation to reduce the inspection area by the relevant services due to *EOSDA Crop Monitoring*

Довготривала посуха, з одного боку, та зливи, з іншого, однаково знижують урожайність сільськогосподарських культур. За допомогою ГІС-технологій фермери можуть оцінювати рівень вологи кожної сільськогосподарської культури і визначити ознаки перенасичення або дефіциту вологи для наступного регулювання зрошувальних робіт [13; 15]. Такі технології для аграрної сфери полегшують аналіз стану полів, а це дає змогу страховим компаніям сформувати достатню базу даних для визначення термінів і розмірів виплат за страховим полісом. Також страхові компанії можуть використовувати геоінформаційні інструменти для спостереження за розвитком культур та оцінки її втрат врожаю [14].

Інтеграція ГІС-технологій у сільське господарство може стати хорошим рішенням і для агроконсультантів, оскільки вони дозволяють вивчення архівних даних і відслідковування стану посівів незалежно від геолокації полів. Застосовуючи вегетаційні індекси супутникової аналітики, агроконсультанти мають можливість робити обґрунтовані рекомендації для управління полями, а також відстежувати ефективність від їх реалізації.

**Висновки.** *EOSDA* – конкурентоспроможна платформа для супутникового моніторингу в агросекторах завдяки її точності, використанню штучного інтелекту для прогнозування, а також можливості індивідуальних рішень для різних типів аграрних підприємств. Порівняно з такими конкурентами, як *Planet Labs*, *Sentinel Hub* та *John Deere Operations Center*, *EOSDA* виділяють свою агрономічну спеціалізацію та аналітичні інструменти, що робить її потужним

інструментом для оптимізації аграрного виробництва.

Проведений аналіз геоінформаційних засобів сільського господарства, які сприяють розвитку аграрної галузі, допомагають їй продуктивно функціонувати і залишатися ефективною в майбутньому.

Отримано такі результати: з розвитком сучасних технологій, можливості геоінформаційних систем в сільському господарстві лише зростатимуть, що задовольнятиме потреби ринку. ГІС-технології у сільському господарстві, звичайно, не замінить фахівців, але спростить їм частину важливої рутинної роботи. Геоінформаційні системи дозволяють якнайефективніше використання можливостей сільськогосподарських угідь, а це підвищує врожайність культур, оптимізує витрати і мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище.

Аграрні господарства можуть підтримувати високу ефективність роботи шляхом застосування геоінформаційних систем у сільському господарстві для дистанційного моніторингу великих площ і швидкого реагування на відстежені проблеми. Саме тому використання геоінформаційних систем із застосуванням багатфакторної оцінки небезпек мають великий попит не тільки в аграрній сфері, а й у інших сільськогосподарських галузях.

#### Бібліографічний список

1. Безпалько Р. І., Кришук С. Ю. Стан використання ГІС для потреб сільського господарства. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2013. Вип. 3. С. 122–127.
2. Державна служба України з питань геодезії картографії та кадастру. Паспорт місцевої

системи координат Київської області. UA\_UCS\_2000/LCS\_32, 2017. URL: [https://dgm.gki.com.ua/files/uploads/documents/Kyivska\\_20170301.pdf](https://dgm.gki.com.ua/files/uploads/documents/Kyivska_20170301.pdf).

3. Донченко М.В., Коваленко І. І. Геоінформаційні системи : навч. посіб. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. П. Могили, 2021. 132 с.

4. Комар А. С. Визначення заходів з підвищення енергоефективності сільськогосподарського виробництва. *Міжнар. ел. наук.-практ. журнал WayScience*. Дніпро, 2020. Т.1. С. 118–121.

5. Морозов В. В. ГІС в управлінні водними і земельними ресурсами : навч. посіб. Херсон: ХДУ. 2006. 88 с.

6. Морозов В. В., Лисогоров К. С., Шапоринська Н. М. ГІС в управлінні водними і земельними ресурсами: навч. посіб. Херсон : ХДУ. 2006. 88 с.

7. Морозов В. В., Лисогоров К. С., Шапоринська Н. М. Геоінформаційні системи в агрофері: навч. посіб. Херсон: ХДУ. 2007. 223 с.

8. Примак Л. Основні вимоги до складу топографічного забезпечення для радіо частотного планування телекомунікаційних систем. *Інженерна геодезія: наук.-техн. зб.* 2018. № 65. С. 158–168.

9. Світничний О.О., Плотинський С.В. Основи геоінформатики : навч. посіб. Суми : Університетська книга, 2006. 295 с.

10. Сергєєва К. ГІС-технології в сільському господарстві та їх переваги. URL: <https://eos.com/uk/blog/his-tekhnolohii-v-silskomu-hospodarstvi/> (дата звернення: 07.04.2024)

11. Boltianska N. I. Mechanization of technological processes in animal husbandry: textbook. manual. Melitopol: Color Print, 2012. 720 с.

12. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. 492 с.

13. Більше можливостей для аграрного бізнесу завдяки дистанційному моніторингу ферм, 2024. URL: <https://eos.com/uk/products/crop-monitoring/key-functions/satellite-monitoring/> (дата звернення: 10.04.2024)

14. Brown, Molly. Satellite Remote Sensing in Agriculture and Food Security Assessment. *Procedia Environmental Sciences*, 2015. DOI:10.1016/j.proenv.2015.07.278

15. Quattrochi Dale Luvall, Jeffrey. Thermal Infrared Remote Sensing for Analysis of Landscape Ecological Processes: Methods and Applications. *Landscape Ecology*, 1998. DOI:10.1023/A:1008168910634.

16. Howard L. Advances in Satellite Data Utilization for Agriculture: A Focus on Planet Labs. Taylor & Francis, 2021. 285 p.

17. Ritchie J. C., Zeng X. Sentinel Satellites for Monitoring Agricultural Systems. Springer, 2020. 312 p.

18. Thompson P. Optimizing Agricultural Operations: A Guide to John Deere Operations Center. Elsevier, 2021. 275 p.

19. Martin L. EOSDA Crop Monitoring: Transforming Agriculture with Satellite Data. Springer, 2020. 280 p.

20. Thompson M. The Future of Smart Agriculture: EOSDA Crop Monitoring Solutions. Wiley, 2021. 275 p.

*Стаття надійшла 12.04.2024*

УДК 629.133.001

## АНАЛІЗ НАЯВНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ФОРМУВАННЯ СХЕМИ ГІБРИДНОГО ПРИВОДУ КОЛІСНОЇ АВТОТЕХНІКИ ВИСОКОЇ ПРОХІДНОСТІ

*Андрій Кіхтан, аспірант*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна  
e-mail: kwest@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.061>

### **Кіхтан А. Аналіз наявних конструкцій та формування схеми гібридного приводу колісної автотехніки високої прохідності**

Гібридний привід стає уже одним із серійних елементів нового, 4-го покоління колісної та гусеничної військової автотехніки (ВАТ). Однак як умови використання (бездоріжжя), так і цільові пріоритети використання гібридного приводу (мінімізація звукової та інфрачервоної локації переміщення тепловізорами ворога) кардинально відрізняються від уже звичних гібридних автомобілів загального призначення. Окрім того, в польових умовах автомобіль із гібридним приводом часто може бути і джерелом електроенергії для забезпечення підрозділу за відсутності стаціонарних електромереж.

Умови руху з бездоріжжям додатково обумовлюють певні вимоги до характеристик гібридного приводу – збільшується у декілька разів опір рухові, значно більші вимоги щодо запасу автономного ходу на електротязі з вимкнутим двигуном внутрішнього згоряння та відповідній ємності батарей. Окрім цього, вимоги щодо проїзду водних перешкод – глибиною до 0,8-1,2 м, що обумовлює додаткові обмеження щодо забудови електроприводу.

Відповідно це накладає визначальний вплив на схеми та технічні характеристики приводу, що тільки зараз приймається на озброєння, із значним запізненням порівняно зі звичними гібридними автомобілями загального призначення. Зрозуміла обмеженість інформації у загальнодоступних джерелах власне щодо схем та технічних характеристик гібридного приводу ВАТ обумовила і розгляд та аналіз доступних патентів у цій сфері провідних виробників автотехніки, а також публікацій щодо випробувань та оцінки ефективності конкретних моделей, з аналізу яких випливає і схема приводу. Важливим є також живучість ВАТ – збереження можливості руху при виході з ладу тягового електроприводу або двигуна внутрішнього згоряння. Відповідно опрацьовано два варіанти схем приводу (патентно чистих) для перспективних зразків вітчизняної ВАТ, що є актуальним і для аграрного та інших секторів економіки. Опрацьовані дві схеми приводу у процесі патентування.

**Ключові слова:** гібридний привід, автотехніка, висока прохідність, патенти, схеми приводу, патенти схем приводу.

### **Kikhtan A. Analysis of existing designs and formation of a hybrid drive scheme for wheeled off-road vehicles**

The hybrid drive is already an essential feature of the new fourth-generation wheeled and tracked military vehicles (MVs). However, the conditions for off-road use and the primary goals of employing a hybrid drive - such as minimizing sound and reducing infrared signatures to avoid detection by enemy thermal imagers - differ significantly from those of conventional hybrid vehicles designed for general purposes. Additionally, in field positions, a vehicle with a hybrid drive can serve as a source of exported electricity to support units when stationary power networks are unavailable.

Driving in off-road conditions imposes specific requirements on the hybrid drive's characteristics. Resistance to movement increases considerably, necessitating a higher electric-only range when the internal combustion engine is not in use, as well as a larger battery capacity to meet these demands. Furthermore, engineers must account for the capability to traverse water obstacles up to 0.8 to 1.2 meters deep, which imposes additional design constraints on the electric drive system.

As a result, these factors heavily influence the design and technical specifications of the drive, which are only now being developed, lagging behind the designs of conventional hybrid vehicles. The limited availability of public information regarding the schematics and technical details of hybrid drives in military vehicles prompted an analysis of existing patents from leading automotive manufacturers, as well as published tests and evaluations of specific models. This investigation provided valuable insights into drive schematics.

The survivability of military vehicles is crucial; they must maintain mobility despite failures in either the electric traction drive or the internal combustion engine. Accordingly, two patent-free versions of drive schematics have been developed for prospective national military vehicle models, which are also applicable to the agricultural and other sectors of the economy. These two drive schemes are currently in the process of being patented.

**Keywords:** hybrid drive, automotive engineering, high cross-country capability, patents, drive schematics.

**Постановка проблеми.** Роботи з гібридного приводу військової автотехніки (ВАТ) провідними виробниками були розпочаті практично одночасно з роботами з автотехніки зага-

льного призначення, однак практична реалізація машин з гібридним приводом у військах тільки розпочинається, із значним 12-15 річним запізненням, що обумовлено як суттєво іншими умовами використання (насамперед бездоріжжя і максимальна мобільність руху), так і іншими цільовими пріоритетами [1-3]. Це насамперед забезпечення руху (зокрема бездоріжжя, форсування водних перешкод, круті ґрунтови/піщані підйоми тощо) тільки на електротязі, звично на обмеженій дистанції, що обумовлено умовою мінімізації локації руху машини тепловізорами противника. До того ж, це можливість забезпечення підзарядки акумуляторних батарей тільки двигуном внутрішнього згоряння у польових умовах відсутності електромереж, а також, аналогічно, як джерело ефектнопостачання для систем зв'язку та інших споживачів. Окрім цього, віднедавна і підвищення живучості, здатності принаймні обмеженого переміщення машини після отриманих пошкоджень систем і агрегатів приводу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження у сфері гібридного приводу автомобілів загального призначення сконцентровані насамперед на забезпеченні максимальної енергоефективності:

– зменшенні споживання моторного палива та, відповідно, викидів токсичних компонентів у відпрацьованих газах, як основних чинників впровадження і розвитку цього типу силового приводу [5-7]. Пріоритети використання цього приводу у ВАТ, однак, як зазначено вище, суттєво відрізняються, що обумовлює й відповідні зміни у методології як конструктивного синтезу, так і визначення базових технічних характеристик приводу [1; 2; 7-9]. Водночас, як у інформаційних матеріалах фірм-виробників та державних агенцій з розвитку озброєння та військової техніки провідних країн НАТО, що фінансують розробки ВАТ з гібридним приводом, відсутня інформація щодо конкретної схеми самого приводу та технічних характеристик (як-от інформаційні матеріали по вже віднедавна прийнятих на озброєння машин із гібридним приводом у найчисленнішій структурі сучасного парку ВАТ категорії – Oshkosh – eJLTV у США [10] та Scarabeu у Франції [11]). Згідно з [12] схема приводу Oshkosh – eJLTV є оригінальною і патентно захищеною. Власне аналіз доступних патентів автовиробників щодо схем гібридного приводу і є основою для опрацювання відповідних рішень щодо конструктивного синтезу перспективної вітчизняної розробки.

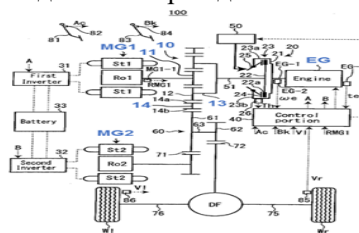
**Постановка завдання.** Наше завдання – опрацювання схем гібридного приводу для перспективної ВАТ вітчизняного виробництва

на основі аналізу наявних патентів, сфери та умов використання і дотримання патентної чистоти розробки.

**Виклад основного матеріалу.** Встановлено, що звична для легкових автомобілів та повнопривідних кросоверів загального призначення паралельна схема гібридного приводу є недостатньо ефективною власне з умови необхідної мобільності руху важким бездоріжжям тільки на електротязі. Порівняльний аналіз схем приводу серійних автомобілів/кросоверів та автобусів [7] дозволяє констатувати прийнятним використання схеми приводу Toyota Prius, як проміжного етапу в конструкції легкого ударного автомобіля переднього краю – військового баггі ТУР КВ 02 «Мамай» (в умовах нагальної потреби військових на фронті і наданого Toyota вільного доступу до власних запатентованих схем приводу). Однак для перспективних повнопривідних моделей ВАТ вітчизняного виробництва для ЗСУ, насамперед машин важчих класів, природно ця схема є недостатньою.

Важке бездоріжжя, чорноземи, в умовах відлиги чи тривалих дощів обумовлюють доцільність і варіанта змішаної схеми приводу (mish-hybrid) з одночасним використанням двигуна внутрішнього згоряння та тягового електродвигуна для приводу провідних коліс. У цьому плані практичний інтерес має аналіз відомих запатентованих рішень провідних автовиробників, які можна поділити на декілька підвидів.

Зокрема ця ж схема Toyota Prius (патент EP 2743114A1 від 14.12.2012 р.) (рис. 1) належить до схем змішаного силового потоку з можливістю одночасного використання тяги електродвигуна і двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) з приводом через одинарний планетарний ряд (так зв. схема 1-Mode). Практично за подібною схемою є і розробка Ford (патент EP 2067646 від 04.12.2007 р.), рис. 2. Однак обидві схеми опрацьовані під монопривід – одну ведучу вісь, що допустимо з умов прохідності для надлегких автомобілів – баггі заднемоторної компоновки [1], але не адаптується в існуючому виконанні під повний привід.



**Рис. 1.** Схема змішаного приводу Toyota/Aisin (пат. EP 2743114A1)

**Fig. 1.** Toyota/Aisin mish-hybrid drive scheme (pat. EP 2743114A1)

- EG – двигун внутрішнього згоряння
- MG1 – перший електродвигун/генератор
- MG2 – другий електродвигун/генератор
- 10 – планетарний ряд
- 11 – сонячна шестерня
- 13 – водило
- 14 – коронна шестерня

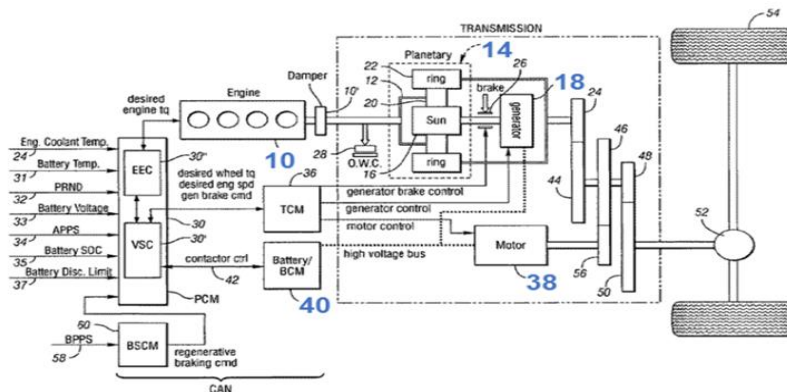


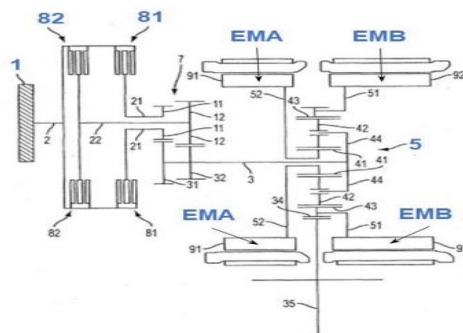
Рис. 2. Схема гібридного змішаного приводу Ford (пат. EP 2067646A1)

Fig. 2. Ford mish-hybrid drive scheme (pat. EP 2067646A1)

де: 10 – ДВЗ; 14 – планетарний ряд; 18 – ел. двигун/генератор; 38 – ел. двигун; 40 – АКБ

У цьому плані більш перспективна схема з 2 планетарними рядами (схема 2-Mode) – розробка Daimler/Chrysler (патент EP 2616712A1 від 15.09.2010 р.), рис. 3. У цьому випадку другий планетарний ряд 5 використовується із здвоєним фрикційним зчепленням 81, 82 для синхронізації роботи двигуна внутрішнього згоряння 1 з електродвигунами у зоні наднизьких та високих частот обертання. Однак схема

здвоєного планетарного ряду потенційно (при відповідних змінах структури приводу) дає можливість реалізації і щодо колісної схеми повного приводу. Проблемною залишається зміна структури під перехід на схему послідовного приводу з режимом руху на електротязі при непрацюючому двигуні внутрішнього згоряння.



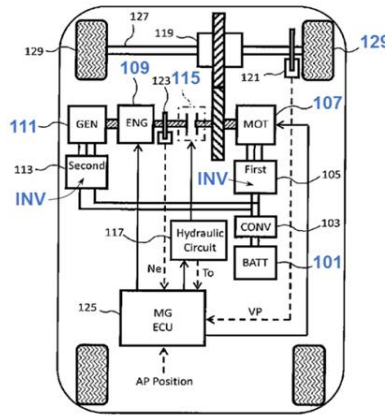
- 1 – маховик ДВЗ
- 5 – планетарний редуктор
- 81, 82 – фрикційні зчеплення
- EMA, EMB – електродвигуни

Рис. 3. Схема гібридного приводу Daimler/Chrysler (пат. EP 2617646A1)

Fig. 3. Daimler/Chrysler mish-hybrid drive scheme (pat. EP 2617646A1)

Проблема переходу від змішаної до послідовної схем приводу практично усувається, якщо суміщення роботи двигуна внутрішнього згоряння і тягового електродвигуна здійснюється не через планетарні механізми, а через фрикційне зчеплення при послідовному розміщенні агрегатів приводу (зчеплення, однак, при послідовній схемі приводу має бути постійно вимкнуте, що не є звичним режимом роботи для класичної автомобільної конструкції). Окрім цього, проблемною залишається суміщення/синхронізація частот обертання валів ДВЗ та елек-

тродвигуна в зоні менше 700-800 об/хв (неробоча для ДВЗ), актуальних для руху бездоріжжям на малих швидкостях (за відсутності коробки передач для ДВЗ). Відповідно серійно реалізована схема суміщення послідовної і змішаної схем приводу (Parallel-Series-Hybrid) дозволяє перехід на підключення ДВЗ до приводу коліс тільки у зоні відповідних швидкостей, рис.4 (патент Honda EP 2944495 від 11.01.2013 р.). (Тут: 115 – зчеплення; 129 – ведучі колеса; 101 – акумулятор; 109 – ДВЗ; 111- генератор; 107 – електродвигун; INV – інвертор).



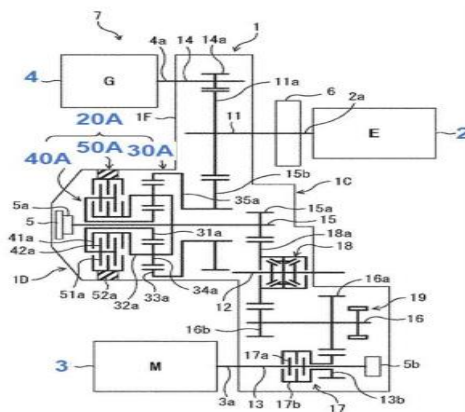
**Рис. 4.** Схема послідовно-паралельного гібридного приводу Honda (пат. EP 2944495)  
**Fig. 4.** Honda parallel-serial-hybrid drive scheme (pat. EP 2944495)

Практично ця ж схема реалізована і в іншій розробці Honda – патенті EP 2792540 від 12.12.2011 р. – з відмінністю підключення ДВЗ уже через муфту вільного ходу замість зчеплення, що покращило синхронізацію частот обертання валів обох двигунів при переході знову ж таки у зоні умовно 5-ї передачі на змішану схему приводу для забезпечення задекларованих максимальних швидкостей руху при недостатній для цього потужності електродвигуна. Патентні та промислові розробки інших автовиробників у сфері змішаної схеми приводу сконцентровані у конструкціях роздільного приводу осей (combined axle) – однієї осі від тягового електродвигуна, іншої – від ДВЗ, з трансмісією та генератором. Відповідно це забезпечує рух як окремо – тільки від електродвигуна чи тільки від ДВЗ, так і спільно – при синхронізованій одночасній роботі обох двигунів і фактично переходу на повний привід. Зокрема це конструкції Peugeot-Citroen ( пат. EP 3312036Ф1 від 19.10.2016 р.), а ще раніше Nissan (пат. EP 1342610A1 від 04.03.2002 р.) та Audi/ VW – як так званий електрокардан повного приводу (пат. EP 3383685A1 від

04.12.2015 р.). Окремо необхідно виділити Mitsubishi – патенти EP 3296134 від 15.09.2016 р., EP 3453551A1 від 13.06.2016 р. та EP 3238971A1, а також Honda ( EP 3085593A1 від 17.12.2013 р., EP 3437909A1 від 29.03.2016 р. та EP 3480492A1 від 30.06.2016 р.).

З умов використання ВАТ, зрештою і використання в аграрній, лісогосподарській чи ремонтній сферах, на бездоріжжі ця схема роздільного приводу (combined axle) забезпечує порівняно з класичним послідовним (seriell) приводом більшу живучість ходу – збереження мобільності, звично обмеженої, у випадку виходу з ладу тягового електродвигуна за рахунок ДВЗ чи навпаки. Відповідно це обумовлює необхідність детальнішого розгляду вищезазначених патентних розробок, насамперед Mitsubishi, як безпосереднього виробника ВАТ (рис. 5).

Ця схема дозволяє автономний рух тільки на електроприводі або тільки з використанням ДВЗ, зберігаючи і можливість одночасної роботи двигунів (і генератора) з використанням планетарного ряду та управління ним фрикціями і стрічковим гальмом (рис. 5).

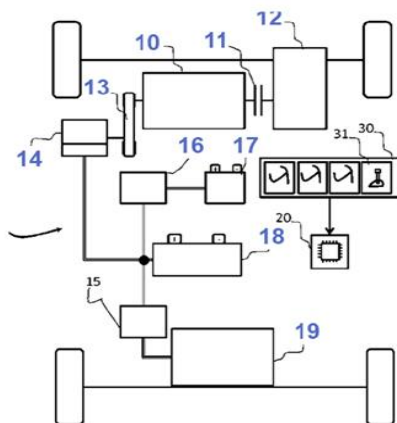


- 2 – двигун внутрішнього згоряння
- 4 – генератор
- 3 – тяговий електродвигун
- 20A – механіка приводу
- 30A – планетарний редуктор
- 40A – фрикціон (зчеплення)
- 50A – стрічкове гальмо

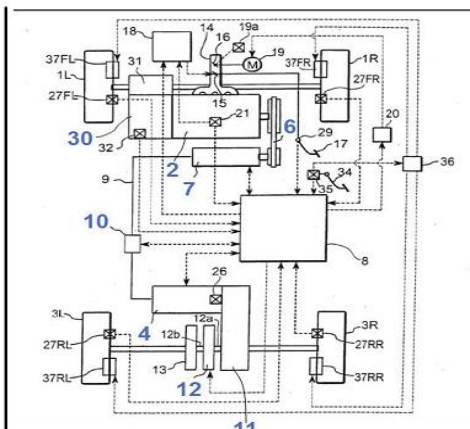
**Рис. 5.** Паралельно-послідовна схема приводу Mitsubishi (пат. EP 3453551)  
**Fig. 5.** Mitsubishi parallel-serial-hybrid drive scheme (pat. EP 3453551)



Практично аналогічна схема, однак без використання планетарного ряду, характерна і для розробки за схемою combined axle Peugeot-Citroen (рис. 6), хоча у більш ранньому патенті спорідненої фірми-виробника Nissan теж присутній планетарний редуктор (рис. 7).



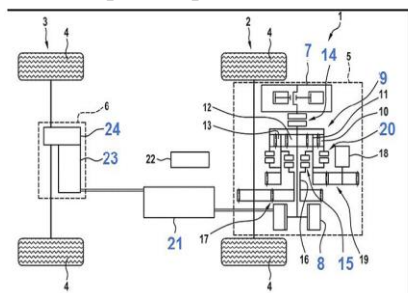
**Рис. 6.** Схема Peugeot-Citroen (пат. EP 3312036A1)  
**Fig. 6.** Peugeot-Citroen scheme (pat. EP 3312036A1)



**Рис. 7.** Схема Nissan (пат. EP 1342610AP)  
**Fig. 7.** Nissan scheme (pat. EP 1342610AP)

Спільним для обох розробок є використання клиноремінної передачі – з'єднання генератора з двигуном внутрішнього згоряння (ДВЗ), що, однак, може бути змінено на більш надійне шестеренчасте. Обидві схеми дозволяють реалізувати фактично 4 режими роботи – з приводом на одну вісь тільки від ДВЗ, тільки від електродвигуна (при непрацюючому ДВЗ і при працюючому – послідовний привід), а також з приводом обох осей від ДВЗ і електродвигуна (певна видозміна паралельного приводу).

Це ж характерно і для схеми приводу концерну VAG, що вже реалізована на промислових моделях кросоверів Audi/VW (рис. 8) – «електрокардан» повного приводу. Перевагою цієї схеми є можливість стабілізації режимів роботи ДВЗ у діапазоні економних режимів за рахунок планетарної передачі.



**Рис. 8.** Схема приводу Audi (пат. EP 3383685A1 від 04.12.2015)

**Fig. 8.** Audi drive scheme (pat. EP 3383685A1 from 04.12.2015)

7 – ДВЗ; 8 – генератор; 9 – планетарна КП; 14 – зчеплення; 15,20 – з'єднувальні елементи; 21 – акумулятор; 23 – електродвигун; 24 – коробка передач.

Нещодавня розробка Mitsubishi (рис. 9) – концерн – найбільший виробник військової автотехніки у Японії, розвиток змішаного (послідовно-паралельного) приводу з двома тяговими електродвигунами, окремо на кожен вісь, та можливістю додаткового підключення і ДВЗ до приводу передньої осі, що підвищує живучість та прохідність автомобіля. На автодорогах із твердим покриттям схема уможливіє рух і у режимі моноприводу (передня або задня осі), що зменшує енергозатратність руху і збільшує запас ходу. В умовах важкого бездоріжжя для підвищення прохідності до двох тягових електродвигунів можливе підключення і ДВЗ (на передню вісь) через планетарний редуктор 7 (рис. 9), відповідно, у діапазонах низьких та високих швидкостей руху. Привід генератора 9 через планетарну передачу 7 дозволяє забезпечити необхідні оберти ротора і енерговіддачу, незалежно від швидкісного режиму ДВЗ при переході на паралельну схему приводу.

Відмінність цієї схеми – також відсутність класичної коробки передач між ДВЗ і провідною віссю. Два тягові електродвигуни характерні і для однієї з розробок Honda (рис. 10), але ця схема режим повного приводу забезпечує тільки при одночасній роботі і ДВЗ і тягових електродвигунів, що для ВАТ з умов локації руху противником уступає схемі Mitsubishi (рис. 9).

Звичайно підвищується живучість електроприводу, а перенесення одного з електродвигунів 2А чи 2В (рис. 10), паралельно до ДВЗ 4, у принципі, повторює схему Mitsubishi (рис. 9), однак без планетарного редуктора 7 і звичною коробкою передач у блоці з ДВЗ.

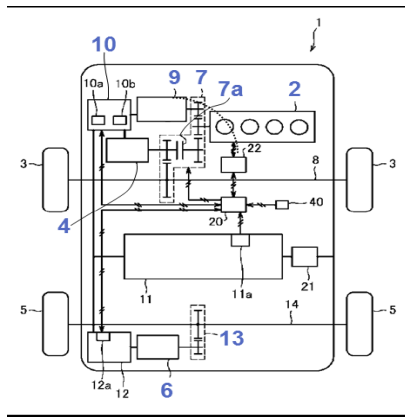


Рис. 9. Схема приводу Mitsubishi (пат. EP 3296134A1)

Fig. 9. Mitsubishi drive scheme (pat. EP 3296134A1)

де: 2 – ДВЗ; 4, 6 – електродвигуни;  
7 – редуктор; 7а – зчеплення; 9 – гене-  
ратор; 10 – АКБ; 13 – редуктор.

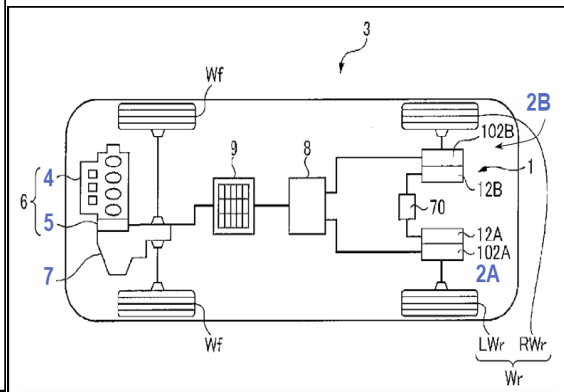


Рис. 10. Схема приводу Honda (пат. EP 3437909A1)

Fig. 10. Honda drive scheme (pat. EP 3437909A1)

де: 2А, 2В – електродвигуни; 4 – ДВЗ;  
5 – зчеплення; 7 – коробка передач

Звично, що патенти по гібридному приво-  
ду нових зразків ВАТ, зокрема Oshkosh, де є  
шість патентів по приводу [12], є в обмеженому  
доступі. Але щодо Polaris у 2017 р. (рис. 11), дві  
спеціальні моделі якого масово використову-

ються в арміях НАТО, запатентована схема  
гібридного приводу виконана власне як  
combined axle – з тяговим електродвигуном 618  
та ДВЗ 514.

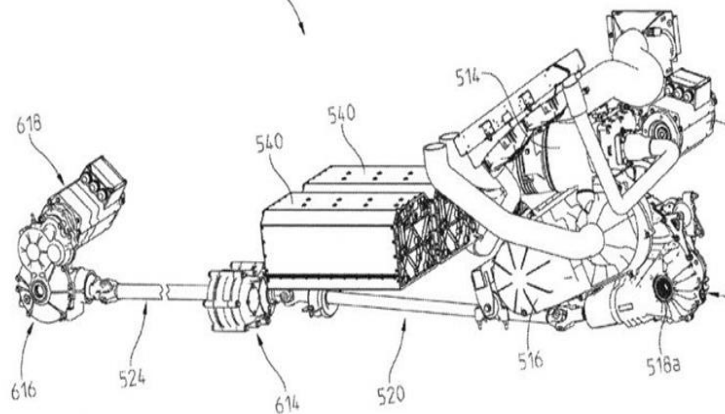
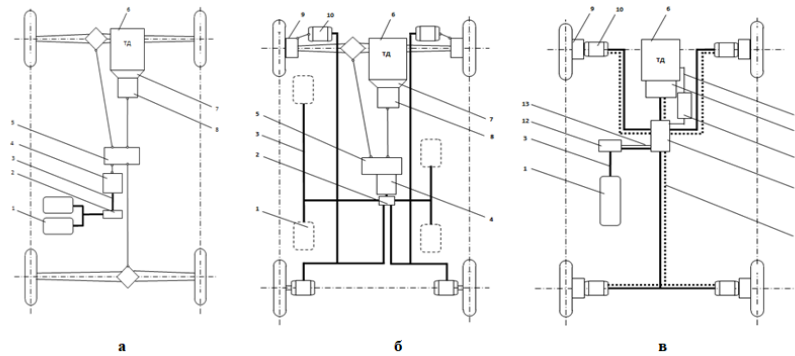


Рис. 11. Схема компоновки гібридного приводу баггі Polaris (пат. USA 20170355259A1)

Fig. 11. Layout scheme of the Polaris buggy hybrid drive (pat. USA 20170355259A1)

Варті уваги вітчизняні патенти щодо схем  
гібридного приводу автомобілів схеми 4x4  
(проф. Кайдалов Р. О., ХНАДУ, КраЗ) (рис.  
12). Зокрема перша схема (рис. 12 а) дозволяє  
реалізувати дообладнання наявних автомобілів  
з ДВЗ тяговим електродвигуном/генератором  
(але обмеженою можливістю підзарядки бата-  
рей – тільки в режимі рекуперації у фазі спо-  
вільнення та від зовнішньої 7. електромережі).  
Інша схема (рис. 12 б) залишає привід від ДВЗ  
на передню вісь (з можливістю відключення від  
ДВЗ 6 через зчеплення 7) і включає 4 тягові еле-  
ктродвигуни 10 з приводом кожного з коліс  
через бортові планетарні редуктори 9. Меха-  
нічний привід від ДВЗ до задньої осі замінено на  
відповідному виході розподільчої коробки 5

генератором 4 зарядки батарей. Схема забез-  
печує рух автомобіля тільки на електроприводі,  
при непрацюючому ДВЗ. Запас автономного  
ходу визначається ємністю батарей та залежить  
від складності – опору руху бездоріжжя дороги.  
Схема з індивідуальними електродвигунами  
приводу кожного з коліс, рис. 12 в, має перевагу  
збереження рухомості автомобіля при виході з  
ладу, пошкодження одного чи двох двигунів,  
значне спрощення механіки приводу – класична  
послідовна (seriell) схема з працюючим ДВЗ  
тільки на генератор. Але є і недолік – немо-  
жливність використання ДВЗ для урухомлення  
при виході з ладу електроприводу.



**Рис. 12.** Схеми гібридного приводу повнопривідного автомобіля (пат. України 116670, 114623, 119713)

**Fig. 12.** Layout scheme of the hybrid four-wheel drive car (pat. Ukraine 116670, 114623, 119713)

де: 1 – акумуляторна батарея; 2 – блок управління (інвертор); 3 – силова електрична лінія; 4 – електродвигун/генератор; 5 – розподільча коробка; 6 – двигун внутрішнього згоряння; 7 – зчеплення; 8 – коробка передач; 9 – колісний редуктор з планетарним механізмом; 10 – електродвигун; 11 – блок керування двигуном внутрішнього згоряння; 12 – блок-перетворювач; 13 – електрична лінія управління; 14 – резервна електрична лінія

З огляду на аналіз відкритих публікацій у сфері військової автотехніки [1-3; 8-17] очевидно, що конструктивний синтез схем гібридного приводу повнопривідних автомобілів для бездоріжжя впродовж останніх 15-18 років – від початку формування тактико-технічних вимог відповідними державними установами у США, Франції, Великобританії до прийняття на озброєння перших машин у 2021-2022 рр. [11; 10] – обумовив докорінні відмінності від уже звичних і давно реалізованих у виробництві гібридних автомобілів загального призначення. Зокрема:

- в основу схем гібридного приводу ВАТ покладена послідовна (seriell) або змішана (mish-hybrid) з можливістю автономного руху без доріжжям на певні дистанції при не працюючому двигуні внутрішнього згоряння [1; 8; 9; 14];

- стала тенденція використання оригінальних, запатентованих схем поєднання схем типу seriell з можливістю переходу на комбіновану, змішану (mish-hybrid), що суттєво відрізняються за цільовим використанням порівняно з автомобілями загального призначення [9; 12; 15];

- потужності двигунів і ємність батарей представлених зразків ВАТ з гібридним приводом є суттєво, у 2,5-4 рази, більшими [2; 10; 11; 18] порівняно з аналогічними щодо повної маси гібридними автомобілями загального призначення;

- підвищена потужність генератора з умов більш швидкої зарядки акумуляторів, відчутно більшого споживання електроенергії військовим обладнанням, що встановлюється на колісні машини у цій сфері, а також використання машини з гібридним приводом як джерела

електроенергії іншим споживачам у польових умовах [3; 14-17].

Зазначене, поряд з повним приводом і двоступеневою роздавальною коробкою, обумовлює опрацювання оригінальних схем гібридного приводу, у т.ч. і з умов патентної чистоти, як передумови промислової реалізації. В основу останньої, враховуючи реалії сучасної ситуації, покладено два етапи:

1. доопрацювання і випуск промислової партії легких ударних автомобілів – багі (тип КВ 02Н «Мамай» з використанням видозміненої схеми combined-axle – з приводом задньої осі за схемою mish-hybrid 1 mode – перероблений привід Toyota Prius III та установкою приводу передньої осі окремим електродвигуном з електронною синхронізацією частот обертання з тяговим електродвигуном задньої осі (e-кардан). Toyota надано вільний доступ до використання розробок/патентів у сфері гібридного приводу, у МВС України накопичено сотні пошкоджених автомобілів Toyota Prius III, з яких можна використати певну кількість систем приводу (очевидно з доукомплектуванням новими батареями більшої ємності та необхідних змін в системі управління приводу – з умов синхронізації роботи обидвох електродвигунів);

2. паралельно, насамперед на основі набутого досвіду експлуатації, опрацювання (включно патентування) схем приводу типу seriell-mish hybrid з паралельною оцінкою ефективності методами імітаційного моделювання у програмному середовищі Matlab Simulink на базі відповідного розвитку напрацьованих щодо руху бездоріжжям повнопривідної ВАТ з двигуном внутрішнього згоряння [18; 19].

**Висновки.** Очевидна актуальність і потреба в оновленні застарілого автопарку повнопривідних автомобілів України та організації

власного виробництва мало- і середньотонажної техніки обумовлюють практичну значущість конструктивного синтезу гібридного приводу, що здійснюється у співпраці з АТ «Укравтобуспром». Аналіз свідчить про докорінну відмінність формування схем гібридного приводу автомобілів загального призначення (у т.ч. повнопривідних) та військової і багатоцільової автотехніки для бездоріжжя. Основним чинником використання гібридного приводу у цій сфері є не так екологія, як зазвичай, як мінімізація локації руху у інфрачервоному та звуковому спектрах та підвищена живучість і прохідність за рахунок наявних двох джерел приводу – ДВЗ і електродвигуна. Окрім того, реалії використання приводу машин у польових умовах як джерела електроенергії для зв'язку, ремонтних робіт тощо за відсутності/недосяжності стаціонарної мережі електропостачання. Опрацювання такого приводу для вітчизняної ВАТ (зрештою і для інших сфер використання в умовах бездоріжжя), як показав проведений огляд чинних запатентованих схем приводу, необхідно реалізувати за схемами *mesh hybrid – combined axle*, з умов дотримання патентної чистоти розробки. Власне ці схеми приводу дозволяють як повноцінний тривалий рух тільки на електротязі, так і реалізувати рух з приводом від двигуна внутрішнього згоряння, зокрема при виході з ладу електротязи (або, навпаки, двигуна внутрішнього згоряння, однак на обмежену дистанцію за запасом ємності батареї). Природно, що це актуально насамперед для ВАТ переднього краю.

#### Бібліографічний список

1. Kramer D., Parker G. Current State of Military Hybrid Vehicle Development. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 2011. № 3(4). Pp. 369–387.
2. Giesbrecht J. Feasibility of Hybrid Diesel-Electric Powertrains for Light Tactical vehicles./ Defence Research and Development Canada DRDC-2018-D049, June 2018. 21p. URL: <http://cradpdf.drdc-rddc.ca/PDF/unc319/> (Дата звернення: 02.07.2024).
3. Army hybrid vehicles power forward. 21 July 2021. URL: <https://www.army.mod.uk/news/2021/077-army-hybrid-vehicles-power-forward>.
4. Elsani M., Ciao J., Giay S. E., Emadi A. Modern Electric, Hybrid-Electric and Fuel Cell Vehicles. Fundamental, Theory and Design / CRC Press, New-York, 2005. 589 p.
5. Гібридні автомобілі / О. В. Бажинов, О. В. Смірнов, С.А. Серіков, А. В. Гнатов, А. В. Колесніков, під ред. О. В. Бажинова. Харків: ХНАДУ, 2008. 327 с.
6. Chris Mr., Masrer A., Guo D. W. Hybridfahrzeuge.Grundlage und Anwendungen mit Perspektiven fuer die Praxis / Viebex-VCH Verlag, Weinbad, 2014. P. 512.
7. Крайник Л. В., Кіхтан А. В., Кохан В. Ф., Волощук М. Я. Концептуальні основи формування гібридного приводу автомобіля високої прохідності. *Військово-технічний збірник*. 2022. № 27. С. 10–18.
8. Krause M. Hybridantriebe fuer Militaer-Fahrzeuge. 29.05.2022. URL: <https://aetrans.de/hybridantriebe-fuer-militaerfahrzeuge>. (Дата звернення: 02.07.2024).
9. Dong Hwan Choi, Seong Jun Lee, Bo-Hyung Cho, Yeo Giel Yoon. Development of Design Tool for Hybrid Power Systems of Hybrid Electric Military Combat Vehicles. URL: <https://www.iri.upc.edu/VPPC10/uploads/PDF/aper/95-69838-final> (Дата звернення: 02.07.2024).
10. Oshkosh eJLTV. Oshkosh Defense Hybrid Electric JLTV (eJLTV). URL: <https://oshkoshdefense.com/vehicle> (Дата звернення: 02.07.2024).
11. Scarabee. URL: <https://www.arquus-defense.com/our-armored-vehicle-scarabee> (Дата звернення: 02.07.2024).
12. Frank D. Neue Patente fuer das eJLTV. URL: <https://www.behoerden.spiegel.de/2022/09/09/neue-patente-fuer-das-ejltv> (Дата звернення: 02.07.2024).
13. Кайдалов Р. О. Наукові основи створення автомобілів з комбінованою енергетичною установкою: дис. ... д-р техн. наук : 05.22.02. Харків, 2018. 394 с.
14. Khalil G., Danielson E., Barshaw E., Chait M. Power Supply and Integration in Future Combat Vehicles. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%962520-Meeting%062520-Proceedings/R> (Дата звернення: 02.07.2024).
15. Chris Mr., Masrar A. Hybrid Electric Vehicles: Principles and Application with Practical HEV Application for Military Vehicles/ 2017. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10/1002/9781118970553> (Дата звернення: 02.07.2024).
16. Rizzo D.M. Military Vehicle Optimization and Control. Dissertation, Michigan TU, 2014. URL: <https://doi.org/10.37099/mtu..dc.etds> (Дата звернення: 02.07.2024).
17. Hybridization of US Army Combat Vehicles. Technical Paper SAE 2022-01-0371/29.03.2022. URL: <https://sae.org/technicalpapers/content> (Дата звернення: 02.07.2024).
18. Liu Z., Marmun A.-M., Rizzo D., Onori S. Combined Battery Design Optimization and Energy Management of a Series Hybrid Military

19. Truck. URL: [https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/OnoriPDF/Journals/32\\_pdf](https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/OnoriPDF/Journals/32_pdf) (Дата звернення: 02.07.2024).

20. Ehsani M., Singh K. V., Bansal H. O., Mehrjardi R. T. State of the Art and Trends in

Electric and Hybrid Electric Vehicles. In: Proceedings of the IEEE. 2021. No 109. Pp. 967–984.

*Стаття надійшла 11.07.2024*

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗЧЕПЛЕННЯ ТА ОПОРУ КОЧЕННЮ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН

<sup>1</sup>Роман Шевчук, д. с.-г. н., <sup>1</sup>Олег Сукач, к. т. н., <sup>1</sup>Олег Миронюк, к. т. н.,

<sup>2</sup>Віктор Шевчук, к. т. н., <sup>1</sup>Юрій Габрієль

<sup>1</sup>Львівський національний університет природокористування  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: 19oleg85@ukr.net

<sup>2</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності  
вул. Клепарівська, 35, Львів, Львівська обл., 79000

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.070>

### Шевчук Р., Сукач О., Миронюк О., Шевчук В., Габрієль Ю. Дослідження коефіцієнтів зчеплення та опору коченню автомобільних шин

Для визначення тягово-зчіпних показників автомобілів, зокрема коефіцієнтів опору коченню і зчеплення автомобілів, широко використовується спосіб буксирування, який може реалізуватись доволі простим пристроєм, оснащеним горизонтально розташованим динамометром та гнучким буксирним пасом. Вказаний спосіб характеризується великою похибкою визначення середнього зусилля буксирування, яке зумовлене мінливістю взаємодії колісних рушіїв з опорною поверхнею і, відповідно, низькою точністю визначення способом буксирування як коефіцієнта зчеплення з опорною поверхнею, так і інших тягово-зчіпних показників, зокрема коефіцієнта опору коченню.

Стандартний тяговий пристрій для визначення тягово-зчіпних властивостей мобільних енергетичних засобів характеризується значним елементарним інтервалом вимірювання  $\Delta t_{di}$ , який обмежений можливістю людини візуально спостерігати і реєструвати поточні покази динамометра. Значний елементарний інтервал  $\Delta t_{di}$  спричиняє низьку точність визначення зусилля буксирування й відповідно середнього значення сили, коефіцієнта опору коченню та зчеплення. Це зумовлено зміною показів динамометра зі значною швидкістю через мінливість мікропрофілю дороги. Тому візуальний спосіб спостереження під час досліджень вкрай неточний.

Розроблено методику та програмний комплекс для підвищення точності визначення зусилля буксирування мобільних енергетичних засобів, яка забезпечується зменшенням елементарного інтервалу реєстрації значень вимірювання. Запропонований програмний модуль приєднується до силової тензоланки електронного динамометра. Модуль представлений у вигляді мікросхеми з аналогово-цифровим перетворювачем, що з'єднується через мікроконтролер з шиною підключення зовнішніх пристроїв та інтерфейс виводу даних. Така архітектура модуля забезпечує передачу даних на електронний носій інформації - карту пам'яті чи персональний комп'ютер.

Визначено коефіцієнти опору коченню та зчеплення коліс Debica Passio 2 175/70 R13 82T автомобіля ЗАЗ Sens для різних типів опорної поверхні. Встановлено, що для асфальтованої дороги значення  $\varphi_i$  перебуває в межах 0,6914...0,7162 із середнім значенням 0,698. Для ґрунтової дороги значення  $\varphi_i$  перебуває в межах 0,5754...0,6144 із середнім значенням 0,595. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3755...0,4451 із середнім значенням 0,408. Найменші значення  $\varphi_i$  отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3275...0,3768 із середнім значенням 0,358.

Для зимових шин коефіцієнт зчеплення для асфальтованої дороги  $\varphi_i$  є в межах 0,6138...0,6514 із середнім значенням 0,6280. Для ґрунтової дороги значення  $\varphi_i$  - 0,5799...0,6045 із середнім значенням 0,5919. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3847...0,4041 із середнім значенням 0,3945. Більші порівняно з літніми шинами значення  $\varphi_i$  отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3761...0,3908 із середнім значенням 0,3825.

**Ключові слова:** тяговий пристрій, коефіцієнт опору коченню, коефіцієнт зчеплення коліс, програмний модуль.

### Shevchuk R., Sukach O., Myroniuk O., Shevchuk V., Habriiel Yu. Study of grip and rolling resistance coefficients of automobile tires

Determining the traction and traction indicators of cars, such as the coefficients of rolling resistance and traction, often uses a towing method. This method can be implemented with a simple device that includes a horizontally positioned dynamometer and a flexible towing belt. However, this approach is characterized by significant inaccuracies in measuring the average towing force. This inaccuracy arises from the variability in how the wheel drives interact with the supporting surface, which consequently affects the precision of determining both the grip coefficient and other traction-related indicators, including the rolling resistance coefficient.

The standard towing device used to evaluate the traction-coupling properties of mobile energy vehicles has a considerable elementary measurement interval ( $\Delta t_{di}$ ). This interval is limited by the observer's ability to visually record the current readings from the dynamometer. The large elementary interval leads to low accuracy in determining

the towing force, and consequently, the average values of force, rolling resistance coefficients, and grip. Rapid changes in the dynamometer readings, due to fluctuations in the road's micro-profile, further complicate accurate measurements. Therefore, relying on visual observation during these tests is highly imprecise.

To enhance the accuracy of determining the towing effort for mobile energy vehicles, a methodology and software complex have been developed. This improvement is achieved by reducing the elementary interval for recording measurement values. The proposed software module connects to the electronic dynamometer's power tension link. This module is designed as a microcircuit equipped with an analog-to-digital converter, which interfaces with a microcontroller and a bus for connecting external devices, along with a data output interface. This configuration ensures the efficient transfer of data to electronic storage media, such as a memory card or a personal computer.

The coefficients of rolling resistance and adhesion for Debica Passio 2 175/70 R13 82T wheels on the ZAZ Sens car were measured across various types of supporting surfaces. For an asphalt road, the grip coefficient ( $\phi_i$ ) ranged from 0.6914 to 0.7162, with an average value of 0.698. On a dirt road,  $\phi_i$  values ranged from 0.5754 to 0.6144, averaging 0.595. For gravel surfaces, the values were between 0.3755 and 0.4451, averaging 0.408. The lowest  $\phi_i$  values were observed on a wet dirt road, ranging from 0.3275 to 0.3767, with an average of 0.358.

For winter tires, the adhesion coefficient on an asphalt road ( $\phi_i$ ) ranged from 0.6138 to 0.6514, with an average value of 0.6280. On a dirt road, this coefficient was between 0.5799 and 0.6045, averaging 0.5919. For gravel surfaces, the values ranged from 0.3847 to 0.4041, with an average of 0.3945. Comparatively, with summer tires on a wet dirt road, the  $\phi_i$  values were from 0.3761 to 0.3908, averaging 0.3825.

**Keywords:** towing device, rolling resistance coefficient, grip coefficient of wheel, software module.

**Постановка проблеми.** Опір коченню автомобілів визначається втратами енергії в колісному рушії, зокрема в шинах коліс [15], а також втратами на деформацію опорної поверхні, які сумарно характеризуються коефіцієнтом опору коченню  $f$ . На малій швидкості руху автомобілів, що не перевищує 10–15 км/год, цей коефіцієнт позначається  $f_0$ . Теоретичне визначення коефіцієнта опору коченню є складним і дозволяє отримати наближені результати, які потребують експериментального уточнення [5].

Для експериментального визначення коефіцієнтів опору коченню та зчеплення найчастіше використовується спосіб буксирування з використанням динамометричного обладнання. Вказаний спосіб є доволі простим, однак характеризується низькою точністю вимірювання зусилля буксирування, яке повинно визначатись лише взаємодією коліс автомобіля з опорною поверхнею. Низька точність вимірювань спричинена вертикальними коливаннями горизонтального буксирного паса з динамометром, внаслідок чого зусилля буксирування зумовлене не лише взаємодією коліс з опорною поверхнею, а істотно змінюється коливними навантаженнями та доповнюється неточністю дій оператора під час вимірювань.

Експериментальне визначення тягово-зчіпних властивостей автомобілів також характеризується значним елементарним інтервалом вимірювання  $\Delta t_{oi}$ , який обмежений можливістю людини візуально спостерігати і реєструвати поточні покази динамометра. Значний елементарний інтервал  $\Delta t_{oi}$  спричиняє низьку точність визначення зусилля буксирування й відповідно середнього значення сили, коефіцієнта опору коченню та зчеплення. Це зумовлено зміною показів динамометра зі значною швидкістю через мінливість мікропрофілю дороги. Тому

візуальний спосіб спостереження під час досліджень вкрай неточний.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для визначення тягово-зчіпних показників автомобілів, зокрема коефіцієнтів опору коченню і зчеплення автомобілів, широко використовується спосіб буксирування, який може реалізуватись доволі простим пристроєм, оснащеним горизонтально розташованим динамометром та гнучким буксирним пасом [4; 7]. Вказаний спосіб характеризується великою похибкою визначення середнього зусилля буксирування, яке зумовлене мінливістю взаємодії колісних рушіїв з опорною поверхнею і, відповідно, низькою точністю визначення способом буксирування як коефіцієнта зчеплення з опорною поверхнею, так і інших тягово-зчіпних показників, зокрема коефіцієнта опору коченню.

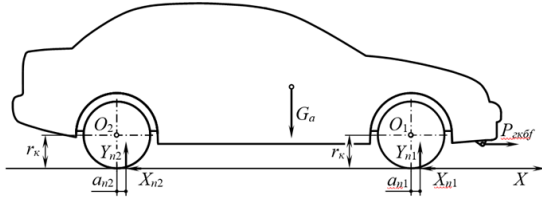
Низька точність визначення тягово-зчіпних показників зумовлена широким рядом чинників. Найбільший вплив на точність вимірювання мають умови проведення досліджень: мікропрофіль й ухил дорожнього покриття, а також рівномірність руху трактора тягача, що здійснює буксирування. Наступна група чинників зумовлена технологічними параметрами вимірювального пристрою, а також точністю й частотою фіксації даних динамометром. Інша група чинників - це похибки, що виникають через неточності дій чи особистих якостей оператора.

Крім цього, переважна більшість досліджень стосується теорії руху автомобільних транспортних засобів [1; 2; 6], однак мало уваги приділяється питанням розробки вимірювального обладнання для розрахунку експлуатаційних показників автомобілів та його апробації.

**Постановка завдання.** Відповідно до означеної проблеми запропоновано розробити методику автоматизованого визначення зусилля

буксирування за допомогою тягового пристрою з використанням програмного модуля, що нівелює значну кількість похибок, які притаманні візуальному спостереженню під час проведення експериментів. Здійснити модернізацію тягового пристрою та розробити програмний модуль, який забезпечує зміну дискретності вимірювання зусилля буксирування відповідно до заданого оператором раціонального інтервалу. Також необхідно провести апробацію методики автоматизованого визначення зусилля буксирування за допомогою тягового пристрою, встановити значення коефіцієнтів опору коченню і зчеплення для зимових та літніх шин на різних типах дорожнього покриття.

**Виклад основного матеріалу.** Під час буксирування автомобіля (рис. 1) на експериментальній горизонтальній ділянці з постійною невеликою швидкістю  $V$  передні й задні колеса радіусом  $r_k$  обертаються навколо осей  $O_1$  і  $O_2$  у веденому режимі [11]. Перпендикулярно до опорної поверхні, тобто – експериментальної ділянки, діє сила ваги автомобіля  $G_a$ . Паралельно до цієї поверхні прикладається зусилля буксирування  $P_{екбф}$ , яке передається буксирним пасом.



**Рис. 1.** Схема сил, що діють на автомобіль з розгальмованими колесами під час буксирування

**Fig. 1.** Diagram of forces acting on a car with unlocked wheels during towing

У зонах контакту коліс з опорною поверхнею прикладаються нормальні реакції на передні  $Y_{n1}$  і задні  $Y_{n2}$  колеса, зміщені від осей обертання  $O_1$ ,  $O_2$  в напрямі руху на відстані відповідно  $a_{n1}$  й  $a_{n2}$ . Також у зонах контакту [3] виникають зумовлені зміною динамічного радіуса коліс  $r_k$  зміщення повздовжніх дотичних реакцій передніх  $X_{n1}$  і задніх  $X_{n2}$  коліс, які спрямовані протилежно до напрямку руху й відносно осей  $O_1$ ,  $O_2$ .

Відзначимо вісь  $X$ , яка збіжна з опорною поверхнею та спрямована за напрямом руху, і запишемо рівняння суми проєкцій на цю вісь сил, що діють на автомобіль під час буксирування з постійною невеликою швидкістю:

$$\sum X = P_{екбф} - X_{n1} - X_{n2} = 0. \quad (1)$$

Знехтувавши моментами опору обертанню передніх коліс  $M_{r1} = 0$  і задніх  $-M_{r2} = 0$ , що зумовлені тертям у підшипниках маточин коліс, а також опором повітря обертанню, запишемо

рівняння суми моментів сил відносно осі  $O_1$  передніх коліс:

$$\sum M_{O1} = Y_{n1} a_{n1} - X_{n1} r_k = 0, \quad (2)$$

звідки

$$X_{n1} = \frac{a_{n1}}{r_k} Y_{n1}.$$

Введемо позначення:

$$\frac{a_{n1}}{r_k} = f_{0n1};$$

$$f_{0n1} Y_{n1} = P_{fn1};$$

$$a_{n1} Y_{n1} = M_{fn1},$$

де  $f_{0n1}$  – коефіцієнт опору коченню з невеликою швидкістю передніх коліс;  $P_{fn1}$ ,  $M_{fn1}$  – сила і момент опору коченню цих коліс.

Тоді

$$X_{n1} = f_{0n1} Y_{n1} = P_{fn1} = \frac{M_{fn1}}{r_k}. \quad (3)$$

Рівняння суми моментів сил відносно осі  $O_2$  задніх коліс:

$$\sum M_{O2} = Y_{n2} a_{n2} - X_{n2} r_k = 0, \quad (4)$$

звідки визначимо:

$$X_{n2} = \frac{a_{n2}}{r_k} Y_{n2}.$$

Введемо позначення:

$$\frac{a_{n2}}{r_k} = f_{0n2};$$

$$f_{0n2} Y_{n2} = P_{fn2};$$

$$a_{n2} Y_{n2} = M_{fn2},$$

де  $f_{0n2}$  – коефіцієнт опору коченню з невеликою швидкістю задніх коліс;  $P_{fn2}$ ,  $M_{fn2}$  – сила і момент опору коченню цих коліс.

Тоді

$$X_{n2} = f_{0n2} Y_{n2} = P_{fn2} = \frac{M_{fn2}}{r_k}. \quad (5)$$

Здійснивши підстановку співвідношень (3) і (5) у рівняння (1), отримуємо:

$$P_{fn1} + P_{fn2} = f_{0n1} Y_{n1} + f_{0n2} Y_{n2} = P_{екбф}. \quad (6)$$

Позначимо:

$$P_{fn1} + P_{fn2} = P_f;$$

$$f_{0n1} = f_{0n2} = f_0,$$

де  $P_f$  – сила опору коченню автомобіля, коефіцієнт опору коченню якого  $f_0$ . Після підстановки цих позначень у рівняння (6):

$$P_f = f_0 (Y_{n1} + Y_{n2}) = P_{екбф}.$$

Оскільки  $Y_{n1} + Y_{n2} = G_a$ , то в підсумку:



$$P_f = f_0 G_a = P_{\text{екб}f}, \quad (7)$$

звідки

$$f_0 = \frac{P_f}{G_a} = \frac{P_{\text{екб}f}}{G_a}. \quad (8)$$

На підставі зареєстрованих значень зусилля буксирування  $P_{\text{екб}fi}$  (Н) розраховується ряд значень коефіцієнта опору коченню  $f_{0i}$ :

$$f_{0i} = \frac{P_{fi}}{G_a} = \frac{P_{\text{екб}fi}}{G_a}, \quad (9)$$

де  $P_{fi}$  – значення сили опору коченню (Н), які дорівнюють  $P_{\text{екб}fi}$ ;  $i$  – індекс повторності реєстрації зусилля буксирування, становить  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  ( $n$  – число повторностей);  $G_a$  – вага автомобіля, Н.

Під коефіцієнтом зчеплення  $\phi$  автомобілів розуміють коефіцієнт зчеплення з опорною поверхнею їх рушіїв, від якого залежать тягово-швидкісні й гальмівні властивості автомобілів, керованість, прохідність та стійкість проти сповзання на схилах. Якщо колеса навантажуються лише у повздовжньо-вертикальній площині, а поперечні навантаження відсутні, коефіцієнт  $\phi$  відповідає повздовжньому зчепленню коліс.

Коефіцієнт зчеплення  $\phi$  визначається переважно експериментально способом ковзання окремого колеса чи способом буксирування автомобіля із загальмованими ковзними колесами [4]. На цей коефіцієнт впливають такі експлуатаційні фактори: тип і стан дороги; швидкість руху; рисунок та спрацювання протектора; тиск повітря в шинах; нормальне навантаження на колеса.

Від типу дороги залежать площа зони контакту колеса з опорною поверхнею та контактні питомі навантаження. На дорогах з твердим покриттям коефіцієнт зчеплення залежить від шорсткості й вологості опорної поверхні, наявності пилу і бруду. Якщо дорога мокра, на частину зони контакту діє підйомна гідродинамічна сила і ця частина перестає взаємодіяти з дорогою. Поява підйомної сили спричиняє істотне зменшення коефіцієнта зчеплення  $\phi$  відповідно збільшенню товщини водяної плівки. Шар вологого бруду на дорозі має щільність, вищу від води, тому додатково збільшується підйомна гідродинамічна сила й зменшується коефіцієнт зчеплення.

Швидкість руху автомобіля впливає на взаємодію коліс з виступами і впадинами поверхні дороги. З підвищенням швидкості на сухій поверхні гума протектора не встигає формувати контакт з впадинами. У результаті зменшуються площа зони контакту та коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою. На мокрих дорогах підйомна

гідродинамічна сила коліс пропорційна квадрату швидкості руху, із збільшенням якої також зменшуються площа контакту та коефіцієнт зчеплення. Крім того, якщо збільшуються швидкість та спрацювання протектора, погіршується відведення вологи через канавки рисунка протектора і зменшується коефіцієнт зчеплення.

Збільшення тиску повітря в шинах, а також нормальних навантажень коліс зумовлює на сухих дорогах з твердим покриттям деяке зменшення коефіцієнта зчеплення [15], що пояснюється зниженням тертя гуми в разі підвищення питомих навантажень. А на вологих забруднених дорогах вказані збільшення тиску і нормальних навантажень мають зворотний ефект. Тобто коефіцієнт зчеплення збільшується, оскільки підвищені питомі навантаження сприяють витисканню вологи і бруду.

На зчеплення автомобільних коліс найбільше впливають їх діаметр і рисунок протектора. Якщо радіальна деформація шин постійна, то із зростанням діаметра коліс дещо збільшується коефіцієнт зчеплення на дорогах з твердим покриттям внаслідок збільшення зони контакту з опорною поверхнею.

Рисунки протекторів коліс оцінюються за насиченістю, під якою розуміють відношення площі контакту виступів протектора до загальної контактної площі. З підвищенням насиченості рисунка поліпшується зчеплення коліс на сухих дорогах з твердим покриттям. На мокрих забруднених дорогах коефіцієнт зчеплення підвищується, якщо рисунок протектора сприяє відведенню вологи та бруду із зони контакту.

Коефіцієнт зчеплення  $\phi$  може визначатись способом буксирування, аналогічно як і коефіцієнт опору коченню. Буксирування відбувається з невеликою швидкістю автомобіля із загальмованими ковзними колесами, використовуючи розроблений пристрій для визначення тягово-зчіпних показників мобільних засобів [7].

Під час буксирування досліджуваного автомобіля (рис. 2) на експериментальній горизонтальній ділянці дороги передні колеса обертаються навколо осі  $O_1$  у веденому режимі, а задні – гранично загальмовані моментом  $M_{\text{тmax}2}$  й не обертаються навколо осі  $O_2$ , а ковзають. Сила тяжіння автомобіля  $G_a$  діє перпендикулярно до опорної поверхні, тобто експериментальної ділянки. Паралельно до цієї поверхні прикладається зусилля буксирування  $P_{\text{екб}f}$  автомобіля, яке передається пасом розробленого пристрою для визначення тягово-зчіпних показників [7].

У зонах контакту коліс з опорною поверхнею прикладаються нормальні реакції на передні  $Y_{n1}$  і задні  $Y_{n2}$  колеса, реакції зміщені від

осей  $O_1, O_2$  в напрямі буксирування на відстані відповідно  $a_{n1}, a_{n2}$ . Також у зонах контакту прикладаються дотичні повздовжні реакції на передні  $X_{n1}$  колеса й загальмовані ковзні задні –  $X_{n2}$ .

Відзначимо збіжну з опорною поверхнею вісь  $X$ , яка спрямована за напрямом буксирування, і запишемо рівняння суми проєкцій на цю вісь сил, що діють під час буксирування з постійною невеликою швидкістю автомобіля із загальмованими ковзними колесами:

$$\sum X = P_{зкб\phi} - X_{n1} - X_{n2} = 0. \quad (10)$$

Знехтувавши моментами опору обертанню передніх коліс  $M_{r1} = 0$  та задніх –  $M_{r2} = 0$ , що зумовлені тертям у підшипниках маточин коліс, а також опором повітря обертанню, запишемо рівняння суми моментів сил відносно осі  $O_1$ :

$$\sum M_{O1} = Y_{n1} a_{n1} - X_{n1} r_{\kappa} = 0, \quad (11)$$

звідки

$$X_{n1} = \frac{a_{n1}}{r_{\kappa}} Y_{n1}.$$

Введемо позначення:

$$\frac{a_{n1}}{r_{\kappa}} = f_{0n1};$$

$$f_{0n1} Y_{n1} = P_{fn1};$$

$$a_{n1} Y_{n1} = M_{fn1},$$

де  $f_{0n1}$  – коефіцієнт опору коченню з невеликою швидкістю передніх коліс;  $P_{fn1}, M_{fn1}$  – сила і момент опору коченню цих коліс.

Тоді

$$X_{n1} = f_{0n1} Y_{n1} = P_{fn1} = \frac{M_{fn1}}{r_{\kappa}}. \quad (12)$$

Рівняння суми моментів сил [11] відносно осі  $O_2$  задніх загальмованих ковзних коліс:

$$\sum M_{O2} = Y_{n2} a_{n2} + M_{zmax2} - X_{n2} r_{\kappa} = 0, \quad (13)$$

звідки

$$X_{n2} = \frac{a_{n2}}{r_{\kappa}} Y_{n2} + \frac{M_{zmax2}}{r_{\kappa}}.$$

Введемо позначення:

$$\frac{a_{n2}}{r_{\kappa}} = f_{0n2};$$

$$f_{0n2} Y_{n2} = P_{fn2};$$

$$a_{n2} Y_{n2} = M_{fn2};$$

$$\frac{M_{zmax2}}{r_{\kappa}} = P_{\phi n2} = \phi Y_{n2},$$

де  $f_{0n2}$  – коефіцієнт опору коченню з невеликою швидкістю задніх загальмованих ковзних коліс;  $P_{fn2}, M_{fn2}$  – сила і момент опору

коченню цих коліс;  $P_{\phi n2}$  – сила зчеплення загальмованих ковзних коліс з опорною поверхнею;  $\phi$  – коефіцієнт зчеплення.

Тоді

$$X_{n2} = f_{0n2} Y_{n2} + \phi Y_{n2} = P_{fn2} + P_{\phi n2}. \quad (14)$$

Здійснивши підстановку співвідношень (12) і (14) в рівняння (10), отримуємо:

$$P_{fn1} + P_{fn2} + P_{\phi n2} = f_{0n1} Y_{n1} + f_{0n2} Y_{n2} + \phi Y_{n2} = P_{зкб\phi}. \quad (15)$$

Позначимо:

$$P_{fn1} + P_{fn2} = P_f;$$

$$f_{0n1} = f_{0n2} = f_0,$$

де  $P_f$  – сила опору коченню автомобіля, коефіцієнт опору коченню якого –  $f_0$ .

Після підстановки цих позначень у рівняння (15):

$$P_f + P_{\phi n2} = f_0 (Y_{n1} + Y_{n2}) + \phi Y_{n2} = P_{зкб\phi}.$$

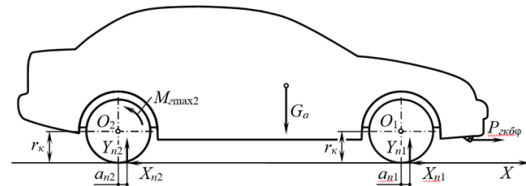
Нормальна реакція опорної поверхні на задні загальмовані колеса автомобіля  $Y_{n2} = G_{a2}$ , де  $G_{a2}$  – частина сили тяжіння автомобіля, що припадає на ці колеса і встановлюється зважуванням задньої осі. Сума нормальних реакцій  $Y_{n1} + Y_{n2} = G_a$ , то в підсумку

$$f_0 G_a + \phi G_{a2} = P_{зкб\phi}, \quad (17)$$

звідки

$$\phi = \frac{P_{зкб\phi} - f_0 G_a}{G_{a2}}. \quad (18)$$

Під час визначення коефіцієнта зчеплення встановлюється значення зусилля буксирування за допомогою електронного динамометра, розробленого пристрою [12] для визначення тягово-зчіпних показників мобільних засобів (рис. 3 а, б).



**Рис. 2.** Схема сил і моментів, що діють на автомобіль із задніми загальмованими ковзними колесами під час буксирування

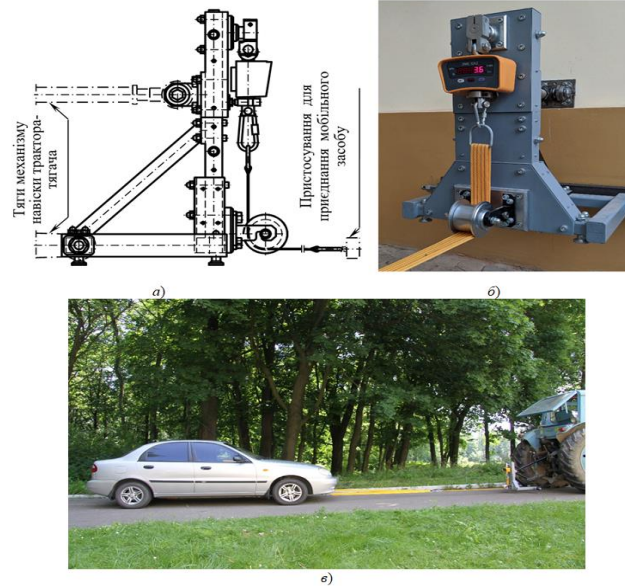
**Fig. 2.** Diagram of forces and moments acting on a car with rear locked sliding wheels during towing

Під час випробування (рис. 3, в) трактор-тягач починає рух з постійною невеликою швидкістю до 6 км/год, зрушує з місця і буксирує приєднаний автомобіль. За показами динамометра реєструються поточні значення  $P_{зкб\phi_i}$  (Н) зусилля буксирування на початку ковзання задніх загальмованих коліс, а на підставі цього зусилля розраховується ряд значень  $\phi_i$  коефіцієнта зчеплення:

$$\varphi_i = \frac{P_{\text{зб}i} - f_{0i} G_a}{G_{a2}}, \quad (19)$$

де  $i$  – індекс повторності реєстрації зусилля буксирування автомобіля, становить  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  ( $n$  – число повторностей);  $f_{0i}$  –

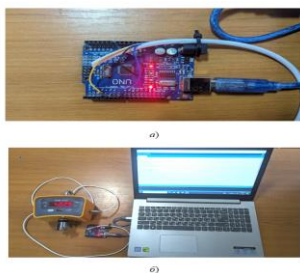
попередньо визначені значення коефіцієнта опору коченню рушіїв автомобіля із силою тягіння  $G_a$  (Н), частина  $G_{a2}$  (Н) якої припадає на задні загальмовані колеса.



**Рис. 3.** Визначення зусилля буксирування автомобіля за допомогою пристрою для визначення тягово-зчіпних показників

**Fig. 3.** Determining the towing force of a car using a device for determining traction and grip indicators

Для підвищення точності визначення зусилля буксирування мобільних засобів необхідне зменшення елементарного інтервалу реєстрації значень вимірювання [9]. З цією метою запропоновано використовувати програмний модуль (рис. 4, а), який приєднується за допомогою аналого-цифрового перетворювача до силової тензоланки електронного динамометра [10]. Цей модуль представлений у вигляді мікросхеми з аналого-цифровим перетворювачем, що з'єднується через мікроконтролер з шиною підключення зовнішніх пристроїв та інтерфейс виводу даних [13]. Така архітектура модуля забезпечує передачу даних на електронний носій інформації чи персональний комп'ютер (рис. 4, б).



**Рис. 4.** Схема під'єднання програмного модуля до електронного динамометра тягового пристрою

**Fig. 4.** Scheme of connecting the software module to the electronic dynamometer of the traction device

Тензометрична ланка, що застосовується в електронному динамометрі, характеризується частотою реєстрації даних у межах 10 – 80 Гц, що є значно меншим від досяжного для дослідника елементарного інтервалу вимірювання  $\Delta t_{di}$ . Під час використання програмного модуля можна встановити невеликий елементарний інтервал  $\Delta t_{ni}$  (дискретність реєстрації даних), завдяки чому знижується загальна похибка вимірювання [8].

Особлива увага під час обґрунтування методики досліджень з використанням тягового пристрою була приділена способу отримання даних та математичним методам їх обробки через певну мінливість умов проведення експериментів (постійна зміна мікропрофілю дороги, коливання тягового зусилля трактора-тягача, дія сил інерції досліджуваного автомобіля). Для встановлення експериментальних залежностей та зв'язків між варіативними показниками вимірювань розроблено програму (рис. 5) отримання та аналізу дослідних даних, що забезпечує збільшення статистичної вибірки результатів вимірювань.

Перед проведенням досліджень оператор може змінювати інтервал вимірювання та частоту фіксації й запам'ятовування даних шляхом зміни конфігурації програми за допомогою персонального комп'ютера [14].



```

#define PIN_FORCE_SENSOR_1 4
#define PIN_FORCE_SENSOR_2 3

#define MODE_DIFF_FORCE_TEMP_FORCE_DIFF_FORCE
#define MODE_DIFF_FORCE

unsigned long nextRecordReadTimeThreshold;
unsigned int recordInterval = 500;

void setup() {
  pinMode(PIN_FORCE_SENSOR_1, INPUT);
  pinMode(PIN_FORCE_SENSOR_2, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  nextRecordReadTimeThreshold = millis() + recordInterval;
}

void loop() {
  if(millis() > nextRecordReadTimeThreshold) {
    nextRecordReadTimeThreshold = millis() + recordInterval;
  }

  unsigned long readTime();
}

```

Рис. 5. Програма для автоматичної фіксації зусилля буксирування  
 Fig. 5. Program for automatic determination of towing force

Після налаштувань програмний модуль з'єднується з електронним динамометром через стандартизований роз'єм [10] за допомогою мережевого кабелю – чотирьох ізольованих провідників у ПВХ оболонці, скручених між собою у дві пари, що захищає сигнал від зовнішніх електромагнітних завад. Передача даних від модуля на персональний комп'ютер здійснюється стандартизованим кабелем USB type B для arduino Uno. У цьому разі дані не відображаються на екрані динамометра, а лише записуються на електронний носій інформації або персональний комп'ютер. За допомогою програми результати вимірювання зберігаються у вигляді семизначного коду, в якому перші три цифри визначають масу в цілих значеннях, а четверта – десяткових, що відповідає дискретності й точності показів, декларованих виробником. Три останні цифри через мінливість значень не враховуються під час вимірювання. Отримані таким чином дані вимірювань зберігаються у вигляді окремого csv-файла з можливістю його подальшого імпорту та експорту між різними програмами чи текстовими редакторами. Зусилля буксирування розраховується програмою автоматично за допомогою перевірених коефіцієнтів, отриманих під час калібрування і тарування динамометра. Також за допомогою програми результати експериментів перевіряються на мінімальність дисперсії відхилення відносно середнього значення, наявність систематичних помилок під час вимірювання.

Дослідження проводились одночасно для типів пневматичних безкамерних шин – літніх Debica Passio 2 175/70 R13 82T та зимових Fulda Kristall Montero 3 175/70 R13 82T (рис. 6), температура повітря при цьому становила + 18 °C ...+ 22 °C.

Коефіцієнт опору коченню  $f_{0i}$  та зчеплення  $\varphi_i$  (рис. 7 а, б) коліс автомобіля визначено на основі зусилля буксирування  $P_{скб\varphi_i}$  на типових поверхнях доріг (табл. 1, 2). Для автомобілів загального призначення – асфальтованої, гравійної, ґрунтової сухої і після дощу [5; 15].



Рис. 6. Рисунок протектора досліджуваних літніх та зимових шин

Fig. 6. Tread pattern of summer and winter tires

За допомогою програмного модуля отримано значення зусилля буксирування для експериментальних ділянок асфальтованої, ґрунтової, гравійної й мокрої ґрунтової доріг [5]. Значення  $f_{0i}$  встановлені на етапі попередніх досліджень й на їх основі визначено коефіцієнти зчеплення для вказаних умов.

Як видно з графіків (рис. 7, б) для асфальтованої дороги коефіцієнт зчеплення  $\varphi_i$  за питомого тиску в шинах 0,2 МПа перебуває в межах 0,6914...0,7162 із середнім значенням 0,698.

Для ґрунтової дороги значення  $\varphi_i$  - 0,5754 ...0,6144 із середнім значенням 0,595. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3755...0,4451 із середнім значенням 0,408. Найменші значення  $\varphi_i$  отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3275...0,3768 із середнім значенням 0,358.

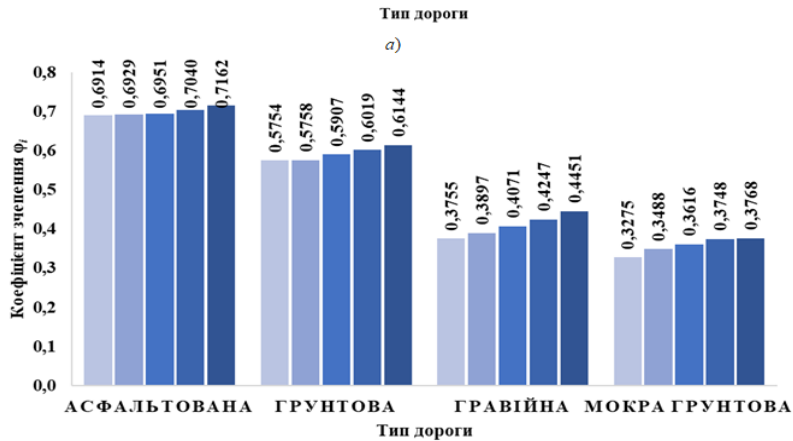
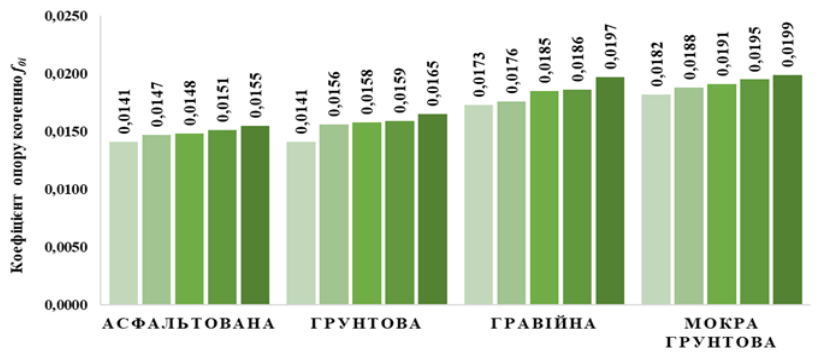
Як видно з графіків (рис. 8, а), значення коефіцієнтів опору коченню для зимових шин є меншим порівняно з літніми. Також отримано менші значення коефіцієнта зчеплення зимових шин для асфальтованої дороги,  $\varphi_i$  є в межах 0,6138...0,6514 із середнім значенням 0,6280, що менше на 7 % (рис. 8, б).

Для ґрунтової дороги значення  $\varphi_i$  становлять 0,5799...0,6045 із середнім значенням 0,5919. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3847...0,4041 із середнім значенням 0,3945. Більші порівняно з літніми шинами значення  $\varphi_i$  отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3761...0,3908 із середнім значенням 0,3825.

**Таблиця 1.** Результати дослідження коефіцієнта опору коченню та зчеплення коліс Debica Passio 2 175/70 R13 82T автомобіля ЗАЗ Sens

**Table 1.** Results of the study of the coefficient of rolling resistance and grip of Debica Passio 2 175/70R13 82T wheels of the ZAZ Sens

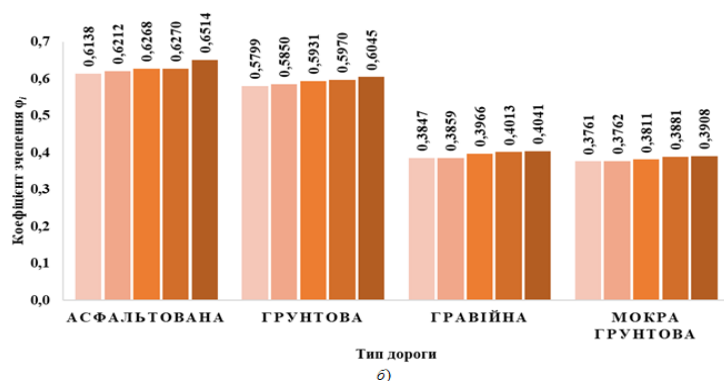
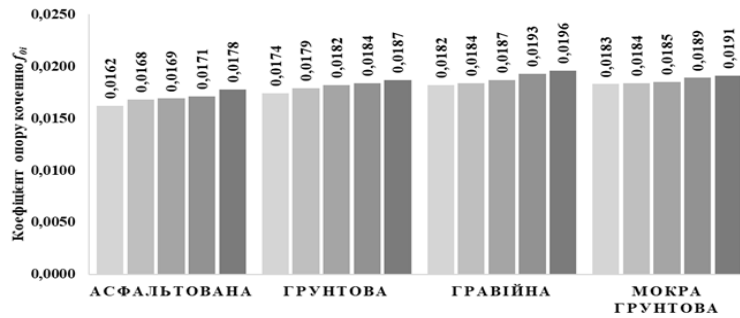
Дорога	Вага автомобіля		Індекс $i$	Зусилля буксирування $P_{збfi}$ , Н	Коефіцієнт опору коченню $f_{0i}$	Середнє значення $f_0$	Зусилля буксирування $P_{збfi}$ , Н	Коефіцієнт зчеплення $\phi_i$	Середнє значення $\phi$
	$G_{a1}$ , Н	$G_{a2}$ , Н							
Асфальтована	10791	4905	1	152,1531	0,0141	0,0148	3543,37	0,6914	0,698
			2	162,9441	0,0151		3615,97	0,7040	
			3	159,7068	0,0148		3672,86	0,7162	
			4	158,6277	0,0147		3567,9	0,6951	
			5	167,47632	0,01552		3565,94	0,6929	
Грунтова	10791	4905	1	178,0515	0,0165	0,0155	3130,37	0,6019	0,595
			2	170,4978	0,0158		2994,99	0,5758	
			3	168,3396	0,0156		3065,63	0,5907	
			4	171,5769	0,0159		3185,31	0,6144	
			5	152,1531	0,0141		2974,39	0,5754	
Гравійна	10791	4905	1	199,6335	0,0185	0,0183	2282,79	0,4247	0,408
			2	189,9216	0,0176		2031,65	0,3755	
			3	200,7126	0,0186		2112,09	0,3897	
			4	212,5827	0,0197		2209,21	0,4071	
			5	186,6843	0,0173		2370,1	0,4451	
Мокра грунтова	10791	4905	1	214,7409	0,0199	0,0191	2053,23	0,3748	0,358
			2	202,8708	0,0188		1913,93	0,3488	
			3	206,1081	0,0191		1979,66	0,3616	
			4	196,3962	0,0182		2044,4	0,3768	
			5	210,4245	0,0195		1816,81	0,3275	



**Рис. 7.** Результати дослідження коефіцієнтів опору коченню і зчеплення літніх шин на різних типах доріг  
**Fig. 7.** The study results on rolling resistance coefficients and wheel grip of summer tires on various road types.

**Table 2.** Results of the study of the coefficient of rolling resistance and grip of Fulda Kristall Montero 3 175/70 R13 82T wheels of the ZAZ Sens

Дорога	Вага автомобіля		Індекс $i$	Зусилля буксирування $P_{\text{кбф}i}$ , Н	Коефіцієнт опору коченню $f_{0i}$	Середнє значення $f_0$	Зусилля буксирування $P_{\text{кбф}i}$ , Н	Коефіцієнт зчеплення $\varphi_i$	Середнє значення $\varphi$
	$G_a$ , Н	$G_{a2}$ , Н							
Асфальтована	10791	4905	1	174,81	0,0162	0,0170	3185,31	0,6138	0,6280
			2	182,37	0,0169		3257,9	0,6270	
			3	192,08	0,0178		3387,39	0,6514	
			4	181,29	0,0168		3255,94	0,6268	
			5	184,53	0,0171		3231,41	0,6212	
Грунтова	10791	4905	1	196,4	0,0182	0,0181	3124,49	0,5970	0,5919
			2	198,55	0,0184		3107,81	0,5931	
			3	201,79	0,0187		3046,01	0,5799	
			4	187,76	0,0174		3152,93	0,6045	
			5	193,16	0,0179		3062,68	0,5850	
Гравійна	10791	4905	1	201,79	0,0187	0,0188	2183,71	0,4041	0,3945
			2	196,4	0,0182		2141,52	0,3966	
			3	198,55	0,0184		2085,61	0,3847	
			4	211,5	0,0196		2104,25	0,3859	
			5	208,27	0,0193		2176,84	0,4013	
Мокра грунтова	10791	4905	1	203,95	0,0189	0,0186	2120,92	0,3908	0,3825
			2	206,11	0,0191		2051,27	0,3762	
			3	197,48	0,0183		2066,97	0,3811	
			4	198,55	0,0184		2102,28	0,3881	
			5	199,63	0,0185		2044,4	0,3761	

**Рис. 8.** Результати дослідження коефіцієнтів опору коченню і зчеплення зимових шин на різних типах доріг**Fig. 8.** The results of the study of coefficients of rolling resistance and wheel grip of winter tires on different types of roads

**Висновки.** Стандартний тяговий пристрій для визначення тягово-зчіпних властивостей мобільних енергетичних засобів характеризується значним елементарним інтервалом вимірювання  $\Delta t_{0i}$ , який обмежений можливістю лю-

дини візуально спостерігати і реєструвати поточні покази динамометра. Такий значний інтервал спричиняє низьку точність визначення зусилля буксирування, а відповідно середнього значення сили та коефіцієнта опору коченню і

зчеплення. Це зумовлено значною швидкістю зміни показів динамометра через мінливість мікропрофілю дороги. Тому візуальний спосіб спостереження під час досліджень вкрай неточний.

Розроблено методику та програмний комплекс для підвищення точності визначення зусилля буксирування мобільних енергетичних засобів, що забезпечується зменшенням елементарного інтервалу реєстрації значень вимірювання. Запропонований програмний модуль приєднується до силової тензоланки електронного динамометра. Модуль представлений у вигляді мікросхеми з аналого-цифровим перетворювачем, що з'єднується через мікроконтролер з шиною підключення зовнішніх пристроїв та інтерфейс виводу даних. Така архітектура модуля забезпечує передачу даних на електронний носій інформації карту пам'яті чи персональний комп'ютер.

Визначено коефіцієнти опору кочення та зчеплення літніх шин Debica Passio 2 175/70 R13 82T автомобіля ЗАЗ Sens для різних типів опорної поверхні. Встановлено, що для асфальтованої дороги значення  $\phi_i$  перебуває в межах 0,6914...0,7162 із середнім значенням 0,698. Для ґрунтової дороги значення  $\phi_i$  становлять 0,5754...0,6144 із середнім значенням 0,595. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3755...0,4451 із середнім значенням 0,408. Найменші значення  $\phi_i$  отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3275...0,3768 із середнім значенням 0,358.

Для зимових шин Fulda Kristall Montero 3 коефіцієнт зчеплення для асфальтованої дороги  $\phi_i$  є в межах 0,6138...0,6514 із середнім значенням 0,6280. Для ґрунтової дороги значення  $\phi_i$  становлять 0,5799...0,6045 із середнім значенням 0,5919. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3847...0,4041 із середнім значенням 0,3945. Більші порівняно з літніми шинами значення  $\phi_i$  отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3761...0,3908 із середнім значенням 0,3825.

#### Бібліографічний список

1. Вікович І. А. Теорія руху транспортних засобів: підручник. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2013. 672 с.
2. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля: підручник. Суми: Унів. кн., 2010. 320 с.
3. Вплив стабілізуючого моменту шин на курсову стійкість руху автомобіля / В. П. Сахно, В. Г. Вербицький, А. В. Костенко, Н. Л. Белєцова, А. М. Єфименко. *Вісник Національного транспортного університету*. 2010. Вип. 21,

№1. С. 180-183.

4. Макаров В. А. Моделювання руху автомобіля з урахуванням тягової сили й перерозподілу маси. *Автомобільний транспорт*. 2013. № 32. С. 23-28.

5. Мармут І. А., Кашканов В. А., Зуєв В. О. Експериментальне дослідження опору кочення коліс автомобіля на роликовому стенді. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2020. № 2 (12). С. 68-75.

6. Подригало М. А., Волков В. П., Бобошко В. П. Динаміка автомобіля / за ред. М. А. Подригала. Харків: ХНАДУ, 2008. 424 с.

7. Пристрій для визначення зусилля буксирування мобільних засобів: пат. 138538 Україна: МПК G01M 17/02. №u2019006620; заявл. 12.06.2019; опубл. 25.11.2019, Бюл. № 22. 4 с.

8. Пристрій для визначення сили і коефіцієнта опору коченню мобільних засобів: пат. 154291 Україна: G01M 17/02 (2006.01). № u 202301569; заявл. 10.04.2023; опубл. 01.11.2023, Бюл. № 44. 4 с.

9. Тищенко К. В., Ткач О. П. Програмування систем збору і аналізу даних: навч. посіб. Суми: Сум. держ. ун-т, 2022. 168 с.

10. Цирульник С. М. Програмно-апаратний комплекс «Arduino learner kit». *Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету: електронне наукове фахове видання*. 2021. № 10. С. 231-240. doi: 10.28925/2414-0325.2021.1019.

11. Шевчук Р. С. Експлуатаційні показники тракторів і автомобілів: практикум з розрахунку показників. Львів: Львів. нац. аграр. ун-т, 2018. 173 с.

12. Шевчук Р. С., Сукач О. М., Шевчук В. Модернізований пристрій для визначення тягово-зчіпних показників мобільних енергетичних засобів. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: матеріали XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Кропивницький, 8-10 лист. 2023 р.)*. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. С. 41-42.

13. Denton T. Automobile mechanical and electrical systems. New York: Routledge, 2018. 379 p.

14. Open Source Arduino Learner Kit V2. URL: <https://www.instructables.com/Open-Source-Arduino-Learner-Kit-V2/> (Last accessed: 15.03.2023).

15. Pacejka H. V. Tyre Mechanics and Vehicle Dynamics. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2002. 621 p.

Стаття надійшла 27.05.2024

## МОБІЛЬНІСТЬ ТА КЕРОВАНІСТЬ РУХУ АВТОМОБІЛЯ БЕЗДОРІЖЖЯМ: ФОРМУВАННЯ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

*Тарас Крайник, аспірант, Степан Ковалишин, к. т. н.  
Львівський національний університет природокористування  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл.  
e-mail: taras.kraynyk@gmail.com; stkovalyshyn@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.080>

### **Крайник Т., Ковалишин С. Мобільність та керованість руху автомобіля бездоріжжям: формування нормативної бази**

Проаналізовано методики та нормативні бази передових країн щодо вимог та оцінки мобільності – максимальних швидкостей руху та керованості – стійкості руху автомобілів бездоріжжям і ґрунтовими дорогами, насамперед щодо військової автотехніки (ВАТ), автомобілі для аграрної та лісгосподарської сфер. Зазначено, що це здебільшого відповідні модифікації (самоскиди, лісовози тощо) повнопривідної ВАТ другої лінії – забезпечення переднього краю. Окремою вимогою в цій сфері є дотримання агроекологічних вимог щодо допустимих тисків у контакті шин з ґрунтою. Змінюючи висоту нерівностей бездоріжжя формують особливі вимоги щодо кінематики підвіски і кермового приводу та, відповідно, щодо керованості та стійкості руху автомобілів. Збільшені амплітуди ходів підвіски для бездоріжжя зумовлюють і формування відповідної кінематики кермового приводу з умови максимального суміщення. Швидкісні режими руху лімітуються допустимим віброколивними навантаженнями на водія, що суттєво відрізняються від умов руху автодорогами з твердим покриттям.

Опрацьовано методику експериментальної оцінки мобільності руху автомобілів бездоріжжям та пропозиції щодо формування відповідної вітчизняної нормативної бази (з урахуванням Правил ЄЕК ООН щодо сертифікації конструкцій для допуску до експлуатації й на автодорогах з твердим покриттям).

**Ключові слова:** автомобілі, бездоріжжя, кінематика підвіски та кермового приводу, мобільність, керованість, нормативні вимоги.

### **Krainyk T., Kovalyshyn S. Mobility and controllability of off-road vehicle movement: formation of a regulatory framework**

A review and analysis of the methods and regulatory frameworks used by advanced countries concerning the requirements and evaluation of vehicle mobility – specifically maximum movement speeds and controllability - has been conducted. This assessment primarily focuses on military vehicles (MVs), while vehicles used in agriculture and forestry, such as dump trucks and timber trucks, are often modified forms of these all-wheel-drive MVs. One critical requirement in this field is compliance with agroecological standards, particularly regarding the permissible pressure exerted by tires on the soil, depending on agroecological conditions. Variations in the heights of off-road obstacles create specific demands for the suspension systems and steering kinematics, thereby affecting the controllability and stability of the vehicles. The greater amplitudes of suspension movement encountered off-road require the development of corresponding kinematics in the steering system, particularly under maximum alignment conditions. High-speed driving on unpaved surfaces is constrained by acceptable vibration loads on the driver, which differ significantly from those experienced on paved roads.

This study also developed a method for experimentally evaluating the mobility of off-road vehicles, along with proposals for establishing a national regulatory framework that aligns with the UN/ECE rules for the certification of vehicles intended for operation on paved roads.

**Keywords:** cars, off-road, suspension and steering kinematics, mobility, controllability, regulatory requirements.

**Постановка проблеми.** Проблема кардинального оновлення парку ВАТ у ЗС України та існуючого, практично амортизованого автопарку внутрішньогосподарських перевезень (з поля в комору) в аграрній сфері та транспортування деревини від місць заготівлі, що базувались досі на автотехніці заводів на території рф, є очевидною. З іншого боку, очевидна й необхідність переходу на якісно вищий етап автомобілів таких сфер використання як щодо гармонізації ВАТ з нормативними базами країн

НАТО, так і щодо екології та безпечності конструкцій в аграрній та лісгосподарській галузях (зокрема умов відповідності прийнятим в Україні вимогам сертифікації – Правил ЄЕК ООН щодо допуску до експлуатації на автодорогах загального призначення). У країнах НАТО є національні стандарти щодо вимог та оцінки відповідності ВАТ, які охоплюють не тільки прохідність, а й мобільність руху бездоріжжям (на відміну від відповідних

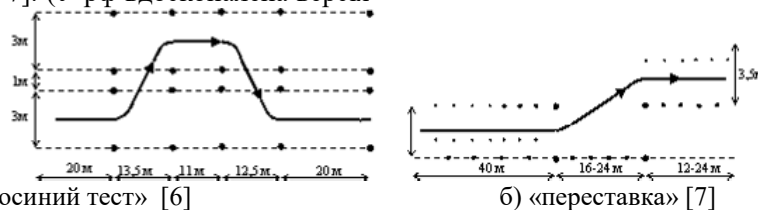


ГОСТУ ссср та сучасних ГОСТ РВ, де охоплено тільки прохідність) [1-4]. Очевидно, що вимоги щодо вантажівок для аграрної та лісогосподарської сфер є найближчими до сучасної ВАТ другої лінії – забезпечення переднього краю, однак з іншими типами забудови шасі (самоскиди, лісовози тощо).

**Постановка завдання.** Об'єктивна необхідність оновлення вітчизняного парку автомобілів для бездоріжжя обумовлює потребу в опрацюванні відповідної нормативної бази щодо необхідних технічних характеристик та оцінки відповідності, насамперед щодо прохідності та мобільності руху, що істотно формуються підвіскою та кермовим управлінням.

**Виклад основного матеріалу.** Мета дослідження – опрацювання базових засад формування вітчизняної нормативної бази щодо вимог та оцінки мобільності руху автомобілів для бездоріжжя.

Оцінку керованості та взаємопов'язаної стійкості руху автомобілів загального призначення на автодорогах з твердим покриттям можна проводити на базі добровільних 27 стандартів ISO, нещодавно прийнятих і в Україні як ДСТУ наказами Мінекономрозвитку України № 1430 та № 1431 від 13.12.2014 р. [5]. Останні, однак, не входять до переліку обов'язкових при проведенні сертифікації – схвалення типу нових моделей автомобілів, як умови допуску до руху на автодорогах загального призначення, зрештою як і чинний з 1996 р. ДСТУ 3310-96, як аналог обов'язкового ГОСТУ СРСР щодо оцінки стійкості руху [6; 7]. (У рф вдосконалена версія



**Рис. 1.** Схеми випробувальних тестів оцінки критичних швидкостей маневру автомобілів з умов стійкості/керованості руху

**Fig. 1.** Schemes of tests for evaluating the critical speeds of maneuvering cars from the conditions of stability of traffic controllability

Більша складність, активне використання у країнах ЄС та наближеність до реалій руху власне маневру «посиний тест» (див. рис. 1а) зумовлює доцільність власне його використання, зокрема і з умов оцінки максимально можливих швидкостей об'їзду перешкод, мобільності в умовах бездоріжжя.

Остання, однак, в умовах бездоріжжя при наявних високих питомих потужностях обмежується насамперед гранично допустимими віброколивними навантаженнями на водія/екіпаж, що

ГОСТ є обов'язковою при сертифікації [8]). Обов'язковим випробуванням у цій сфері руху фактично залишаються тільки вимоги Правил ЄЕК ООН № 13 щодо збереження курсової стійкості руху при екстремому гальмуванні і відпущеному кермі. Однак щодо керованості – зміни напрямку руху, що особливо актуально для ВАТ, обов'язкові вимоги як умови допуску до експлуатації в Україні фактично відсутні. Водночас для ВАТ у країнах НАТО чинна окрема нормативна база [1; 2; 5], що передбачає низку окремих додаткових вимог, насамперед щодо умов руху бездоріжжям.

Нестабільність фізико-механічних характеристик ґрунтових та піщаних ОП зумовлює проведення значної частини приймальних випробувань автомобілів для бездоріжжя власне на твердих, здебільшого бетонних площадках, із фактично фіксованими значеннями коефіцієнтів зчеплення та опору коченню шин. Очевидна певна пропорційність погіршення отриманих показників, пропорційна зміні зчеплення та опору кочення на реальних ґрунтових та піщаних ОП.

У цьому плані випробувальні тести для оцінки максимально можливих, критичних швидкостей здійснення маневру з умов збереження стійкості руху, як нормативна база [6-8], становлять практичний інтерес – як з умов пропорційного зниження критичної швидкості відповідно до зменшення коефіцієнта зчеплення на конкретному бездоріжжі, так і умов оцінки коректності кінематики суміщення підвіски та кермового приводу в критичних умовах зміни смуги руху (рис. 1).

зумовило появу і зростаюче розповсюдження в усіх класах ВАТ, включно надважкі автомобілі так званих довгоходових підвісок із збільшеною у 1,5-2 рази амплітудою ходів (Timoney, Oshkosh TAK-4 тощо [9]). Як приклад (тут і об'єкт випробувань), на рис. 2 представлено підвіску такого типу в легкому автомобілі для бездоріжжя – 5-місному баггі. Відсутність класичної рами при забудові просторової каркасної конструкції дозволила видовжені А-подібні важелі підвіски закріпити до здвоєних поздо-

вжніх лонжеронів каркаса передка та забезпечити максимальну амплітуду ходів підвіски в межах заданої колії. Власне оцінка ходів підвіски, окрім звичної оцінки вібронавантажень – плавності руху бездоріжжям, що проводиться на спеціальній випробувальній ділянці – «бельгійській бруківці», у світлі поточного переходу на вищезгадані довгоходові конструкції стає новим фрагментом випробувань та нормативної бази для ВАТ [10].



**Рис. 2.** Передня довгоходова підвіска на поперечних А-подібних важелях (легкий ударний автомобіль – баггі ТУР КВ 02 «Мамай»)

**Fig. 2.** Front long-travel suspension on traverse A-similar levers (light strike vehicle- military buggy TUR KB 02 “Mamai”)

Як показує аналіз зарубіжних [11; 12] та вітчизняних [13] досліджень у цій сфері, методика експериментальної оцінки базується на переїзді регламентованої одиничної перешкоди (типу підвищеного пішохідного переходу або бордюрної плити). Зрештою ефективність такого підходу з точки зору оцінки швидкості, на якій відбувається «пробій» підвіски з різни-

ми амплітудами ходів (на прикладі військового джипа HMMWV моделей М998 з амплітудою ходів підвіски 216 мм та вдосконаленого М1114 з амплітудою 355 мм) підтверджена і в дослідженні [14].

Відсутність в Україні спеціальної випробувальної ділянки типу «бельгійська бруківка» створює відповідну проблему щодо оцінки плавності руху в умовах, адекватних до прийнятих у Європі, але ця практика поширена щодо автомобілів загального призначення. Щодо автомобілів для бездоріжжя, насамперед ВАТ, у нормативній базі провідних країн НАТО відсутня вимога щодо оцінки підвіски на такій ОП – але, на прикладі [1], наявні вимоги щодо ходів підвіски (доступний перепад висот ОП) та демпфуючих характеристик (табл. 1). Експериментальна оцінка відповідності цим вимогам реальна при переїзді через відповідні порогові перешкоди (для ВАТ різних класів прохідності – сфер використання – від переднього краю до тилового транспорту на автодорогах), або ж на спеціалізованих стендах. ( В ГОСТах СССР та РФ [3; 4] вимоги до підвіски відсутні). Водночас віброколивні навантаження на водія/екіпаж, що і є оцінкою ефективності підвіски при відомому мікропрофілі ОП, є регламентуючим чинником досягнення порогових, граничних значень яких обмежує максимально допустимі швидкості руху – мобільність ВАТ конкретним бездоріжжям згідно відповідної нормативної бази НАТО [15].

**Таблиця 1.** Нормативні вимоги щодо прохідності та підвіски легкої ВАТ (вантажністю до 4 т) різних класів [1]

**Table 1.** Regulatory requirements for cross-country ability and suspension of light military vehicles (weighing up to 4 tons) of different classes

Прохідність/ показники	Висока	Підвищена	Середня	Покращена а низька	Низька
Кліренс, мм	400	260	180	150	115
ММР, кПа	<280	280-350	350-550	550-700	> 700
Підвіска: період затух. коливань, с	0,75	0,65	0,6	0,6	0,6
Затухання, крит. %	30-45	25-45	25-50	20-50	20-50
Доступний перепад висот ОП, мм	200	150	125	125	100

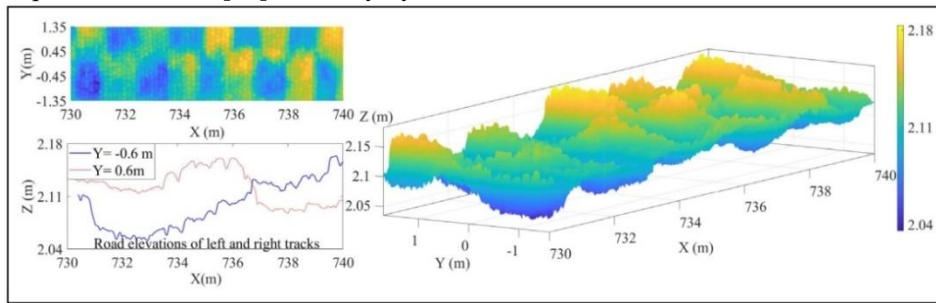
де ММР – максимально допустимий тиск у контактній шини з опорною поверхнею при завантаженому автомобілі.

Експериментальна оцінка вібронавантажень базується на апробованому вимірювальному комплексі [16] (рис.3), з використанням датчиків вібрації та програмного забезпечення Arduino [17], що дозволяють оцінити в рамках вимог нормативні акти [18; 19]. Порогові, гранично допустимі значення віброприскорень (частота 0-20 Гц технічно – коливання, більше ніж 20 Гц – для автомобілів до 84 Гц – вібрації) формуються для автомобілів загального призна-

чення звично для рівня В – продуктивність діяльності людини не знижується з-за втоми, спричиненої вібрацією, впродовж певного періоду часу дії/руху [18]. Очевидно, що граничні значення допустимих віброприскорень залежать від тривалості дії (часу руху певним бездоріжжям чи дорогою), так і від частоти збурень /швидкості руху. Рух упродовж однієї години – це діапазон віброприскорень  $0,8-6 \text{ м/с}^2$  (менші значення у зоні частот 4-8 Гц), впродовж чо-

тирьох годин – це вже  $0,35-1,8 \text{ м/с}^2$  [10], однак згідно з [18] для оцінки вібронавантажень приймаються значення, найбільші з трьох ординат, для автомобілів загального призначення на асфальтобетоні – це звично вертикальні, поздовжні та поперечні коливання з оцінки виключаються. Очевидно, що в умовах бездоріжжя вагомість поперечних та поздовжніх коливань значно зростає. І для оцінки плавності руху ВАТ у Великобританії, США та інших країн [11; 12] частіше використовується британський стандарт оцінки вібронавантажень [20], в якому сума-

рна оцінка вібронавантажень враховує всі три напрямки дії (з урахуванням вагомості частот коливань/вібрацій, що дещо відрізняється від ISO [18]). Експериментальну оцінку плавності руху – вібронавантажень на екіпаж, зокрема повнопривідних багатоцільових автомобілів, що використовуються і у військовій сфері, Daimler AG поводить на випробувальній ділянці типу «бельгійська бруківка» (рис. 3) [21], що є типовою для автовиробників у ЄС [22], мікропрофіль якої є оцифрованим та використовується і при проєктуванні та модернізації підвісок.



**Рис. 3.** Характеристика тестової ділянки «бельгійська бруківка» концерну Daimler AG [21]  
**Fig. 3.** Characteristics of the test site “Belgian cobblestones” of the Daimler concern [21]

Встановлено, що нормативна оцінка ефективності підвісок автомобілів у практиці ЄС проводиться на твердих опорних поверхнях із вбудованими елементами штучних перешкод різних висот [10-12; 14], зокрема й вищезгадана «бельгійська бруківка». У цьому плані більш звична для офіційних вітчизняних та європейських автодилерів випробувальна ділянка для підвіски кросоверів (рис. 4). Ділянка має послідовно розміщені, викладені з бруківки три пороги, зокрема «лежачі поліцейські», та 14 асиметрично викладених (для збурення і поперечних коливань) заокруглених перешкод з поступовим зростанням висоти вершин від 5 до 10 см (рис. 4).

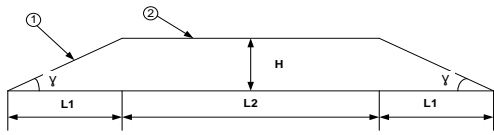


**Рис. 4.** Автомобілі підвищеної прохідності ТУР KB 022 «Мамай» та УАЗ 3151 під час випробувань – оцінки плавності руху на спеціальній тестовій ділянці

**Fig. 4.** All-terrain vehicles TUR KB 022 “Mamai” and UAZ 3151 during smoothness evaluation tests on a special test area

Власне з умов оцінки ефективності підвіски автомобілів високої та підвищеної прохідності тестова ділянка такого типу ближча до умов твердого бездоріжжя, максимальна швидкість руху на яких – мобільність фактично обмежується досягненням неприйнятних для орга-

нізму людини віброколивних навантажень. Окрім цього, така ділянка, на відміну від «бельгійської бруківки», забезпечує однакові збурення на підвіску незалежно від ширини колії автомобіля, а отже, коректність порівняльних оцінок підвісок різних автомобілів, а також більші перепади висот профілю опорної поверхні, що є характерним власне для бездоріжжя. Нещодавня поява у ВАТ довгоходових підвісок типу Timoney / Oshkosh TAK 4 [9-11] (хоча власне довгоходові незалежні підвіски із збільшеною амплітудою ходу понад 400 мм відомі віддавна на вантажівках Tatra, однак з рамою так зв. хребтового типу) обумовлює необхідність оцінки для автомобілів – позашляховиків критичної швидкості руху, при якій відбувається «пробій» підвіски та критичні, недопустимі для організму людини ударні віброколивні навантаження. Явище «пробою» підвіски формується не тільки амплітудою ходів, а й пружно-демпфуючими характеристиками підвіски, тому проста процедура заміру ходів підвіски недостатня. З проведеного аналізу можливих варіантів для оцінки амплітуди ходів підвіски – оцінки швидкості руху, при якій настає так званий пробій, було використано і вже стандартну і в Україні (згідно з ДСТУ 4123:2020) перешкоду – засіб заспокоєння руху – підвищений пішохідний перехід висотою Н - 10см та шириною пандуса проїзду L2 в діапазоні 1,25-1,5 м, (як засіб обмеження швидкості до 30 км/год згідно з цим ДСТУ) (рис. 5, 6).



**Рис. 5.** Поперечний переріз підвищеного пішохідного переходу згідно ДСТУ 4123:2020

**Fig. 5.** Cross-section of an elevated pedestrian crossing according to the standard DSTU 4123:2020



**Рис. 6.** Автомобілі ТУР КВ 022 Мамай та УАЗ 3151 під час проїзду підвищеного пішохідного переходу

**Fig. 6.** Cars TUR KW 022 Mamaj and UAS 3151 while passing through an elevated pedestrian crossing

На рис. 7 представлено результати випробувань зазначених автомобілів для бездоріжжя (див. рис. 6) з однаковою швидкістю руху 30 км/год під час проїзду переходу (впродовж 4,4 – 5 с часу запису по осі абсцис) з фіксацією вертикальних прискорень на робочому місці водія (по осі ординат в  $m/s^2$ ). Очевидні відмінності вібронавантажень при звичній залежній ресорній підвісці (УАЗ), яка понині домінує в парку ВАТ, та незалежній, із збільшеною у 1,6-1,7 рази амплітудою ходів (Мамай). Порогове, максимальне значення швидкості руху, за якої відбувся «пробій» підвіски, становило відповідно 35 та 50 км/год, що загалом є пропорційним зі співвідношенням амплітуд ходів підвісок. Оцінка ефективності пружно-демпфуючих характеристик підвіски базується на формуванні амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) шляхом отриманих експериментально результатів, (рис.7), у функції частот збурень / швидкості руху.



**Рис. 7.** Запис вертикальних прискорень сидіння водія ( $m/s^2$ ) при проїзді пішохідного переходу із швидкістю 30 км/год (4-5 секунди запису)

**Fig. 7.** Recording of vertical accelerations of the driver's seat ( $m/s^2$ ) when passing a pedestrian crossing at a speed of 30 km/h (4-5 sec of recording)

Для автотехніки в аграрному секторі, особливо якщо навантаження на вісь перевищує 4-5 т, важлива також оцінка ущільнення ґрунту в контактi з колесами, що регламентується нормативною базою [23-25] та є особливо актуальною для України в період весняно-польових робіт та пізньої осені [26]. Але допустимі норми питомого тиску в контактi шини з ґрунтом є диференційованими залежно від твердості ґрунту, і

вітчизняна нормативна база у плані оцінки твердості ґрунту є громіздкою та явно застарілою [27] порівняно із сучасними приладами – пенетрометрами [28; 29], що вже знаходять застосування й у вітчизняних дослідженнях [30] та загальноприйнятi у країнах ЄС [31]. У цьому плані очевидна актуальність прийняття в Україні як ДСТУ міжнародного стандарту ISO 22476 [32].

**Висновки.** Необхідне опрацювання вітчизняної нормативної бази щодо прохідності та мобільності руху колісної техніки бездоріжжям, насамперед ВАТ, де діють національні стандарти країн-учасниць НАТО під рекомендаційний стандарт НАТО щодо планування переміщень ВАТ. Для автотехніки в аграрному секторі необхідно додатково враховувати і вимоги агроєкології щодо допустимого ущільнення ґрунту, але водночас і спрощені вимоги щодо прохідності на рівні підвищеної або середньої (табл. 1). Формування вітчизняної нормативної бази щодо вимог і оцінки прохідності та мобільності руху автотехніки для бездоріжжя, насамперед ВАТ, з аналізу відповідних стандартів провідних промислових країн, має вимоги та оцінку відповідності щодо характеристик підвіски. Окрім звичної оцінки ефективності пружних та демпфуючих характеристик, як визначального чинника забезпечення необхідної мобільності руху бездоріжжям з умов віброколивних навантажень, стійкості та керованості руху, актуальним на сьогодні є оцінка амплітуди ходів підвіски, що формує ймовірність «пробою» підвіски та мобільність руху бездоріжжям з умов допустимих вібронавантажень на організм екіпажу.

#### Бібліографічний список

1. DEF STAN 23-6. Guide to the Common Technical Requirements for Military Logistic Vehicles and Towed Equipment. Ed. 3. 2000. 68 p.
2. Standard for Ground Vehicle Mobility. US Army Corps of Eng. ERDC/GSL TR-05-2. 2005. 116 p.
3. ГОСТ В СССР 26442-85. Автомобили многоцелевого назначения. Параметры проходимости и методы их определения. Москва, 1983. 9 с.
4. ГОСТ РВ 52048-2003. Автомобили многоцелевого назначения. Параметры проходимости и методы их определения. Москва, 2003. 11 с.
5. Крайник Т. Оновлення нормативної бази оцінки стійкості та керованості руху автомобілів. Друга всеукраїнська науково-практична конференція «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні»: тези доповідей. Львів: Вид. Львівської політехніки, 2016. 61 с.

6. ДСТУ – ISO 3888-1:2014. Автомобілі легкові пасажирські. Випробувальний шлях для рвучкого змінення смуги руху. Частина 1. Подвійна зміна смуги руху. Київ: Держспоживстандарт, 2014. 16 с.
7. ДСТУ – 3310-96. Засоби транспортні дорожні. Стійкість. Методи визначення основних параметрів випробуваннями. Київ: Держстандарт, 1996. 10 с.
8. ГОСТ Р 52302-2004. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы и испытания. Москва: ИПК Изд. Стандартов, 2005. 31 с.
9. Lanets O., Sapuzhak A., Крайник Т., Kovalyshyn S. Development of structures and basis of structural synthesis of independent suspensions of off-road vehicles. *ТЕКА*. 2024. Vol. 24, No 1. Rzeszow-Lviv, 2024.
10. Крайник Л. В., Бурян М. Г., Ланець О. В. Кохан В. Ф. Плавність руху як основа комфортності автомобілів: формування нормативної бази «vehicle road comfort». *Автошляховик України*. 2022. № 3. С. 2–8.
11. Els P. S. The ride comfort vs. handling compromise for off-road vehicles. *Diss. Dr.-Phil. Mech. Eng.*, University of Pretoria, July 2006. 255 p.
12. Wielenberg A. Entwurf mechatronischer Fahrzeugfederungen am Beispiel eines gelaendegaengigen Nutzfahrzeugs. *Diss. Dr.-Ing.*, Univers. Padeborn. BRD, 2014. 172 s.
13. Кайдалов Р. О., Башговой В. М., Ларін О. О., Водка О. О., Баркалов В. Г. Математичне моделювання коливань спеціалізованого транспортного засобу з дворівневою системою піддресорювання при переїзді одиначної дорожньої нерівності. *Системи озброєння і військової техніки*. 2016. № 3 (47). ХНУПС. Харків. 2016. С. 14-21.
14. Манзяк М., Хома В., Грубель М., Крайник Л., Сало Я. Оцінка ефективності підвіски повнопривідного автомобіля для бездоріжжя. *Вісник ЛНУП. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 27. С. 96-100.
15. Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM) Development. STOTR-AVT-248. *NATO Science and Technology Organisation*. Web site. URL: <http://surl.li/hmflm>.
16. Бурян М.В. Плавність руху автобусів у взаємозв'язку з характеристиками підвіски та сидіння : *дис. канд. техн. наук*. Львів, 2020. 151с.
17. Механічний вплив. URL: <https://arduino.ua/cat147-mechanicheskie-vozdejstviya>.
18. ДСТУ ISO 2631-1:2004. Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину. Київ: Держстандарт України, 2004. 36 с.
19. ДСН 3.3.6.029 – 99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Київ: МОЗ України, 2000. 39 с.
20. BS 6841 Guide to measurement and evaluation of human exposure to wheel body mechanical vibration and repeated shock. *The British Standard Institution*. London, 1978. 18 p.
21. Belgian block road sample of Daimler durability test track. URL: <http://maps.google.com/maps?&q=48.7860,9>.
22. Gimmler, H., Ammon, D., Rauh, J. Road Profiles: Mobile Measurement, Data Processing for Efficient Simulation and Assessment of Road Properties, *VDI-Report. 2005. No 1912*. Düsseldorf (Germany). Pp. 335–352.
23. 4521:2006. Техніка сільського сподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. Київ: Держспоживстандарт, 2006. 8с.
24. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільського-подарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем. Київ: Держспоживстандарт, 2008. 10 с.
25. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільського-подарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. Київ: Держспоживстандарт, 2005. 10 с.
26. Ребров О. Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях»*. 2018. № 27. Харків, 2018. С. 110-116.
27. ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твердоміром Рев'якіна. Київ: Держспоживстандарт, 2008. 8 с.
28. Wong Y. J. Terramechanics and off road vehicle engineering. Second Ed. Butterworth. London, 2010. 482 p.
29. Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прохідність військових автомобілів: монографія. Київ: Професіонал, 2023. 182 с.
30. Іванишин В. В., Рудь А. В., Мошенко І. О. Визначення переущільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2017. Вип. 27. Подільський ДАТУ. С. 146-158.
31. Richter R., Hoffmann B. Probleme des Einsatzes von Fahrzeugen auf landwirtschaftlich genutzten Boden. *Agrartechnik*. 1981. 31 (9). S. 419-421.
32. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.

УДК 621.384 / 534.232

## ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ ВОДООЧИСТКИ ТА ВОДОПІДГОТОВКИ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

*Вадим Пташник<sup>1,2</sup>, к.т.н., Віктор Чумакевич<sup>3,4</sup>, к.т.н., Ігор Пулеко<sup>4,5</sup>, к.т.н., Юрій Бондаренко<sup>4</sup>, к.т.н., Вікторія Чумакевич<sup>3</sup>, Михайло Бабич<sup>1</sup>, к.т.н.*

<sup>1</sup> Львівський національний університет природокористування, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівська обл., Україна, e-mail: ptashnykproject@gmail.com (В.П.)

<sup>2</sup> Львівський національний університет ім. І. Франка, вул. Університетська, 1, м. Львів, Україна,

<sup>3</sup> Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, e-mail: victoriachu21@gmail.com (В.Ч.)

<sup>4</sup> Житомирський військовий інститут ім. С. П. Корольова, просп. Миру, 22, м. Житомир, Україна, e-mail: chumakevich@ukr.net (В.Ч.), ostrovitynin75@ukr.net (Ю.Б.)

<sup>5</sup> Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, e-mail: pulekoigor@ztu.edu.ua (І.П.)

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.086>

**Пташник В., Чумакевич В., Пулеко І., Бондаренко Ю., Чумакевич В., Бабич М. Обґрунтування вибору системи керування електроприводом насосного агрегату для водоочистки та водопідготовки на основі комп'ютерного моделювання**

У статті розглянуто питання вдосконалення системи керування електроприводом насоса водоочисної системи цукрового заводу. На прикладі протічного діафрагмового електролізера зі споживаною потужністю 5 кВт та продуктивністю за анолітом 4,5–5 м<sup>3</sup>/год розглянуто роботу промислової водоочисної системи. Спираючись на відомі методики розрахунку, проаналізовано дросельний та частотний методи керування електроприводу насосного агрегату. Зокрема, розраховано спожиту потужність, коефіцієнт корисної дії, момент, швидкість обертання вала як функції витрати води із забезпеченням заданого тиску. Розраховано коефіцієнти корисної дії установки з різними методами керування та показано енергетичні переваги частотного методу керування насосним агрегатом. Водночас встановлено, що в режимі частотного керування двигуном збільшення гідравлічного опору системи призводить до зниження економії електроенергії. Для дослідження асинхронного двигуна під час прямого пуску з вентиляторним моментом статичного навантаження використано нелінійну MathCAD-модель. За результатами моделювання встановлено, що під час пуску асинхронного приводу насоса двигун дуже швидко виходить на номінальний режим роботи, але момент постійно пульсує. За допомогою математичної моделі системи автоматичного керування проведено порівняння роботи розімкненої та замкненої систем. Аналіз отриманих діаграм Найквіста, амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик показав підвищення стійкості роботи для замкненої системи. Проведено моделювання використання П-, ПП- та ППД-регуляторів. Усі розглянуті схеми спочатку дають гарну стабілізацію, але з часом П- та ПП-регулятори викликають нестійку роботу системи. А у системі з ППД-регулятором підбір параметрів дозволив отримати перехідний процес тривалістю близько 0,2 с.

**Ключові слова:** система керування електроприводу, насосний агрегат, частотне керування.

**Ptashnyk V., Chumakevych V., Puleko I., Bondarenko Yu., Chumakevych V., Babych M. Justification of the choice of the electric drive control system for pump unit of water treatment and water conditioning based on computer modeling**

This article addresses the enhancement of the control system for the electric drive of the pump in the water treatment system used at a sugar factory. The study focuses on a flow diaphragm electrolyzer with a power consumption of 5 kW and an anolyte productivity ranging from 4.5 to 5 m<sup>3</sup>/h, examining the operation of an industrial water treatment system. Utilizing established calculation methods, the analysis compares throttle control and frequency control for the electric drive of the pumping unit. Key parameters, including consumed power, efficiency factor, torque, and shaft rotation speed, are calculated as functions of water flow while maintaining a specified pressure. The efficiency coefficients for the installation under different control methods are calculated, demonstrating the energy advantages of the frequency control method for the pumping unit. It was observed that, in frequency control mode, an increase in the hydraulic resistance of the system results in reduced electricity savings. A nonlinear MathCAD model was employed to evaluate an asynchronous motor starting directly under a fan torque and static load. The simulation results indicate that during the startup of the pump's

asynchronous drive, the motor quickly reaches its nominal operating mode; however, the torque exhibits continuous pulsations. A mathematical model of the automatic control system allowed for a comparison between open and closed systems. Analysis of the resulting Nyquist diagrams, along with amplitude-frequency and phase-frequency characteristics, revealed an enhancement in operational stability for the closed system. Further simulations were conducted evaluating the performance of P-, PI-, and PID-regulators. Initially, all configurations provided effective stabilization; however, P- and PI-regulators eventually led to unstable operations. In contrast, the system utilizing a PID controller, with appropriately selected parameters, achieved a transient response lasting approximately 0.2 seconds.

**Keywords:** electric drive control system, pump unit, frequency control.

**Постановка проблеми.** Українське виробництво планомірно впроваджує європейські стандарти у сфері харчових технологій. Однією з важливих складових частин виробництва є його екологічна складова. Бурякоцукрове виробництво є в Україні традиційним, але, на жаль, досі використовує технології ХХ століття. Сьогодні спостерігається впровадження нових систем очищення води на цукровому виробництві. З-поміж багатьох установок для очищення [13; 16; 17] було обрано протічний діафрагмовий електролізер «ХЕКОМ-5» зі споживаною потужністю 5 кВт/год, блоком стабілізації та продуктивністю за анолітом 4,5 – 5 м<sup>3</sup>/год. Для надійної роботи таких систем [2; 10] необхідно стабілізувати потік води через очисні пристрої. Згідно з характеристиками пристрою необхідно забезпечити швидкість надходження рідини в електролізер на рівні 130 – 150 л/хв, або 7,8 – 9 м<sup>3</sup>/год. На об'єкті встановлено насоси з електричним приводом, тому досліджували питання вдосконалення системи керування електроприводом насоса водоочисної установки на цукровому виробництві.

**Постановка завдання.** Мета дослідження: полягає в розробці комп'ютерної моделі для оптимізації системи керування електроприводом насосного агрегату, що використовується у водоочисній системі цукрового заводу. Досягнення поставленої мети передбачає проведення кількох взаємопов'язаних етапів дослідження. По-перше, слід провести аналіз різних методів керування електроприводом, зокрема дросельного та частотного. По-друге, за допомогою комп'ютерної моделі слід оцінити вплив різних методів керування на енергоспоживання і роботу насоса. По-третє, передбачається порівняння способів стабілізації роботи системи за допомогою регуляторів (П, ПІ, ПІД) та проведення комп'ютерного моделювання для визначення найефективніших параметрів керування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час вибору способу керування подачею води необхідно враховувати безліч чинників. Основними з них, ми вважаємо, є енергетичні показники. Ми повинні забезпечити подання необхідної кількості води за мінімальних витрат енергії. Розглянемо енергетичні показники за

використання дросельного та частотного способів керування насосними агрегатами.

Проілюструємо роботу водонасосних систем з регулювання подачі води дроселюванням. Насос споживає потужність  $P$ , Вт, яка визначається за формулою

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta}, \quad (1)$$

де  $H$  – повний напір;  $Q$  – продуктивність (подача);  $\rho$  – густина рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії насоса.

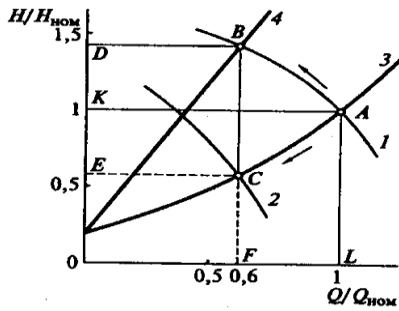
Рис. 1 показує переваги частотного керування насосом. Потужність, яку споживає насос, відповідає площі прямокутника  $OKAL$ . Під час регулювання подачі води за допомогою дросельної засувки змінюється гідравлічний опір магістралі, а при  $\omega = \omega_{ном} = const$  робоча точка переміщується вздовж кривої до точки  $B$  (витрата  $0,6 H_{ном}$ ), яка характеризує номінальну швидкість обертання електродвигуна до перетину з ізобарою режиму магістралі. Гідравлічний напір при цьому зростає і стає рівним  $1,5 Q_{ном}$ . Потужність, яка споживається, пропорційна площі прямокутника  $ODBF$ , яка не сильно відрізняється від номінального режиму. Отже, зменшення енергоспоживання при зменшенні споживання води практично не відбувається.

Якщо змінювати швидкість обертання електродвигуна, опір магістралі незмінний (пряма 3) зменшення споживання відбувається за рахунок зменшення швидкості обертання (крива 2), робоча точка переміщується нижче в точку  $C$  і споживана потужність менша (пропорційна площі прямокутника  $OECF$ ). Необхідно зазначити, що також зменшується й тиск у системі, а відповідно й витрата води.

Розглянемо методику математичного обґрунтування енергоспоживання за різних способів регулювання напору насоса [2; 7; 10]:

$$H = H_{0н} \cdot \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q^2, \quad (2)$$

де  $H_{0н}$  – напір насоса при  $Q = 0$  і  $\omega = \omega_{ном}$ ;  $\omega_{ном}$  – номінальна швидкість електродвигуна;  $C$  – конструктивний коефіцієнт насоса;  $H_{ном}$  та  $Q_{ном}$  – номінальні напір та витрата.



**Рис. 1.** Характеристика продуктивності відцентрового насоса при дросельному і частотному регулюванні [2]: 1 – характеристика нерегульованого електроприводу насоса при номінальній швидкості обертання; 2 – характеристика регульованого електроприводу; 3 – графік, що характеризує роботу магістралі при мінімальному гідравлічному опорі; 4 – графік, який характеризує роботу магістралі при збільшеному гідравлічному опорі; А – початкова точка дослідження, засувка повністю відкрита; В – нерегульований електропривод, засувка частково закрита; С – зменшення швидкості обертання електроприводу двигуна насоса, засувка відкрита; D – максимальний відносний напір; E – мінімальна відносний напір; F – точка на осі абсцис, що відповідає мінімальній відносній продуктивності; K – точка на осі ординат, що відповідає одиничному відносному напору; L – точка на осі абсцис, що відповідає одиничній відносній продуктивності

**Fig. 1.** Performance characteristics of a centrifugal pump with throttle and frequency control [2]: 1 - characteristics of the non-regulated electric drive of the pump at the nominal speed of rotation; 2 - characteristics of the adjustable electric drive; 3 - a graph characterizing the operation of the main line at minimum hydraulic resistance; 4 - a graph characterizing the operation of the pipeline with increased hydraulic resistance; A - the starting point of the study, the latch is fully open; B - a non-regulated electric drive, the latch is partially closed; C - a decrease in the speed of rotation of the electric drive of the pump motor, the valve is open; D - a maximum relative pressure; E - a minimum relative pressure; F - a point on the abscissa axis corresponding to the minimum relative productivity; K - a point on the ordinate axis corresponding to unit relative pressure; L - a point on the abscissa axis corresponding to unit relative productivity

Свою чергою, конструктивний коефіцієнт насоса можна обчислити за формулою

$$C = \frac{H_{0H} - H_{ном}}{Q_{ном}^2} \quad (3)$$

Якщо позначити протитиск (статичний напір) при закритій заслінці ( $Q = 0$ ) через  $H_c$ , характеристики магістралі можна поєднати формулою

$$H = H_c + R \cdot Q^2, \quad (4)$$

де  $H_c$  – протитиск (статичний напір);  $R$  – коефіцієнт опору магістралі:

$$R = \frac{(H_{ном} + H_c)}{Q_{ном}^2} \quad (5)$$

Для визначення споживаної насосною установкою потужності з мережі використаємо відому формулу

$$P_l = \frac{P_{мех}}{\eta_l}, \quad (6)$$

де  $\eta_l$  – коефіцієнт корисної дії електродвигуна;  $P_{мех} = M_c \cdot \omega$  – потужність на валу двигуна насоса;  $M_c$  – момент статичного навантаження на валу електродвигуна.

Коли регулювання подачі води здійснюється за допомогою дросельної заслінки  $\omega = \omega_{ном} = const$ , коефіцієнт корисної дії електродвигуна не буде змінюватись і може визначатись відповідно до виразу

$$\eta_l = \frac{(1 - S_{ном})}{(a \cdot S_{ном} + 1)}, \quad (7)$$

де  $S_{ном}$  – номінальне ковзання асинхронного двигуна;  $a = R_1/R_2$  – коефіцієнт, який характеризує відношення активного опору обмотки статора  $R_1$  до приведенного опору обмотки ротора  $R_2$ .

При частотному способі керування, без врахування втрат у сталі та втрат неробочого ходу, а також незмінному номінальному ковзанні коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна насоса можна знайти за формулою

$$\eta_l = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{ном}}{\omega} \cdot \frac{S_{ном}}{1 - S_{ном}} \cdot (1 + a)} \quad (8)$$

У формулі (2) проведемо заміну  $\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2$  на  $\left(\frac{1 - S}{1 - S_{ном}}\right)^2$ . Після розв'язування рівнянь (2)

та (4) відносно  $S$  отримаємо:

$$S = 1 - (1 - S_{ном}) \sqrt{h_c + Q^2 \cdot (1 - h_c)} = 1 - (1 - S_{ном}) \cdot A \quad (9)$$

Момент на валу механізму у відносних одиницях, коли він працює на мережу з незмінними параметрами, визначають так:

$$\mu = \mu_{0c} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 + (1 - \mu_{0c}) \cdot \frac{\omega}{\omega_{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - h_c} \quad (10)$$

де  $\mu_{0c}$  – статичний відносний момент на валу при закритій заслінці ( $Q^* = 0$ ).



Вирази (9) та (10) дозволяють визначити основні характеристики (спожиту потужність, обертання) у функції витрати води при заданому тиску. Для зручності порівняння виразимо потужність  $P_I$  у відносних одиницях залежно від витрати рідини  $Q$ . Базовою величиною оберемо номінальну потужність  $P_{ном}$  та номінальний момент  $M_{ном}$ . Запишемо вирази для дросельного:

$$P_{I*} = \frac{(\mu_{0c} + (1 - \mu_{0c}) \cdot Q^*) (1 + a \cdot S_{ном})}{1 - S_{ном}} \quad (11)$$

коефіцієнт корисної дії, момент, швидкість

$$P_{I*} = (\mu_{0c} \cdot A^3 + (1 - \mu_{0c}) \cdot A^2 \cdot Q^*) \left( 1 + \frac{S_{ном} \cdot (1 + a)}{(1 - S_{ном}) \cdot A} \right) \quad (12)$$

Результати проведених розрахунків для  $\mu_{0c} = 0,4$ ;  $a = 1$ ;  $S_{ном} = 0,04$  наведено в табл. 1 і 2, а також на рис. 2 і 3.

та частотного керування:

**Таблиця 1.** Споживана електроприводом відцентрового насоса потужність при дросельному і частотному керуванні залежно від витрати рідини і статичного напору (тиску) при  $\mu_{0c} = 0,4$ ;  $a = 1$ ;  $S_{ном} = 0,04$

**Table 1.** The power consumed by the electric drive of the centrifugal pump during throttle and frequency control depending on the flow of liquid and static head (pressure) at  $\mu_{0c} = 0,4$ ;  $a = 1$ ;  $S_{ном} = 0,04$

Витрата $Q^*$	$P_{I*}$					
	Дросельне керування	Частотне керування				
		$H_c = 0$	$H_c = 0,2$	$H_c = 0,4$	$H_c = 0,6$	$H_c = 0,8$
0	0,43	0	0,04	0,11	0,2	0,31
0,2	0,56	0,01	0,08	0,18	0,3	0,42
0,4	0,69	0,08	0,16	0,28	0,41	0,55
0,6	0,82	0,24	0,35	0,45	0,58	0,7
0,8	0,95	0,56	0,64	0,71	0,8	0,87
1	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08

**Таблиця 2.** Потужність, спожита електроприводом відцентрового насоса для різних способів керування при початковому статичному моменті  $\mu_{0c} = 0$  і статичному напорі води  $H_c = 0$

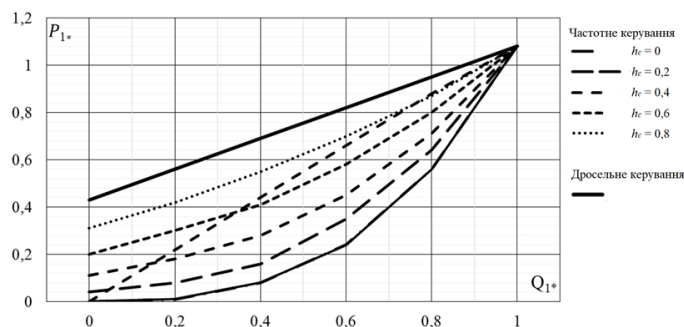
**Table 2.** The power consumed by the electric drive of the centrifugal pump for different control methods at the initial static moment  $\mu_{0c} = 0$  and the static water pressure  $H_c = 0$

Способи керування	$Q^*$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$P_{I*}$ – режим дросельного керування	0	0,22	0,44	0,66	0,88	1,08
$P_{I*}$ – режим частотного керування	0	0,01	0,08	0,24	0,56	1,08

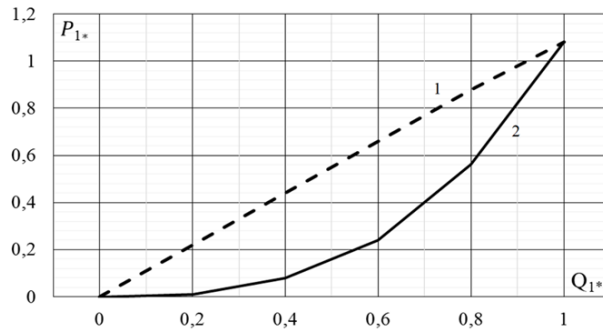
Відповідно до отриманих результатів робимо висновок, що при збільшенні гідравлічного опору системи (збільшенні  $h_c$ ) знижується економія електроенергії при частотному керуванні двигуном. Електропривод насосних установок має вентиляторний момент навантаження (рис. 4), тому відповідно до

законів подібності можна записати в умовних одиницях при постійному коефіцієнті корисної дії двигуна:

$$Q_* = \frac{Q}{Q_{ном}} = \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \quad (13)$$



**Рис. 2.** Залежність  $P_{I*} = f(Q_*)$  у режимі дросельного і частотного керування при  $\mu_{0c} = 0,4$ ;  $a = 1$ ;  $S_{ном} = 0,04$   
**Fig. 2.** Dependence  $P_{I*} = f(Q_*)$  in throttle and frequency control mode at  $\mu_{0c} = 0,4$ ;  $a = 1$ ;  $S_{ном} = 0,04$



**Рис. 3.** Залежність  $P_{1*} = f(Q_*)$  при дросельному (крива 1) і частотному (крива 2) керуванні при  $\mu_{0c} = 0,4$ ;  $H_c = 0$

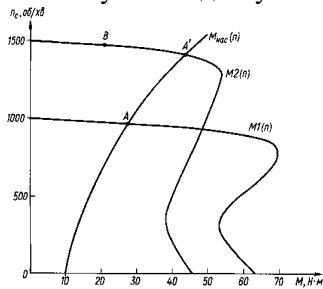
**Fig. 3.** Dependence  $P_{1*} = f(Q_*)$  with throttle (curve 1) and frequency (curve 2) control at  $\mu_{0c} = 0,4$ ;  $H_c = 0$

$$H_* = \frac{H}{H_{ном}} = \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2; \quad (14)$$

$$M_* = \frac{M}{M_{ном}} = \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2; \quad (15)$$

$$P_{мех} = \frac{P_{мех}}{P_{ном}} = \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^3, \quad (16)$$

де  $\omega_{ном}$  – номінальна швидкість обертання двигуна;  $M_{ном}$  – номінальний момент двигуна;  $P_{ном}$  – номінальна потужність двигуна.



**Рис. 4.** Механічні характеристики асинхронних двигунів з рівними швидкостями обертання  $M_1(n)$ ,  $M_2(n)$  та статичний момент вентиляторного навантаження  $M_{нас}(n)$

**Fig. 4.** Mechanical characteristics of asynchronous motors with equal rotation speeds  $M_1(n)$ ,  $M_2(n)$  and static fan load moment  $M_{нас}(n)$

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до відомих методик визначимо потужність електродвигуна для перекачування води об'ємом 150 л/хв ( $9\text{ м}^3/\text{год}$ ):

$$P_o = \frac{K_3 \cdot Q_p \cdot H_p \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-3}}{3600 \cdot \eta_p}, \quad (17)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу;  $H_p$  – робоча точка насоса;  $\eta_p$  – ККД;  $\rho$  – густина води;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Згідно з вихідними даними ( $K_3 = 1,1$ ;  $\eta_p = 0,73$ ;  $H_p = 540$  м;  $\rho = 997$  кг/м<sup>3</sup>) розрахункова потужність становить  $P_o = 19,9$  кВт.

Двигуни, які встановлюються у приміщеннях водонасосних станцій [1; 3; 9, 13], повинні мати закрите або основне виконання з вологостійкою ізоляцією типу F, а для

забезпечення широкого діапазону регулювання швидкості – мати одну пару полюсів. Таким чином, двигун повинен бути призначений для роботи в помірному кліматі, у закритих приміщеннях з природною вентиляцією – ступінь захисту IP54, виконання У2. Виходячи з отриманого значення  $P_o$  та накладених обмежень обираємо найближчу більшу стандартну потужність двигуна  $P_n$ , орієнтуючись на трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором [4; 5; 12; 14; 15]. Найближчим до заданих параметрів є асинхронний двигун серії 5А основного виконання, ступінь захисту IP54, клас ізоляції «F»,  $U_n = 380$  В типу АИР-180S2, характеристики якого наведено в табл. 3.

Діючий струм двигуна, А, визначимо за формулою

$$I_o = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}. \quad (18)$$

Коефіцієнт завантаження двигуна визначаємо за формулою

$$K_3 = \frac{P_o}{P_n} = \frac{19,96}{22} = 0,91. \quad (19)$$

Перерахуємо табличні значення ряду параметрів у фактичні з використанням коефіцієнта завантаження  $K_3 = 1$ ;  $\cos \varphi_\phi = 0,81$ ;  $\eta_\phi = 82,1\%$ . Для розрахунку фактичного струму двигуна, А, використаємо формулу

$$I_\phi = \frac{K_3 \cdot P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_\phi \cdot \eta_\phi}. \quad (20)$$

Здійснимо перерахунок решти параметрів, а результати занесемо до табл. 3.

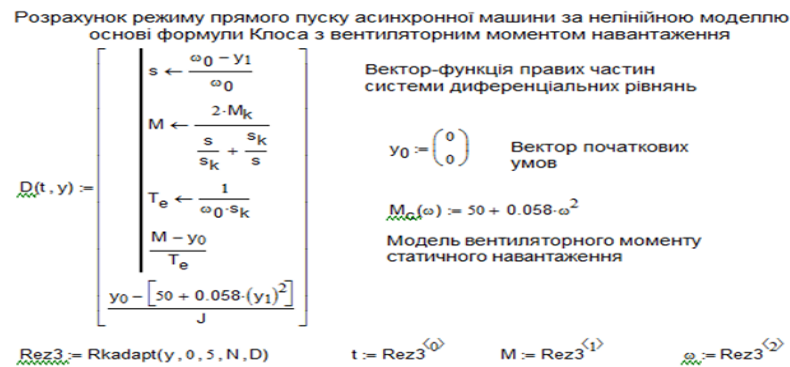
У літературі [4–8; 11] наведено ряд комп'ютерних або математичних моделей асинхронних двигунів. На рис. 5 наведено фрагмент розробленої нелінійної MathCAD-моделі для дослідження асинхронного двигуна під час прямого пуску з вентиляторним моментом статичного навантаження. Результати моделювання моменту  $M(t)$  та кутової швидкості  $\omega(t)$  під час пуску асинхронного приводу насоса наведено

на рис. 6. З графіків можна зробити висновок, що двигун дуже швидко, менше ніж за секунду, має вийти на номінальний режим під час пуску, але момент постійно пульсує. Коливання моме-

нту є незначними, але для надійної роботи очи-сних пристроїв бажано мати сталу швидкість та момент на валу двигуна.

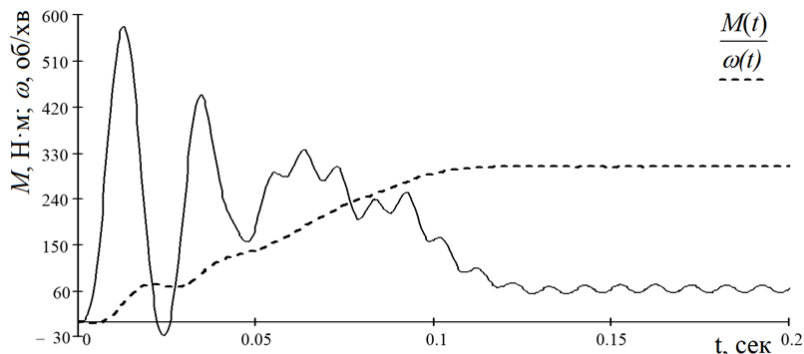
**Таблиця 3.** Технічні характеристики асинхронного двигуна типу АІР-180S2  
**Table 3.** Technical characteristics of the AIR-180S2 asynchronous moto

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення	
		паспортні	приведені
Номінальна потужність $P_n$	кВт	22	19,95598
Номінальна напруга $U_n$	В	380	344,6942
Номінальний ККД $\eta_n$	%	90,5	82,09165
Номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_n$		0,89	0,80731
Номінальний струм статора $I_n$	А	41,5	37,64424
Фактичний струм двигуна	А	0,377	0,458
Відношення пускового струму до номінального $I_n/I_n$		6,8	6,168212
Номінальна швидкість обертання ротора $n_n$	об./хв	2930	2657,774
Номінальний момент на валу $M_{ном}$	Н·м	72	65,31048
Кратність пускового моменту $M_n/M_{ном}$		2	1,81418
Кратність максимального моменту до номінального $M_{max}/M_n$		2,9	2,630561
Момент інерції $J$	кг·м <sup>2</sup>	0,063	0,063
Маса $m$	кг	160	160



**Рис. 5.** Фрагмент MathCAD-моделі асинхронного двигуна з вентиляторним моментом навантаження на основі формули Клосса

**Fig. 5.** A fragment of the MathCAD model of an asynchronous motor with a fan load moment based on the Kloss formula



**Рис. 6.** Результати моделювання моменту  $M(t)$  та кутової швидкості  $\omega(t)$  під час пуску асинхронного приводу насоса

**Fig. 6.** Results of simulation of moment  $M(t)$  and angular velocity  $\omega(t)$  during start-up of asynchronous pump drive

Для проведення дослідження використано математичну модель системи автоматичного керування, наведену на рис. 7. Проведено порівняння роботи розімкненої (рис. 8) та замкненої (рис. 9) систем. Зокрема, аналіз отриманих амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик, а також діаграм Найквіста для розглянутих режимів роботи показав, що для замкненої системи спостерігається підвищення стійкості роботи системи за обраними критеріями. Так, у розімкненій системі поступове зниження амплітуди спостерігається вже при 1 Гц, у той час як у замкненої системі спад амплітуди відбувається на частоті понад 10 Гц.

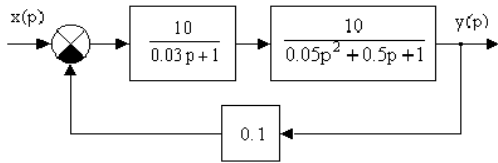


Рис. 7. Математична модель асинхронного приводу

Fig. 7. Mathematical model of asynchronous drive

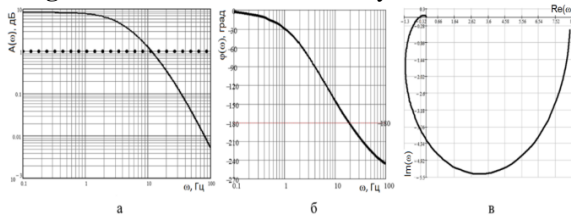


Рис. 8. Логарифмічна амплітудно-частотна (а), фазо-частотна (б) характеристики та діаграма Найквіста (в) розімкненої системи

Fig. 8. Logarithmic amplitude-frequency (a), phase-frequency (б) characteristics and Nyquist diagram (в) of the open system

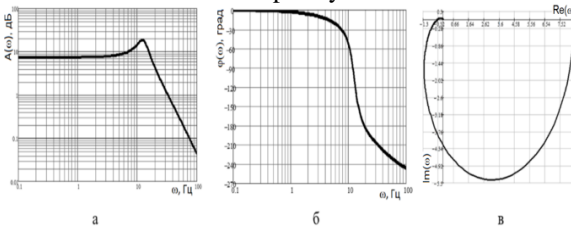


Рис. 9. Логарифмічна амплітудно-частотна (а), фазо-частотна (б) характеристики та діаграма Найквіста (в) замкненої системи

Fig. 9. Logarithmic amplitude-frequency (a), phase-frequency (б) characteristics and Nyquist diagram (в) of the close system

Комп'ютерне моделювання використання ПІ- (рис. 10, а) та ПІІ-регуляторів (рис. 10, б) спочатку показує гарну стабілізацію контрольованого параметра, але з часом відбувається його значне розхитування, що спричинить нестійку роботу всієї системи, причому проведений авторами підбір параметрів інтегральної складової регулятора не дозволив повністю усунути отримані коливання контрольованого параметра.

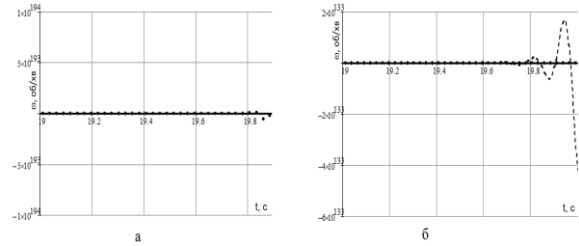


Рис. 10. Перехідні процеси при використанні ПІ-регулятора (а), ПІІ-регулятора (б)

Fig. 10. Transient processes when using the P-controller (a), PI-controller (b)

Під час моделювання роботи ПІІ-регулятора проведено підбір параметрів моделі з метою пришвидшення впливу регулятора на систему та скорочення загального часу стабілізації системи. Результати моделювання (рис. 11) з різними параметрами показали ефективність підбору та підтвердили можливість забезпечити тривалість перехідного процесу близько 0,2 с. Крім того, результати моделювання показують, що стабілізація системи розпочинається одразу після зміни сигналу керування.

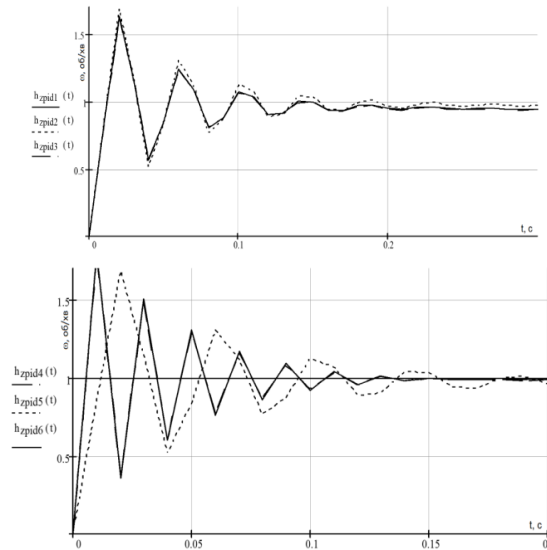


Рис. 11. Перехідні процеси при використанні ПІІ-регулятора з різними параметрами

Fig. 11. Transient processes when using a PID-controller with different parameters

**Висновки.** Аналіз літературних джерел показав, що при дросельному керуванні насосним агрегатом водоочисної системи зменшення енергоспоживання при зменшенні споживання води практично не відбувається. Розрахунок спожитої потужності, коефіцієнта корисної дії, моменту та швидкості обертання вала як функції витрати води із забезпеченням заданого тиску показав, що оптимальним способом керування асинхронним двигуном насосних установок є частотне керування з повністю відкритою і нерухою заслінкою. Так, спожита потужність відрізняється в 1,57–

22 рази, залежно від рівня споживання води. Водночас встановлено, що в такому режимі керування двигуном збільшення гідравлічного опору системи призводить до зниження економії електроенергії.

За результатами комп'ютерного моделювання прямого пуску асинхронного двигуна з вентиляторним моментом статичного навантаження встановлено, що двигун дуже швидко виходить на номінальний режим роботи, але момент постійно пульсує. Аналіз отриманих у результаті комп'ютерного моделювання діаграм Найквіста, амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик показав підвищення стійкості роботи для замкненої системи керування. Встановлено, що використання П- та ПІ-регуляторів дозволяє стабілізувати перехідні процеси лише на початку, а потім система може піти «в рознос». Водночас використання ПІД-регуляторів дозволяє отримати перехідні процеси тривалістю до 0,2 с.

#### Бібліографічний список

1. Грабко В. В., Мошноріз М. М. Методи та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання. Вінниця: ВНТУ, 2011. 138 с.
2. Електропривід / О. С. Марченко, Ю. М. Лаврінченко, П. І. Савченко, Є. Л. Жулай. Київ: Урожай, 1995. 260 с.
3. Жулай Є. Л. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній. Київ: Вища освіта, 2001. 288 с.
4. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2004. 428 с.
5. Толочко О. І. Моделювання електро-механічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
6. Шабатура Ю. В., Паранчук Я. С., Чумакевич В. О. Енергозберігаюча система управління трифазними електроприводами військово-технічних комплексів з покращеною електромагнітною сумісністю. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних технічних інформаційних систем: зб. наук. праць*. Житомир, 2009. № 2. С. 140-147.
7. Aayushi A., Aayushi S., Aditya M., Bhavnes J. Speed Control of Three-Phase Induction Motor Using ANFIS and Flower Pollination Algorithm Optimized PI Controller. *International Conference on Advancements in Power, Communication and Intelligent Systems*. Kannur, India, 2024. P. 1-6. doi: 10.1109/APCI61480.2024.10616561.
8. Application of a wavelet neural network approach to detect stator winding short circuits in asynchronous machines / S. Sakhara, M. Brahimi, L. Nacib, T. Layadi. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2023. Vol. 2023, No 3. P. 21-27. doi: 10.20998/2074-272X.2023.3.03.
9. Design of PID Controllers for Speed Control of Three Phase Induction Motor Based on Direct-Axis Current Coordinate Using IFOC / I. Ferdiansyah, L. Raharja, D. Yanaratri, E. Purwanto. *4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering*. Yogyakarta, Indonesia, 2019. P. 369-372. doi: 10.1109/ICITISEE48480.2019.9003893.
10. Noh M., Najib M., Abdullah N. S. Simulator of Water Tank Level Control System Using PID-Controller. *Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology*. University of Cambridge, 2008. P. 168-171.
11. Paranchuk Y., Evdokimov P., Kuznyetsov O., Electromechanical positioning system with a neuro-fuzzy corrector. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96, No 9. P. 52-55. doi: 10.15199/48.2020.09.11.
12. Paranchuk Y., Kuznyetsov O. Synthesis of the Intelligent Position Controller of an Electromechanical System. *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 1-4. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240889.
13. Role of Ionic Transport in the Electrochemical Activation of Water Solutions / K. Janisz, I. Bordun, V. Ptashnyk, V. Pohrebennyk. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2014. Vol. 90, No 1. P. 80-83. doi: 10.12915/pe.2014.01.19.
14. Sakhara S., Salah S., Nacib L. Diagnosis and detection of short circuit in asynchronous motor using three-phase model. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2017. Vol. 8, No 2. P. 308-317. doi: 10.1007/s13198-016-0435-1.
15. Stable Adaptive Control and Estimation for Nonlinear Systems / J. Spooner, M. Maggiore, R. Ordonez, K. Passino. A John Wiley & Sons, 2002. 539 p.
16. Treatment of sugar processing industry wastewater using copper electrode by electrocoagulation: Performance and economic study / R. K. Patel, R. Shankar, P. Khare, P. Mondal. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2022. Vol. 99, No 8. P. 100563. doi: 10.1016/j.jics.2022.100563.
17. Yadav M., Yadav R. K., Gole V. L. Sugar industry wastewater treatment: Current practices and advances. *Microbial Ecology of Wastewater Treatment Plants*. 2021. P. 151-174. doi: 10.1016/B978-0-12-822503-5.00017-5.

Стаття надійшла 15.05.2024

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В  
АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

UDK 621.311.1

**ANALIZA PROCESÓW NIEUSTALONYCH W FRAGMENTCIE SIECI  
ELEKTRYCZNEJ ULTRA WYSOKIEGO NAPIĘCIA, KTÓRA ZAWIERA  
DŁAWIKI POWIETRZNE****Vitaliy Levoniuk, Ph.D, assoc. prof., Taras Muchailovicz, Ph.D, assoc. prof.***Lwowski narodowy uniwersytet przyrodniczy  
Św. Wołodymyra Welyki, 1, Dubljany, rejon zółkowski,  
obwód lwowski, Ukraina,  
e-mail: vitaliy\_levoniuk@ukr.net*<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.094>**Levoniuk V., Muchailovicz T. Analiza procesów nieustalonych w fragmencie sieci elektrycznej ultra wysokiego napięcia, która zawiera dławiki powietrzne**

W artykule dokonano analizy publikacji naukowych związanych z badaniem procesów przejściowych w elementach sieci elektrycznych, których kluczowymi elementami są długie linie elektroenergetyczne o rozłożonych parametrach oraz dławiki powietrzne, podczas pracy normalnej i awaryjnej. Analiza wykazała, że problematyka badań procesów przejściowych w długich liniach elektroenergetycznych jest aktualna, lecz niewystarczająco ujawniona w odniesieniu do procesów przejściowych z udziałem dławików bocznikowych. Na podstawie uogólnionej interdyscyplinarnej metody modelowania, która opiera się na modyfikacji całkowitej zasady wariacyjnej Hamiltona-Ostrogradskiego, wybudowany jest model matematyczny fragmentu sieci elektrycznej, głównymi elementami której są długie linie elektroenergetyczne o rozłożonych parametrach, które zawiera dławiki powietrzne. Model prezentowany w jednoliniowym wykonaniu. Opracowany model matematyczny opiera się na równaniu długiej linii z pochodnymi cząstkowymi drugiego rzędu. Do rozwiązania wspomnianego równania proponuje się wykorzystanie warunków brzegowych Neumanna i Poincarégo. Realizacja modelu obiektu została realizowana za pomocą metod numerycznych drogą dystretyzacji równań linii przez metodę prostych. Przeprowadzono poszukiwania napięcia w fikcyjnym węźle elektroenergetycznej linii przesyłowej oraz przedstawiono jego wygląd. Na podstawie opracowanego modelu matematycznego napisano kod programu w algorytmicznym języku programowania Visual Fortran, za pomocą którego przeprowadzono eksperymenty numeryczne.

Za pomocą tego modelu zostało przeanalizowano elektromagnetyczne procesy nieustalone w systemie elektroenergetycznym w stanie symetrycznego trójfazowego zwarcia. Przedstawiono wyniki symulacji komputerowej w postaci rysunków, które zostały przeanalizowane. Także podane rekomendacji dla ewentualnych użytkowników.

**Słowa kluczowe:** przejściowe procesy elektromagnetyczne, dławik powietrzny, linia długa, model matematyczny, warunki brzegowe, równanie linii długiej.

**Levoniuk V., Muchailovich T. Analysis of transient processes in a part of the ultra-high voltage electrical network that contains shunt reactors**

The article examines scientific publications related to the study of transient processes in electrical network elements, particularly focusing on long power lines with distributed parameters and shunt reactors during both normal and emergency operation modes. The analysis indicates that while the research on transient processes in long power transmission lines is pertinent, there is still insufficient exploration regarding those processes associated with shunt reactors. Using a generalized interdisciplinary modeling method, which modifies the integral Hamilton-Ostrogradski variational principle, a mathematical model of a portion of the electrical network has been developed. This model primarily includes long power lines with distributed parameters and incorporates air chokes. The model is presented in a single-line representation. The mathematical model is based on the equation of a long line with second-order partial derivatives. To address this equation, the Neumann and Poincaré boundary conditions are proposed. The object model was implemented through numerical methods by discretizing the line equations using the straight line method. The voltage at the fictitious node of the power transmission line was calculated, and its behavior was illustrated. A program was written in the Visual Fortran programming language based on the developed mathematical model, which facilitated numerical experiments. With this model, electromagnetic transient processes in the power system were analyzed under the condition of a symmetrical three-phase fault. The results of the computer simulation are presented in the form of diagrams that have been thoroughly analyzed, alongside recommendations for potential users.

**Keywords:** transient electromagnetic processes, shunt reactor, long line, mathematical model, boundary conditions, equation of a long line.

**Wstęp.** Jedne z głównych zadań analizy procesów przejściowych w sieciach elektroenergetycznych ma na celu określenie optymalnych warunków jej działania. Stosuje się to analizy zarówno roboczych stanów układu, jaki i stanów awaryjnych. Zadanie to nie jest prostym. Ponadto ze względu na skomplikowanie równań długiej linii zasilania o elektromagnetycznych parametrach rozłożonych. Jednym z takich stanów można rozpatrywać stany zwarcia. Jest znanym, że najbardziej niebezpiecznym z punktu widzenia przewodów linii jest stan symetrycznego trójfazowego zwarcia, co daje nam podstawę dla modelowania linii zasilania w jednofazowym wariacie. A znaczy pominać matematyczne operacji dla równań macierzowo-wektorowych [1].

Jest jasnym, że analiza procesów niestabilnych w elementach sieci elektrycznych jest bardzo kosztowną procedurą. Dlatego współcześnie do rozwiązywania takich problemów szeroko stosuje się aparat modelowania matematycznego, który opiera się na rachunku całkowym, różniczkowym, a także i wariacyjnym. Dlatego zadanie analizy procesów przejściowych w sieci elektroenergetycznej składa się z dwóch etapów: budowy modelu badanej sieci oraz symulacji komputerowej realizacji wybudowanego modelu.

#### **Analiza najnowszych badań i publikacji.**

W światowej literaturze naukowej istnieje duża liczba prac poświęconych analizie procesów przejściowych w sieciach elektrycznych. My rozważymy tylko te, które są najbliższe do treści naszej pracy niniejszej.

W pracy [2] zaproponowano analizę procesów przejściowych w trójfazowych układach elektrycznych drogą ekwiwalencji (równoważności) każdej fazy osobnym obwodowym schematem zastępczym. Formowanie równań stanu elektromagnetycznego obiektu przeprowadzono za pomocą metody napięć węzłowych, a ich rozwiązanie przeprowadzono za pomocą metod numerycznych. Wyniki symulacji procesów niestabilnych prezentowane są w postaci rysunków, które poddawane są analizie.

Algorytm obliczania procesów przejściowych i mocy zwarciowej został stworzony w pracy [3]. Na podstawie tego algorytmu zbudowano model matematyczny sieci elektrycznej i zaimplementowano go w kompleksie oprogramowania *MathCad*. Model matematyczny pozwala odtworzyć charakter zmiany prądu zwarciowego w czasie oraz analizę przejściowych procesów elektromagnetycznych zachodzących się w sieci elektrycznej.

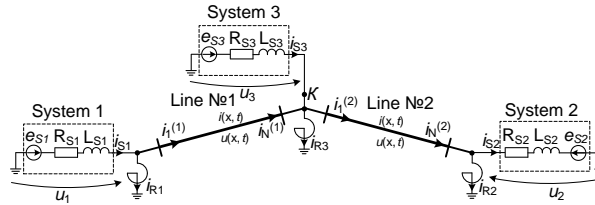
Istnieją również prace, w których prowadzone są analizy procesów przejściowych w kompleksach programowych ATR-EMTR i MATLAB/Simulink [4]. Tutaj warto zauważyć, że wspomniane kompleksy programowe podczas analizy procesów przejściowych w długich liniach (rozwiązywanie równania długiej linii) stosują podejścia uproszczone, w szczególności uwzględniają linii bez strat, pomijając rezystancję czynną i konduktywność linii podczas obliczeń, zmniejszając tym samym adekwatność uzyskanych wyników.

Podsumowując analizę dostępnej literatury można stwierdzić, że w większości przypadków analiza procesów przejściowych prowadzone są z wykorzystaniem schematów zastępczych (wykorzystywane jest tzw. podejścia obwodowe) lub z wykorzystaniem uproszczonych podejść (uwzględniane są wyidealizowane linie itp.).

**Ustalanie celów.** Biorąc wskazane powyższej, **celem pracy** jest wybudowanie adekwatnego modelu matematycznego fragmentu sieci elektroenergetycznej, kluczowym elementem której są długie linie elektroenergetyczne z dławikami powietrznymi, a także na tej podstawie przeprowadzenie analizy procesów przejściowych w wspomnianym obiekcie. Wprowadzenie dodatkowych dławików daje możliwość regulowania napięcia linii zasilania, która przy wielkich długościach występuje jako pojemnościowe obciążenia dla systemu elektroenergetycznego.

**Prezentując główny materiał.** W rysunku 1 przedstawiono analizowany fragment otwartej sieci elektrycznej ultra wysokiego napięcia, który składa się z trzech podukładów elektroenergetycznych, które są reprezentowane przez ich siły elektromotoryczne, wewnętrzne rezystancje czynne oraz indukcyjności. Podukłady elektroenergetyczne są łączone między sobą przez długie linie elektroenergetyczne, do których podłączone są powietrzne dławiki kompensacyjne. Jak było wspomniane rozważamy trójfazową symetryczną sieć elektryczną z otwartym obwodem w wykonaniu jednoliniowym.

Dla wybudowy modelu matematycznego fragmentu sieci elektrycznej, przedstawionego na rysunku 1 wykorzystujemy interdyscyplinarną metodę modelowania matematycznego, która opiera się na modyfikacji integralnej zasady wariacyjnej Hamiltona-Ostrogradskiego, opracowanej w [5].



**Rys. 1.** Fragment otwartej sieci elektrycznej  
**Fig. 1.** Fragment of an open electrical network

Rozszerzona funkcjonalność operacji matematycznej dla badanego układu według Hamiltona-Ostrogradzkiego będzie podobna do tej przedstawionej w [5; 6]:

$$S = \int_0^t L^* dt + \int_0^l \int L_l dl dt, \quad I = \int L_l dl, \quad (1)$$

gdzie  $S$  – akcja według Hamiltona-Ostrogradzkiego,  $L^*$  – rozszerzona funkcja

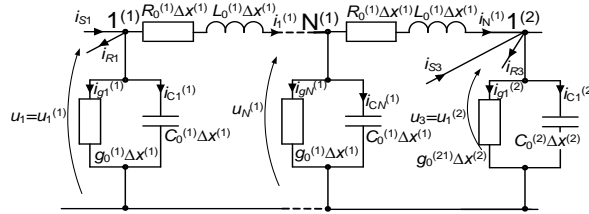
Lagrange'a,  $L_l$  – gęstość liniowa zmodyfikowanej funkcji Lagrange'a,  $I$  – energia funkcjonalna.

$$L^* = \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*, \quad (2)$$

gdzie  $L^*$  – rozszerzona funkcja Lagrange'a,

$\tilde{T}^*$  – energia kinetyczna,  $P^*$  – energia potencjalna,  $\Phi^*$  – rozpraszanie energii,  $D^*$  – energia zewnętrznych sił niepotencjalnych.

Представимы схемат подłączeń елементів аналізованого фрагменту мережі електричної.



**Rys. 2.** Schemat zastępczy podłączeń elementów analizowanego fragmentu sieci elektrycznej  
**Fig. 2.** Equivalent diagram of connecting elements of the analyzed part of the electrical network

Zapiszmy elementy rozszerzonej funkcji Lagrange'a [5]

$$T^* = \frac{L_{S1} i_{S1}^2}{2} + \frac{L_{S2} i_{S2}^2}{2} + \frac{L_{S3} i_{S3}^2}{2} + \frac{L_{R,m} i_{R,m}^2}{2}, \quad m = 1, 2, 3; \quad (3)$$

$$\Phi^* = \frac{1}{2} \int_0^t (R_{S1} i_{S1}^2 + R_{S2} i_{S2}^2 + R_{S3} i_{S3}^2 + R_{R,m} i_{R,m}^2) dt, \quad m = 1, 2, 3; \quad (4)$$

$$D^* = \int_0^t (e_{S1} i_{S1} + e_{S2} i_{S2} + e_{S3} i_{S3}) dt; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T^{(k)}}{\partial x} \equiv T_l^{(k)} = \frac{L_0^{(k)} Q_t^{2(k)}(x,t)}{2}, \quad \frac{\partial P^{(k)}}{\partial x} \equiv P_l^{(k)} = \frac{1}{2C_0^{(k)}} Q_x^{2(k)}(x,t), \quad (6)$$

gdzie

$$Q_t^{(k)} \equiv \frac{\partial Q^{(k)}(x,t)}{\partial t} = i^{(k)}(x,t), \quad Q_x^{(k)} \equiv \frac{\partial Q^{(k)}(x,t)}{\partial x}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(k)}}{\partial x} \equiv \Phi_l^{(k)} = \Phi_B^{(k)} - \Phi_{IB}^{(k)} = \int_0^t \left( \frac{R_0^{(k)}}{2} Q_t^{2(k)}(x,t) - \frac{g_0^{(k)}}{2C_0^{2(k)}} Q_x^{2(k)}(x,t) \right) d\tau, \quad k = 1, 2. \quad (8)$$

gdzie  $L_{S1}, L_{S2}, L_{S3}$  – indukcyjność odpowiednio systemów 1, 2 i 3;  $L_{R,j}$  – indukcyjność  $m$ -go dławika;  $R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}$  – aktywna rezystancja systemów 1, 2 i 3;  $R_{R,j}$  – aktywna rezystancja  $m$ -go dławika;  $e_{S1}, e_{S2}, e_{S3}$  – siła elektromotoryczna układów 1, 2 i 3;  $i_{S1}, i_{S2}, i_{S3}$  – prąd systemów 1, 2 i 3;  $i(x, t)$  – prąd w linii;  $R_0, g_0, C_0, L_0$  – rozproszone stałe linii;  $\Phi_B$  – gęstość liniowa zewnętrznego rozpraszania energii;  $\Phi_{IB}$  – gęstość liniowa wewnętrznego rozpraszania energii;  $Q(x, t)$  – ładunek linii;  $k$  – numer linii;  $m$  – numer dławika.

Można zapoznać się z metodą Równania podobnego, przedstawioną na przykład w [7-9]. Dlatego do syntezy syntetycznej proponujemy skończone równania stanu elektromagnetycznego obiektu, rys.1.



$$\frac{\partial v^{(k)}}{\partial t} = \left( C_0^{(k)} L_0^{(k)} \right)^{-1} \left( \frac{\partial^2 u^{(k)}}{\partial x^2} - \left( g_0^{(k)} L_0^{(k)} + C_0^{(k)} R_0^{(k)} \right) v^{(k)} - g_0^{(k)} R_0^{(k)} u^{(k)} \right), \quad \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} = v^{(k)}; \quad (9)$$

$$\frac{di_{S1}}{dt} = \frac{1}{L_{S1}} (e_{S1} - R_{S1} i_{S1} - u_1), \quad \frac{di_{S2}}{dt} = \frac{1}{L_{S2}} (u_2 - R_{S2} i_{S2} - e_{S2}); \quad (10)$$

$$\frac{di_{S3}}{dt} = \frac{1}{L_{S3}} (e_{S3} - R_{S3} i_{S3} - u_3); \quad (11)$$

$$\frac{di_{R,m}}{dt} = \frac{1}{L_{R,m}} (u_m - R_{R,m} i_{R,m}), \quad m = 1, 2, 3, \quad (12)$$

tutaj  $u_1, u_2, u_3$  – napięcia w obwodach podstawcyjnych odpowiednio systemów zasilania 1, 2 i 3. Na podstawie drugiego prawa Kirchhoffa zapiszemy dla (9) warunki brzegowe [10]:

$$-\frac{\partial u^{(k)}}{\partial x} = R_0^{(k)} i^{(k)} + L_0^{(k)} \frac{\partial i^{(k)}}{\partial t}. \quad (13)$$

Spiszemy (9) i (13) w dyskretnej przestrzeni dla węzła  $j$  linii (używając pojęcia pochodnej centralnej):

$$\frac{dv_j^{(k)}}{dt} = \left( C_0^{(k)} L_0^{(k)} \right)^{-1} \left( \frac{u_{j-1}^{(k)} - 2u_j^{(k)} + u_{j+1}^{(k)}}{(\Delta x^{(k)})^2} - \left( g_0^{(k)} L_0^{(k)} + C_0^{(k)} R_0^{(k)} \right) v_j^{(k)} - g_0^{(k)} R_0^{(k)} u_j^{(k)} \right), \quad (14)$$

tutaj

$$u_1^{(k)} = u(x, t)|_{x=0}, \quad u_N^{(k)} = u(x, t)|_{x=l}, \quad u_1^{(1)} \equiv u_1, \quad u_1^{(2)} \equiv u_3, \quad u_N^{(1)} \equiv u_3, \quad u_N^{(2)} \equiv u_2; \quad (15)$$

$$-\frac{u_{j+1}^{(k)} - u_{j-1}^{(k)}}{2\Delta x^{(k)}} = R_0^{(k)} i_j^{(k)} + L_0^{(k)} \frac{di_j^{(k)}}{dt}; \quad (16)$$

$$\frac{du_j^{(k)}}{dt} = v_j^{(k)}, \quad j = 1, \dots, N, \quad k = 1, 2. \quad (17)$$

Po przeanalizowaniu równania (14) widać, że aby znaleźć napięcie na pierwszym i ostatnim punkcie dyskretyzacji, należy znaleźć nieznanne napięcia w fikcyjnych węzłach  $u_0^{(k)}$  i  $u_{N+1}^{(k)}$ . Szukajmy napięcia.

Zwróćmy uwagę na równanie ograniczenia skleronomicznego (patrz rys. 2):

$$i_{S1} - i_1^{(1)} - i_{g1}^{(1)} - i_{C1}^{(1)} - i_{R1} = 0, \quad i_{g1}^{(1)} = \Delta x^{(1)} g_0^{(1)} u_1^{(1)}; \quad (18)$$

$$i_{C1}^{(1)} = \Delta x^{(1)} C_0^{(1)} \frac{du_1^{(1)}}{dt} = \Delta x^{(1)} C_0^{(1)} v_1^{(1)}. \quad (19)$$

Różniczkując w czasie (18) i (19), otrzymujemy

$$\frac{di_{S1}}{dt} - \frac{di_1^{(1)}}{dt} - \frac{di_{g1}^{(1)}}{dt} - \frac{di_{C1}^{(1)}}{dt} - \frac{di_{R1}}{dt} = 0, \quad \frac{di_{g1}^{(1)}}{dt} = \Delta x^{(1)} g_0^{(1)} v_1^{(1)}; \quad (20)$$

$$\frac{di_{C1}^{(1)}}{dt} = \Delta x^{(1)} C_0^{(1)} \frac{dv_1^{(1)}}{dt}. \quad (21)$$

Teraz, na podstawie (16) i rys. 2, zapiszemy:

$$\frac{di_1^{(1)}}{dt} = \frac{1}{L_0^{(1)}} \left( \frac{u_0^{(1)} - u_2^{(1)}}{2\Delta x^{(1)}} - R_0^{(1)} i_1^{(1)} \right); \quad (22)$$

$$\frac{di_N^{(1)}}{dt} = \frac{1}{L_0^{(1)}} \left( \frac{u_{N-1}^{(1)} - u_{N+1}^{(1)}}{2\Delta x^{(1)}} - R_0^{(1)} i_N^{(1)} \right); \quad (23)$$

$$\frac{di_N^{(1)}}{dt} = \frac{1}{L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}} \left( u_N^{(1)} - R_0^{(1)} \Delta x^{(1)} i_N^{(1)} - u_1^{(2)} \right). \quad (24)$$

Podstawiający w pierwsze równanie wzoru (20) pierwsze równanie z (10), drugie równanie z (20) ze względem (12), (23) przy  $m = 1$ , otrzymujemy:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{L_{S1}} (e_{S1} - R_{S1} i_{S1} - u_1) - \frac{1}{L_0^{(1)}} \left( \frac{u_0^{(1)} - u_2^{(1)}}{2 \Delta x^{(1)}} - R_0^{(1)} i_1^{(1)} \right) - \\ & - \Delta x^{(1)} g_0^{(1)} v_1^{(1)} - \Delta x^{(1)} C_0^{(1)} \frac{dv_1^{(1)}}{dt} - \frac{1}{L_{R1}} (u_1 - R_{R1} i_{R1}) = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Zastępując (14) do (25), który jest napisany dla pierwszego węzła dyskretizacyjnego dla pierwszej linii i czerpiącego z niego napięcie, otrzymamy:

$$\begin{aligned} u_0^{(1)} = & \frac{2 \Delta x^{(1)} L_0^{(1)}}{3} \left[ \frac{1}{L_{S1}} (e_{S1} - R_{S1} i_{S1} - u_1^{(1)}) - \frac{1}{L_{R1}} (u_1 - \right. \\ & \left. - R_{R1} i_{R1}) + \left( \frac{\Delta x^{(1)} g_0^{(1)} R_0^{(1)}}{L_0^{(1)}} + \frac{2}{L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}} \right) u_1^{(1)} - \frac{1}{2 L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}} u_2^{(1)} - \right. \\ & \left. - \left( \Delta x^{(1)} g_0^{(1)} - \frac{\Delta x^{(1)} (g_0^{(1)} L_0^{(1)} + C_0^{(1)} R_0^{(1)})}{L_0^{(1)}} \right) v_1^{(1)} + \frac{R_0^{(1)}}{L_0^{(1)}} i_1^{(1)} \right]. \end{aligned} \quad (26)$$

Równania (24) i (25) względem siebie wytworzą:

$$\frac{1}{L_0^{(1)}} \left( \frac{u_{N-1}^{(1)} - u_{N+1}^{(1)}}{2 \Delta x^{(1)}} - R_0^{(1)} i_N^{(1)} \right) = \frac{(u_N^{(1)} - R_0^{(1)} \Delta x^{(1)} i_N^{(1)} - u_1^{(2)})}{L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}}. \quad (27)$$

Napięcie w fikcyjnym węźle  $u_{N+1}^{(1)}$  wyniki:

$$u_{N+1}^{(1)} = -2(u_N^{(1)} - u_1^{(2)}) + u_{N-1}^{(1)}. \quad (28)$$

Ze względu na ograniczenia przestrzenne nie dostarczymy wyników dla napięcia w fikcyjnych węzłach drugiej linii, ale zapewnimy wyrażen skończonych:

$$\begin{aligned} u_0^{(2)} = & \frac{2 \Delta x^{(2)} L_0^{(2)}}{3} \left[ \frac{(u_N^{(1)} - R_0^{(1)} \Delta x^{(1)} i_N^{(1)} - u_1^{(2)})}{L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}} + \frac{1}{L_{S3}} (e_{S3} - R_{S3} i_{S3} - \right. \\ & \left. - u_1^{(2)}) - \frac{1}{L_{R3}} (u_3 - R_{R3} i_{R3}) + \left( \frac{\Delta x^{(2)} g_0^{(2)} R_0^{(2)}}{L_0^{(2)}} + \frac{2}{L_0^{(2)} \Delta x^{(2)}} \right) u_1^{(2)} + \frac{R_0^{(2)}}{L_0^{(2)}} i_1^{(2)} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2 L_0^{(2)} \Delta x^{(2)}} u_2^{(2)} - \left( \Delta x^{(2)} g_0^{(2)} - \frac{\Delta x^{(2)} (g_0^{(2)} L_0^{(2)} + C_0^{(2)} R_0^{(2)})}{L_0^{(2)}} \right) v_1^{(2)} \right]; \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} u_{N+1}^{(2)} = & \frac{2 L_0^{(2)} \Delta x^{(2)} L_{R2} L_{S2}}{L_{R2} L_{S2} + L_0^{(2)} \Delta x^{(2)} (L_{S2} + L_{R2})} \left[ \frac{u_N^{(2)}}{L_0^{(2)} \Delta x^{(2)}} - \right. \\ & \left. - \frac{R_0^{(2)}}{L_0^{(2)}} i_N^{(2)} + \frac{R_{R2}}{L_{R2}} i_{R2} + \frac{(R_{S2} i_{S2} + e_{S2})}{L_{S2}} \right] + u_{N-1}^{(2)} - 2 u_N^{(2)}. \end{aligned} \quad (30)$$

Obecny w linii można znaleźć poprzez dyskretizację (13) metodą skończonej różnicy, używając pojęcia odpowiedniej pochodnej [5]:

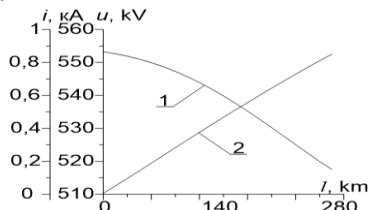
$$\frac{di_j^{(k)}}{dt} = \frac{1}{L_0^{(k)} \Delta x^{(k)}} (u_j^{(k)} - u_{j+1}^{(k)}) - \frac{R_0^{(k)}}{L_0^{(k)}} i_j^{(k)}, \quad j=1, \dots, N, \quad k=1, 2. \quad (31)$$

Wspólnemu całkowaniu podlega: (10) – (12), (14), (17), (31) z uwzględnieniem (26), (28) – (30).

### Wyniki symulacji komputerowej.

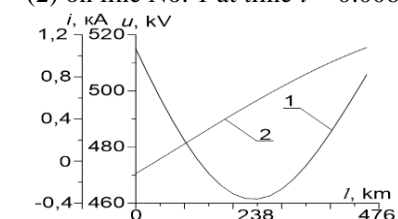
Przeprowadzono symulację komputerową w celu analizy procesów nieustalonych podczas wyjścia systemu w stan ustalony i pracy w stanie zwarciovym. W chwili  $t = 0$  s wszystkie siły elektromotoryczne zostały włączone, po wejściu układu w stan ustalony, w chwili  $t = 0,18$  s nastąpiło zwarcie w punkcie K, rys 1, 2.

Parametry układu. Napięcie – 750 kV.  $e_{S1} = 638 \sin(\omega t + 11,1^\circ)$  kV,  $e_{S2} = 590 \sin(\omega t)$  kV,  $e_{S3} = 605 \sin(\omega t + 5,5^\circ)$  kV,  $R_{S1} = 2,35$  Ohm,  $R_{S2} = 2,6$  Ohm,  $R_{S3} = 2,1$  Ohm,  $L_{S1} = 0,2$  H,  $L_{S2} = 0,15$  H,  $L_{S3} = 0,17$  H.:  $R_0 = 1,9 \cdot 10^{-5}$  Ohm/m,  $L_0 = 9,24 \cdot 10^{-7}$  H/m,  $C_0 = 1,3166 \cdot 10^{-11}$  F/m,  $g_0 = 3,25 \cdot 10^{-11}$  Sm/m.



Rys. 3. Rozkład przestrzenny napięcia (1) i prądu (2) na linii Nr 1 w czasie  $t = 0.006$  s

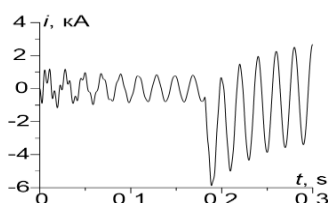
Fig. 3. Spatial distribution of voltage (1) and current (2) on line No. 1 at time  $t = 0.006$  s



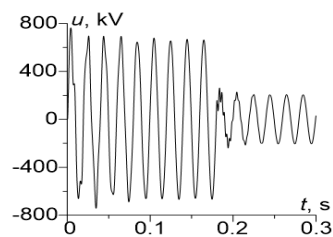
Rys. 4. Rozkład przestrzenny napięcia (1) i prądu (2) na linii Nr 2 w czasie  $t = 0.006$  s

Fig. 4. Spatial distribution of voltage (1) and current (2) on line No. 2 at time  $t = 0.006$  s

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono rozkłady przestrzenne funkcji napięcia (1) i prądu (2) odpowiednio w liniach nr 1 i nr 2 w czasie  $t = 0,006$  s. Z rysunków widać, że rozkłady przestrzenne funkcji prądu mają nieco podobny charakter i różnią się jedynie wielkością prądu. Tego samego nie można powiedzieć o przestrzennych rozkładach funkcji napięć w liniach nr 1 i nr 2. Analizując przytoczone rysunki widzimy, że napięcie w linii nr 1 ma największą wartość na początku linii, a najmniejszą na końcu. W odniesieniu do linii nr 2, tutaj napięcie ma największe wartości na początku i na końcu linii, a najniższe – w środku.



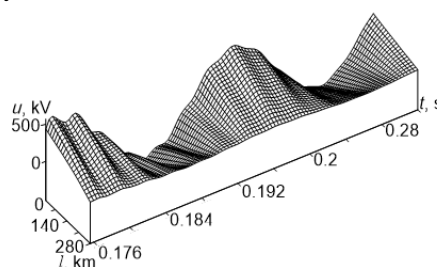
Rys. 5. Prąd w końcu linii Nr 2  
Fig. 5. Current at the end of line No. 2



Rys. 6. Napięcie w połowie linii Nr 1

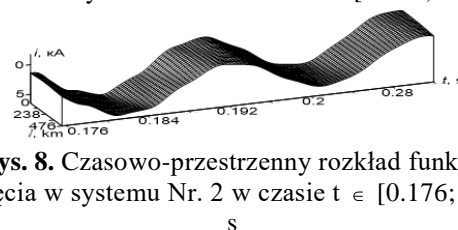
Fig. 6. Voltage in the middle of line No. 1

Na rysunkach 5, 6 przedstawiono przebiegi przejściowe prądu na końcu linii Nr 2 (w pobliżu Systemu 2) i napięcia w środku linii Nr 1. Z rysunków widać, że po wejściu układu w stan ustalony chwilowa wartość amplitudy prądu fazowego wynosiła ok. 770 A (rys. 5), a chwilowa wartość amplitudy napięcia fazowego – 650 kV (rys. 6). Po wystąpieniu zwarcia prąd udarowy osiągnął wartość 6 kA (rys. 5), a napięcie w stanie ustalonym obniżyło się do 200 kV (rys. 6).



Rys. 7. Czasowo-przestrzenny rozkład funkcji napięcia w systemie Nr. 1 w czasie  $t \in [0.176; 0.32]$  s

Fig. 7. Time-spatial distribution of the voltage function in system No. 1 at time  $t \in [0.176; 0.32]$  p



Rys. 8. Czasowo-przestrzenny rozkład funkcji napięcia w systemie Nr. 2 w czasie  $t \in [0.176; 0.32]$  s

Fig. 8. Time-spatial distribution of the voltage function in system No. 2 at time  $t \in [0.176; 0.32]$  p

W rysunkach 7 i 8 przedstawiono czasowo-przestrzenny rozkład funkcji napięcia linii Nr 1 oraz prądu w linii Nr 2 po stanie zwarcia. Należy odnotować wysoką wartość informacyjną tych ostatnich; polega na tym, że zarówno przestrzenne, jak i czasowe współrzędne tworzą przestrzeń trójwymiarową.

**Wnioski.** 1. Wykorzystanie zmodyfikowanej zasady Hamiltona-Ostrogradskiego umożliwiło zastosowanie podejść interdyscyplinarnych w analizie procesów przejściowych w złożonych elementach sieci elektrycznych. Dlatego zapis równań stanu dynamicznego obiektu sprowadza się do procedury tworzenia elementów rozciągniętego Lagrange'a oraz

równań połączeń sił niestacjonarnych zapisanych w oparciu o prawa elektrotechniki stosowanej.

2. Wprowadzenie dławików powietrznych do długich linii ultra wysokiego napięcia daje możliwość regulowania napięcia sieci energetycznej. W stanach ustalonych to powoduje kompensację mocy biernej.

3. W obwodach elektroenergetycznych, obejmujących długie linie z rozłożonymi parametrami funkcja napięcia na końcach linii zazwyczaj są niewiadome. Fakt ten komplikuje zadanie analizy procesów przejściowych w układach elektrycznych. Istnieje zatem potrzeba znalezienia wspomnianych napięć na podstawie dodatkowych podejść. Aby rozwiązać ten problem, w niniejszej pracy z sukcesem wykorzystano teorię warunków brzegowych drugiego i trzeciego rodzajów do równania długiej linii elektroenergetycznej.

#### Lista bibliograficzna

1. Lezhniuk P., Kulyk V., Netrebskyi V., Teptya V. Principle of least action in electrical engineering and power engineering. Vinnytsia: VNTU, 2014. 212 p.

2. Nobre D. M., Boaventura W. C., Neves W. L., Phase-domain network equivalents for electromagnetic transient studies. *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05): materials of the conference* (Montreal, June 9-23, 2005). Montreal, 2005.

3. Huang J., Shen B., Yang F. Simulation model of shipboard low voltage molded case circuit breaker based on PSCAD/EMTDC. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2014. № 2. P. 532 – 540.

4. Pereira C., Carneiro S., Szczupak J. Synthesis of transient equivalents using digital

filters for real time simulation of electromagnetic transients in large electric power systems. *International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003: materials of the conference* (New Orleans, September 28 – October 2, 2003). New Orleans, 2003.

5. Чабан А. В. Принцип Гамільтона-Остроградського в електромеханічних системах. Львів: В-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.

6. Chaban A., Lis M., Szafraniec A., Levoniuk V. An application of the Hamilton-Ostrogradsky principle to the modeling of an asymmetrically loaded three-phase power line. *Energies*. 2022. Vol. 15. Is. 21. 8255.

7. Czaban A., Lis M., Chrzan M., Szafraniec A., Levoniuk V. Mathematical modelling of transient processes in power supply grid with distributed parameters. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2018. № 1. p. 17 – 20.

8. Perzynski T., Levoniuk V., Figura R. Transient electromagnetic processes analysis in high voltage transmission lines during two-phase short circuits. *Sensors*. 2023. № 1. P. 298.

9. Chaban A., Lis M., Szafraniec A., Levoniuk V., Chaban V. An analysis of transient processes in a three-phase long power supply line including an asymmetric RLC load. *Przegląd elektrotechniczny*. 2022. № 12. P. 209 – 212.

10. Chaban A., Lis M., Szafraniec A., Levoniuk V. Mathematical modelling of transient processes in a three phase electric power system for a single phase short-circuit. *Energies*. 2022. Vol. 15. Is. 3. P. 1126 – 1143.

Стаття надійшла 20.03.2024

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ ВІД НОМІНАЛЬНОГО ЗНАЧЕННЯ  
У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА**

*Дмитро Гречин, к. т. н., Іван Дробот, Маркіян Гошко, к. т. н.,  
Орест Какула, Віталій Філіпович*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: hrechynd@ukr.net; dim39.2017@gmail.com; m121314@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.101>

**Гречин Д., Дробот І., Гошко М., Какула О., Філіпович В. Дослідження відхилення напруги від номінального значення у системі електропостачання підприємства**

Під якістю електроенергії розуміють ступінь відповідності фактичних значень параметрів електроенергії значенням, зазначеним у ГОСТ 13109-97. У нашому дослідженні йдеться про відхилення напруги, нормальні значення яких становлять +5 або -5 %, а граничні – +10 або -10 % за ГОСТ 13109-97. Коливання напруги в мережі залежать від потужності джерела живлення, потужності, що втрачається під час електропередачі, та потужності електрообладнання. Найпоширенішими споживачами електроенергії є асинхронні двигуни, потужність яких пропорційна квадрату напруги, тому втрати значно більші. При втраті напруги швидкість обертання двигуна також зменшується, що спричиняє збільшення ковзання. Струм також збільшується, ефективність знижується, а ізоляція зношується швидше. При зниженні напруги пусковий момент двигуна і механічні характеристики погіршуються.

В електрообладнанні втрати напруги призводять до зниження потужності, збільшення витрат часу на технічні та виробничі процеси, а отже, до погіршення продуктивності та якості продукції. У разі зниження напруги освітлення також погіршується, оскільки світловий потік залежить від значення напруги. З підвищенням напруги ККД лампи зростає, але термін її служби зменшується.

Наше дослідження присвячене актуальним питанням експлуатації електромережі підприємства. Сучасні дослідницькі та аналітичні методи дали змогу досягти чудових результатів у різних сферах. Зокрема, програмне забезпечення MATLAB/Simulink дозволяє аналізувати різні параметри роботи електромереж у різних режимах, для розрахованого електропостачання підприємства побудувати модель системи електропостачання і на ній дослідити відхилення напруги від номінального значення.

У статті представлено побудовану модель розрахованої системи електропостачання підприємства у середовищі MATLAB/Simulink. Проведено дослідження роботи системи електропостачання на цій моделі. Моделювання проведено при зміні навантаження в межах від  $0,2S_n$  до  $1,2S_n$ . Дослідження проведено на предмет відхилення напруги в різних точках схеми від номінального значення, для трьох випадків, при зміні коефіцієнта трансформації на трансформаторі 10/0,4 кВ, для значень 400 В,  $400 \cdot 1,025$  В,  $400 \cdot 1,05$  В.

Аналіз отриманих результатів показав, що схема спроектована на належному рівні, оскільки здебільшого відхилення перебувають у межах гранично допустимої норми, проте для забезпечення точнішого дотримання рівня напруги можна здійснити регулювання напруги на трансформаторі за допомогою перемикання обмотки або у першій лінії збільшити переріз проводу живлення.

**Ключові слова:** електропостачання, модель, напруга, гранично допустиме значення відхилення напруги.

**Hrechyn D., Drobot I., Hoshko M., Kakula O., Filipovych V. Study of voltage deviation from the nominal value in the electrical supply systems of the enterprise**

The quality of electricity refers to how closely the actual values of electrical parameters align with the values specified in GOST 13109-97. This study focuses on voltage deviations, which have normal values of +5% or -5% and limit values of +10% or -10%, according to GOST 13109-97. The power of the power source influences voltage fluctuations in the network, the power lost during transmission, and the power consumed by electrical equipment. Asynchronous motors are among the most common consumers of electricity, and their power consumption is proportional to the square of the voltage. This means that losses are significantly higher when voltage decreases. A drop in voltage leads to a decrease in the motor's rotational speed, which increases slippage. Additionally, current increases, efficiency declines, and insulation deteriorates faster. Lower voltage also negatively impacts the motor's starting torque and mechanical characteristics.

In electrical equipment, voltage losses result in reduced power, increased time for technical and production processes, and ultimately a decline in productivity and product quality. Furthermore, a decrease in voltage adversely affects lighting, as the luminous flux is directly related to voltage levels. While an increase in voltage enhances lamp efficiency, it can also shorten the lamp's service life.

The efficiency of converting electrical energy into other forms is partially influenced by the quality of the electricity itself. Research on electrical networks, power losses, oscillatory processes, and voltage levels continues to be relevant. Modern research methods frequently employ modeling techniques.

This work addresses significant issues associated with the operation of the company's power grid. Advances in research and analytical methods have led to impressive results across various fields. In particular, MATLAB/Simulink software facilitates the analysis of power network operating parameters under different conditions.

The article presents a model of the company's power supply system constructed in the MATLAB/Simulink environment. A study of the power supply system's operation was conducted using this model. The simulation covered load variations from 0.2Sn to 1.2Sn. The investigation focused on voltage deviations at different circuit points from the nominal value across three scenarios: when the transformer's transformation ratio is 10/0.4 kV, with values of 400 V, 400•1.025 V, and 400•1.05 V.

Analysis of the results indicates that the system has been designed satisfactorily, as most deviations remain within the maximum allowable limits. However, to achieve more precise compliance with the voltage level, voltage on the transformer can be adjusted by switching the winding, or alternatively, by increasing the cross-section of the power wire in the first line.

**Keywords:** power supply, model, voltage, maximum allowable value of voltage deviation.

**Постановка проблеми.** Під якістю електроенергії розуміють ступінь відповідності фактичних значень параметрів електроенергії значенням, зазначеним в ГОСТ 13109-97. У нашому дослідженні йдеться про відхилення напруги, нормальні значення яких становлять +5 або -5%, а граничні +10 або -10 % за ГОСТ 13109-97. Коливання напруги в мережі залежать від потужності джерела живлення, потужності, що втрачається під час електропередачі, та потужності електрообладнання. Найпоширенішими споживачами електроенергії є асинхронні двигуни, потужність яких пропорційна квадрату напруги, тому втрати значно більші. При втраті напруги швидкість обертання двигуна також зменшується, що спричиняє збільшення ковзання. Струм також збільшується, ефективність знижується, а ізоляція зношується швидше. При зниженні напруги пусковий момент двигуна і механічні характеристики погіршуються.

В електрообладнанні втрати напруги призводять до зниження потужності, збільшення витрат часу на технічні та виробничі процеси, а отже, до погіршення продуктивності та якості продукції. У разі зниження напруги освітлення також погіршується, оскільки світловий потік залежить від значення напруги. З підвищенням напруги ККД лампи зростає, але термін її служби зменшується.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ефективність перетворення електричної енергії в інші види певною мірою залежить від якості самої електроенергії. Дослідження спрямовані на аналіз процесів в електричних мережах, втрат електроенергії, коливних процесів, рівня напруги тощо, зберігають актуальність. Сучасні методи дослідження ґрунтуються здебільшого на використанні моделювання [1-19].

Зміни режиму роботи притаманні енергетичним процесам, що відбуваються в електроустановках, і можуть визначатися змінними в часі значеннями основних параметрів цього процесу.

Зміна режиму роботи джерела живлення залежить від двох режимів, в яких напруга підвищується або знижується: режим мінімального навантаження і режим максимального навантаження. У першому випадку напруга в енергетичному центрі зростає, а в другому – зменшується. Зміни вихідної потужності джерела електричної енергії відбуваються в результаті реактивного або неточного регулювання реактивної потужності. Це відбувається шляхом зміни струму в обмотці збудження генератора за допомогою спеціальних пристроїв автоматичного регулювання збудження (АРЗ). Однофазні навантаження розподіляються пофазно відповідно до загальної потужності. Вплив ударних навантажень викликає великі і дуже швидкі зміни напруги у вузлах мережі.

Регулювання напруги відбувається в мережах живлення та розподілу і відбувається незалежно. Однак основне завдання регулювання напруги зовсім інше. У мережі живлення важливо зменшити втрати потужності, а в розподільчій мережі необхідно підтримувати нормовані значення відхилень напруги в з'єднаннях приймачів.

Розрізняють центральне регулювання напруги та місцеве регулювання напруги. У першому випадку регулювання напруги відбувається в центрі живлення і змінює напругу в мережі. В останньому випадку регулювання відбувається безпосередньо споживачем, а значення напруги змінюється тільки в локальній ділянці мережі. Регулювати напругу в мережі можна за допомогою спеціального обладнання та різних засобів. Регулювання коефіцієнта трансформації трансформаторів і автотрансформаторів здійснюється перемиканням контактів регулюючої гілки, яка оснащена обмоткою. Ці перемикання можна проводити, не порушуючи правил улаштування електроустановок, тобто відключаючи трансформатор від мережі або під навантаженням.

**Постановка завдання.** Наше дослідження присвячене актуальним питанням експлуатації електромережі підприємства. Сучасні дослідни-

цькі та аналітичні методи дали змогу досягти чудових результатів у різних сферах. Зокрема, програмне забезпечення MATLAB/Simulink дозволяє аналізувати різні параметри роботи електромереж у різних режимах, для розрахованого електропостачання підприємства побудувати модель системи електропостачання і на ній дослідити відхилення напруги від номінального значення.

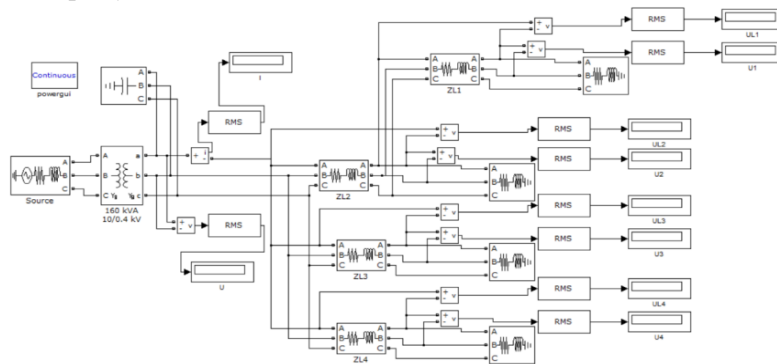
**Виклад основного матеріалу.** Модель системи електропостачання підприємства складається із трансформатора живлення 10/0,4 та чотирьох ліній електропостачання із споживачами електроенергії. Згідно з розрахованими значеннями складаємо структурно-математичну модель у середовищі MATLAB/Simulink і вводимо параметри системи електропостачання (рис. 1).

Основними елементами моделі є споживачі енергії, що отримують живлення по

чотирьох лініях електропостачання від трьох фідерів, трансформатора 10/0,4 кВ, джерела живлення. Для проведення вимірів у моделі використовуємо вольтметри, зокрема напруги на навантаженні, спадів напруги в лініях живлення та на виході трансформатора; амперметр для виміру сумарного струму на трансформаторі.

Проведемо дослідження відхилення напруги в системі електропостачання.

Дослід передбачає проведення зміни навантаження у межах від  $0,2S_N$  до  $1,2S_N$  при напрузі 400 В. При цьому вимірюємо параметри: на виході трансформатора, значення напруги на навантаженні та значення струму у вторинній обмотці трансформатора, значення спаду напруги в лініях таблиці, визначаємо значення відхилення напруги від нормованого значення (табл. 1).



**Рис. 1.** Модель мережі електропостачання підприємства в середовищі MATLAB/Simulink

**Fig. 1.** Model of the enterprise's power supply network in the MATLAB/Simulink environment

**Таблиця 1.** Значення відхилення напруги на навантаженні та виході трансформатора, %  
**Table 1.** The value of voltage deviation on the load and output of the transformer, %

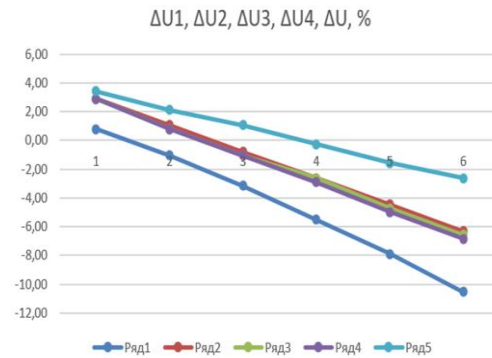
Номер лінії	Навантаження					
	0,2 $S_N$	0,4 $S_N$	0,6 $S_N$	0,8 $S_N$	1,0 $S_N$	1,2 $S_N$
$\Delta U_1$ , %	0,79	-0,53	-7,11	-5,53	-7,89	-10,53
$\Delta U_2$ , %	2,89	1,05	-0,79	-2,63	-4,47	-6,32
$\Delta U_3$ , %	2,89	0,79	-1,05	-2,63	-4,74	-6,58
$\Delta U_4$ , %	2,89	0,79	-1,05	-2,89	-7,37	-6,84
$\Delta U$ , %	3,42	2,11	1,05	-0,26	-1,58	-2,63

Після проведеного дослідження, аналізуючи значення табл. 1 та рис. 2, слід відзначити, що при зміні навантаження від  $0,2S_N$  до  $1,2S_N$  похибка відхилення напруги перебуває в межах від 3,42 % до -10,53 %. Основна частина значень відхилення напруги лежить у гранично допустимих межах, лише при перевантаженні у межах  $1,2 S_N$ , у першій лінії відхилення напруги сягає 10,53 %, що є більше гранично допустимого значення, а саме 10 %. Криві, які описують похибки в різних місцях схеми, лежать купчасто, відповідно в загальному мережа розрахо-

вана добре. Попри те, лінія перша (ряд 1) та напруга на виході трансформатора (ряд 5) відділені від основної групи кривих, а відповідно можна було б збільшити переріз лінії живлення першої для зближення цієї характеристики з іншими кривими. Це передбачає збільшення вартості мережі. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги є в межах від -1,58 % до -7,89 %, тобто в допустимих межах. Діапазон відхилення становить сумарно 13,95 %, а в номінальному режимі 6,31%.

На трансформаторі живлення можна збільшувати або зменшувати напругу на 2,5 % чи на 5 % від номінального значення. Проводимо аналогічний дослід при збільшеному значенні напруги на 2,5 %. Результат моделювання показано в табл. 2. Після проведеного дослідження, аналізуючи значення табл. 6 та рис. 3, слід зазначити, що при зміні навантаження від  $0,2S_n$  до  $1,2S_n$ , похибка відхилення напруги перебуває в межах від 6,05 % до -9,21 %. Усі відхилення напруги лежать у гранично допустимих межах. Криві, які описують похибки в різних місцях схеми, лежать купчасто, відповідно в загальному мережа розрахована добре. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги є в межах від 0,53 % до -6,05 %, тобто перебуває в допустимих межах. Загальний діапазон відхилення напруги від номінальної становить

15,21%, а в номінальному режимі 6,58 %, що є більше, ніж у попередньому випадку.



**Рис. 2.** Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при напрузі 400 В  
**Fig. 2.** Graphical dependence of the simulation result of the voltage deviation from the nominal value at a voltage of 400 V

**Таблиця 2.** Значення відхилення напруги на навантаженні та виході трансформатора %  
**Table 2.** The value of voltage deviation on the load and output of the transformer %

Номер лінії	Навантаження					
	0,2 $S_n$	0,4 $S_n$	0,6 $S_n$	0,8 $S_n$	1,0 $S_n$	1,2 $S_n$
$\Delta U_1, \%$	4,47	1,84	-0,79	-3,42	-6,05	-9,21
$\Delta U_2, \%$	5,26	3,42	1,32	-0,53	-2,37	-4,21
$\Delta U_3, \%$	5,26	3,42	1,32	-0,79	-2,63	-4,74
$\Delta U_4, \%$	5,26	3,16	1,05	-0,79	-2,89	-4,74
$\Delta U, \%$	6,05	4,47	3,16	1,84	0,53	-0,79

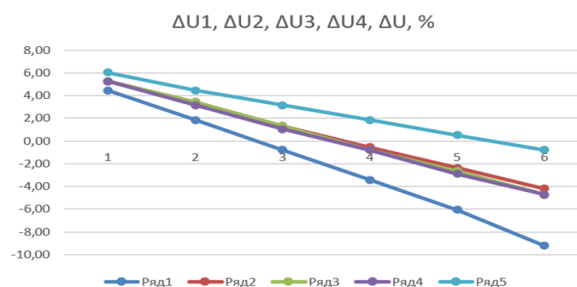
А тепер проведемо дослідження за умови збільшення напруги на 5 %. Результат проведеного дослідження показано в табл. 3.

Після проведеного дослідження, аналізуючи значення табл. 3 та рис. 4, слід зазначити, що при зміні навантаження від  $0,2S_n$  до  $1,2S_n$  похибка відхилення напруги перебуває в межах від 8,68 % до -6,84 %. Усі відхилення напруги лежать у гранично допустимих межах.

Криві, які описують похибки в різних місцях схеми, лежать купчасто, відповідно в загальному мережа розрахована добре. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги є в межах від 2,63 % до -4,21 %, тобто в допустимих межах. Загальний діапазон відхилення напруги від номінальної становить

15,52%, а в номінальному режимі 6,84 %, що є більше, ніж у попередньому випадку.

**Висновки.** Побудовано модель системи електропостачання підприємства і проведено її дослідження на предмет відхилення напруги в різних точках схеми від номінального значення. Аналіз отриманих результатів показав, що схема спроектована на належному рівні, оскільки в основному відхилення є в межах гранично допустимої норми, проте для забезпечення точнішого дотримання рівня напруги можна здійснити регулювання напруги на трансформаторі за допомогою перемикачів обмотки або у першій лінії збільшити переріз проводу живлення.



**Рис. 3.** Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при напрузі  $400 \cdot 1,025$  В

**Fig. 3.** Graphical dependence of the simulation result of the voltage deviation from the nominal value at a voltage of  $400 \cdot 1,025$  V



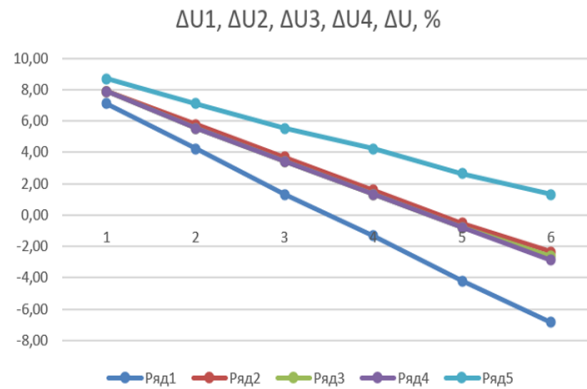


Рис. 4. Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при нарузі 400•1,05 В

Fig. 4. Graphical dependence of the simulation result of the voltage deviation from the nominal value at a voltage of 400•1.05 V

Таблиця 3. Значення відхилення напруги на навантаженні та виході трансформатора, %  
Table 3. The value of voltage deviation on the load and output of the transformer, %

Номер лінії	Навантаження					
	0,2S <sub>н</sub>	0,4S <sub>н</sub>	0,6S <sub>н</sub>	0,8S <sub>н</sub>	1,0S <sub>н</sub>	1,2S <sub>н</sub>
ΔU1, %	7,11	4,21	1,32	-1,32	-4,21	-6,84
ΔU2, %	7,89	5,79	3,68	1,58	-0,53	-2,37
ΔU3, %	7,89	5,53	3,42	1,32	-0,79	-2,63
ΔU4, %	7,89	5,53	3,42	1,32	-0,79	-2,89
ΔU, %	8,68	7,11	5,53	4,21	2,63	1,32

#### Бібліографічний список

1. Воротницький В. Э., Загорский Я. Т., Апрыткин В. Н. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. *Электрические станции*. 2000. № 5. 154 с.
2. Галанов В. П., Галанов В. В. Влияние качества электроэнергии на уровень ее потерь в сетях. *Электрические станции*. 2001. 63 с.
3. Гоголюк О. П. Дослідження електропередачі в сучасних комп'ютерних середовищах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 671. С. 24-31.
4. Гречин Д., Дробот І. Дослідження відхилень напруги у мережі електропостачання підприємства при експлуатації електрообладнання. *Вісник Львівського національного університету природокористування: агроінженерні дослідження*. 2023. № 27. С. 61-69.
5. Золотарев М. В., Обозный А. Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей. *Вісник НТУ ХПИ*. 2006. Вип. 34. С. 129-132.
6. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины / В. В. Лях, В. М. Молчанов, И. В. Судакова, И. В. Павличенко. *Электрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16-21.
7. Левонюк В. Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних електромагнітних процесів в елементах електроенер-

гетичних систем. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 155-161.

8. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей / В. В. Золотарев, В. П. Карпушенко, А. А. Науменко, С. В. Бузько. *Физические и компьютерные технологии: тр. 12 Междунар. науч.-техн. конф. Харьков: ХНПК «ФЭД»*, 2006. С. 239-240.

9. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу / А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, І. М. Дробот, А. Ф. Герман. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 30-35.

10. Основи електропостачання агропромислового комплексу: навч. посіб. / Б. В. Дурняк, В. О. Чумакевич, І. М. Лях, А. М. Яцун. Львів: Укр. акад. друкарства, 2017. 544 с.

11. Стабілізація напруги вузла електричного навантаження за допомогою двоопераційних тиристорів / А. Чабан, Є. Федів, О. Сівакова, І. Дробот. *Вісник Львівського національного університету природокористування: агроінженерні дослідження*. 2022. № 26. С. 101-108.

12. Чабан А., Левонюк В. Аналіз неусталених електромагнітних процесів у фрагменті електроенергетичної системи на основі класичних підходів до моделювання. *Вісник Львівського національного аграрного універси*

тету: агроінженерні дослідження. 2017. № 21\_С. 167-177.

13. Шестеренко В. Є. Системи ефект-роспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник. Вінниця: Нова кн., 2004. 656 с.

14. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. *Техн. електродинаміка*. 2013. № 1. С. 9-15.

15. An application of the Hamilton-Ostrogradsky principle to the modeling of an asymmetrically loaded three-phase power line / A. Chaban, M. Lis, A. Szafraniec, V. Levoniuk. *Energies*. 2022. Vol. 15, issue 21. P. 8255 – 8273. doi: org/10.3390/en15218255.

16. Including shield wires in the analysis of transient processes occurring in HVAC transmission lines / A. Chaban, A. Popenda, A.

Szafraniec, V. Levoniuk. *Energies*. 2023. Vol. 16, issue 23. P. 7870-7889. doi: 10.3390/en16237870.

17. Mathematical Modelling of Transient Processes in a Three Phase Electric Power System for a Single Phase Short-Circuit / A. Chaban, M. Lis, A. Szafraniec, V. Levoniuk. *Energies*. 2022. Vol. 15, issue 3. P. 1126-1143. doi: 10.3390/en15031126.

18. Mathematical Modeling of Transient Processes in the Susceptible Motion Transmission in a Ship Propulsion System Containing a Shaft Synchronous Generator / A. Chaban, T. Perzyński, A. Popenda, R. Figura, V. Levoniuk. *Energies*. 2022. Vol. 15, issue 9. P. 3266-3274.

19. Perzynski T., Levoniuk V., Figura R. Transient Electromagnetic Processes Analysis in High Voltage Transmission Lines during Two-Phase Short Circuits. *Sensors*. 2023. No 1. P. 298. doi: 10.3390/s23010298.

*Стаття надійшла 15.07.2024*

УДК 593.3

**ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЗМІНИ СТУПЕНЯ СТИСКУ  
В БЕЗШАТУННОМУ ДВИГУНІ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

*Тетяна Колеснікова<sup>1</sup>, к. т. н., Олександр Лиходій<sup>1</sup>, к. т. н.,  
Тетяна Махоркіна<sup>2</sup>, к. ф.-м. н.*

*<sup>1</sup>Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,  
вул. Чернишевського 24 а, м. Дніпро, Україна,  
e-mail: [tnk1403@ukr.net](mailto:tnk1403@ukr.net)*

*<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Львівська обл., Україна,  
e-mail: [mechanic@ua.fm](mailto:mechanic@ua.fm)*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.107>

**Колеснікова Т., Лиходій О., Махоркіна Т. Теоретичні дослідження механізму зміни ступеня стиску в безшатунному двигуні внутрішнього згоряння**

Встановлено, що одним із напрямків поліпшення економічних і екологічних показників двигунів внутрішнього згоряння є регулювання ступеня стиску на часткових режимах роботи двигуна. Для цього було проведено аналітичний огляд робіт із застосування змінного ступеня стиску в бензинових двигунах.

За результатами огляду й аналізу робіт зі створення двигунів зі змінним ступенем стиску встановлено, що поліпшити економічні й одночасно токсичні показники бензинового двигуна можливо удосконалюванням процесу згоряння на часткових режимах шляхом регулювання ступеня стиску. Також встановлено, що перспективною конструкцією двигуна зі змінним ступенем стиску є безшатульний поршневий двигун із кривошипно-кулісним силовим механізмом. У цьому двигуні, на відміну від відомих нетрадиційних двигунів, ефективний К.К.Д. має тенденцію підвищуватися при збільшенні ступеня стиску вище 14, завдяки меншій залежності механічного коефіцієнта корисної дії від навантаження і частоти обертання. Крім того, у безшатунному двигуні внутрішнього згоряння простіше й ефективніше реалізується зміна ступеня стиску, що в цілому підвищує показники двигуна.

Відомо, що зразки двигунів зі змінним ступенем стиску мають невелику швидкість механізму зміни ступеня стиску. Це призводить до значного часу роботи двигуна з ознаками детонації і знижує його надійність і довговічність. Отож, дослідження впливу конструкції механізму зміни ступеня стиску на швидкість зміни ступеня стиску залежне від параметрів робочого процесу – один із важливих напрямків наукової роботи по створенню двигуна зі змінним ступенем стиску. Досліджено вплив режиму роботи двигуна на швидкодію механізму зміни ступеня стиску, розроблена математична модель розрахунку часу спрацьовування механізму, розроблено методику вибору раціональних параметрів перерізу гідрозамків механізму. Наведені результати теоретичного та експериментального дослідження механізму зміни ступеня стиску для бензинового чотиритактного двигуна.

**Ключові слова:** безшатульний двигун, змінний ступінь стиску, механізм зміни ступеня стиску, гідрозамки, дослідження, розрахунки.

**Kolesnikova T., Lykhodii O., Makhorkina T. Theoretical research of the variable compression ratio mechanism in the rodless internal combustion engine**

It has been established that one of the ways to improve the economic and environmental performance of internal combustion engines is to regulate the compression ratio in partial engine operation modes. To explore this, an analytical review of studies on the application of variable compression ratios in gasoline engines was conducted.

The review and analysis of the research on developing engines with variable compression ratios revealed that it is possible to improve both the economic and emission characteristics of gasoline engines by enhancing the combustion process during partial load operations through compression ratio regulation. Additionally, it was found that a promising design of an engine with a variable compression ratio is the connecting rod-free piston engine with a crank-slider power mechanism. In this engine, unlike other unconventional engines, the effective efficiency tends to increase as the compression ratio exceeds 14, thanks to the reduced dependency of the mechanical efficiency coefficient on load and rotation speed. Furthermore, in a connecting rod-free internal combustion engine, the implementation of compression ratio variation is simpler and more efficient, improving engine performance.

It is known that existing samples of engines with variable compression ratios have a low response speed of the compression ratio adjustment mechanism. This results in a significant amount of engine operation time under detonation conditions, reducing its reliability and durability. Therefore, studying the effect of the compression ratio adjustment mechanism design on the speed of compression ratio change depending on the parameters of the working

process is a crucial area of research for developing engines with variable compression ratios. The study theoretically examined the impact of engine operating modes on the response time of the compression ratio adjustment mechanism. A mathematical model was developed to calculate the activation time of the mechanism, along with a methodology for selecting rational cross-sectional parameters of the hydraulic locks in the mechanism. The results of theoretical and experimental investigations of the compression ratio adjustment mechanism for a four-stroke gasoline engine are presented.

**Keywords:** rodless engine, variable compression ratio, mechanism of compression ratio variation, hydraulic locks, research, calculations.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах світової економічної кризи питання раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів набуває нових обертів. Екологічна ситуація у світі, а зокрема і в нашій країні, вимагає бажати кращого. Саме тому перед інженерами-двигунобудівниками ставиться за мету створення двигуна, який би поєднував у собі високу економічність разом із низьким рівнем викидів забруднюючих речовин. Україна займає одне з перших місць у світі за рівнем забруднення навколишнього середовища, проте не має достатньої кількості власних енергоресурсів, тому питання збереження навколишнього середовища та ресурсозбереження є для неї особливо актуальними.

У зв'язку з цим протягом останніх десятиліть двигунобудівництво вирішує два основні завдання: підвищення паливної економічності двигунів і зниження токсичності відпрацьованих газів. До виконання цих завдань не можна підходити роздільно, тому що зниження питомої витрати палива призводить здебільшого до відповідного зниження питомих викидів токсичних речовин.

Підвищення рівня технології виробництва в двигунобудівництві дозволило домогтися значного зниження витрати палива. Однак шляхи підвищення економічності, зниження токсичності і поліпшення інших питомих показників класичних поршневих двигунів практично вичерпані. Подальший розвиток ДВЗ, ймовірно, буде пов'язаний із принциповими змінами в конструкції двигунів. Це підтверджують останні розробки і результати досліджень ведучих фірм і організацій у сфері двигунобудівництва (Mitsubishi Motors, DaimlerChrysler, Toyota, Saab, Orbital тощо).

Одним із напрямків поліпшення економічних і екологічних показників ДВЗ є регулювання ступеня стиску ( $\epsilon$ ) на часткових режимах роботи двигуна. Очевидно, що найперспективніше застосування ДВЗ зі змінним ступенем стиску доцільно на автомобілях, що постійно експлуатуються в міських умовах, де їхні двигуни відносно нещодавно працюють з повним навантаженням.

Метою роботи є дослідження механізму зміни ступеня стиску (МЗСС) в безшатунному двигуні з визначенням шляхів забезпечення

ефективної динаміки спрацьовування механізму зміни ступеня стиску. Одним із основних критеріїв оцінки слід вважати швидкість спрацьовування механізму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За результатами огляду й аналізу робіт [1-8] зі створення двигунів з перемінним ступенем стиску можна дійти таких висновків:

а) поліпшити економічні й одночасно токсичні показники бензинового двигуна можливо удосконалюванням процесу згорання на часткових режимах шляхом регулювання ступеня стиску. У такому разі розширюються межі ефективного збіднення суміші і поліпшується робота двигуна на холостому ході і малих навантаженнях;

б) перспективною конструкцією двигуна зі змінним ступенем стиску є безшатунний поршневий ДВЗ із кривошипно-кулісним силовим механізмом. У цьому двигуні, на відміну від відомих нетрадиційних ДВЗ, ефективний к.к.д. має тенденцію підвищуватися при збільшенні ступеня стиску вище 14, завдяки меншій залежності механічного к.к.д. від навантаження і частоти обертання. Крім того, у безшатунному ДВЗ простіше й ефективніше реалізується зміна ступеня стиску, що в цілому підвищує показники двигуна;

в) наявні зразки двигунів мають невелику швидкість зміни ступеня стиску. Це призводить до значного часу роботи двигуна з ознаками детонації і знижує його надійність і довговічність. Отже, дослідження впливу конструкції механізму зміни ступеня стиску на швидкість зміни  $\epsilon$  залежно від параметрів робочого процесу – один із важливих напрямків наукової роботи зі створення двигуна з  $\epsilon$  = var.

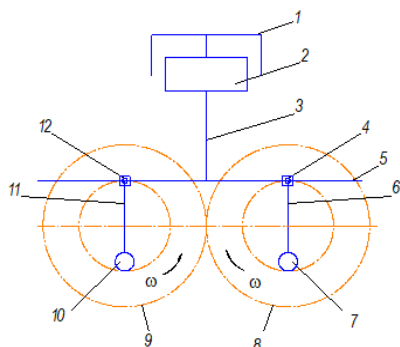
У більшості конструкцій ДВЗ із змінним ступенем стиску максимальне значення  $\epsilon_x$ , що забезпечує найкращі показники двигуна, перебуває в межах від 12 до 14. При подальшому збільшенні ступеня стиску індикаторний к.к.д. вже не в змозі компенсувати зростання втрат на тертя й ефективний к.к.д. у результаті цього не підвищується й навіть знижується.

Одним із можливих конструктивних варіантів двигуна, що забезпечує реалізацію змінного ступеня стиску, є безшатунний ДВЗ (рис. 1), у якому замість звичайного кривошипно-ша-

тунного механізму застосовується кривошипно-кулісний механізм [9].

У безштанному двигуні механізм перетворення зворотно-поступального руху поршня в обертальний рух вала містить два колінчасті вали: силовий 6 і допоміжний 11 із встановленими противагами 7 і 10. Вали з'єднані між собою за допомогою двох циліндричних шестерень 8 і 9, що перебувають у зачепленні. На кривошипних шийках колінчастих валів посаджені повзуни 4 і 12, що рухаються по напрямних куліси 5, яка за допомогою штоку 3 з'єднана з поршнем 1. Між поршнем та кулісою встановлено механізм зміни ступеня стиску 2. Кривошипи силового і допоміжного валів розташовані під кутом  $180^\circ$ . Відмінною рисою схеми двигунів із кривошипно-кулісним механізмом є малі втрати на тертя у всьому діапазоні навантажень і частоти обертання, повна динамічна зрівноваженість і рівномірність ходу, а також компактність і мала питома маса. Ці переваги пов'язані з тим, що в безштанному двигуні поршні здійснюють виключно прямолінійний рух, у зв'язку з чим бічні навантаження на них відсутні.

У двигуні робочий процес здійснюється, як у звичайному чотиритактному бензиновому ДВЗ. Аналіз безштанного двигуна з кривошипно-кулісним механізмом показує, що в цьому двигуні, крім можливості підвищення ефективного к.к.д. при  $\epsilon > 14$  через малі механічні втрати, конструктивно простіше реалізується змінний ступінь стиску.



**Рис. 1.** Схема безштанного ДВЗ зі змінним ступенем стиску:

- 1 – поршень; 2 – механізм зміни ступеня стиску;  
3 – шток; 4, 12 – повзуни; 5 – куліса;  
6 – силовий колінчастий вал; 7, 10 – противаги; 8,  
9 – циліндричні шестерні;  
11 – допоміжний колінчастий вал

**Fig. 1.** The scheme of a rodless internal combustion engine with variable compression ratio:

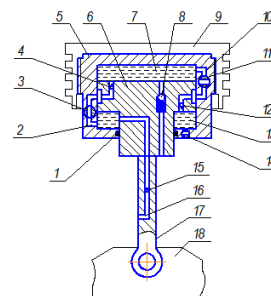
- 1 – piston; 2 – variable compression mechanism; 3 – rod; 4, 12 – sliders; 5 – cam; 6 – power crankshaft; 7, 10 – counterweights; 8, 9 – cylindrical gears; 11 – auxiliary crankshaft

**Постановка завдання.** Наше завдання – удосконалення МЗСС шляхом визначення його

раціональних параметрів та встановлення їхнього впливу на швидкодію механізму при різних режимах роботи двигуна. Очевидно, що виконати завдання можна, враховуючи гідравлічні процеси в механізмі зміни ступеня стиску та вплив показників двигуна на різних режимах роботи на швидкість зміни ступеня стиску.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що найчастіше отримані в результаті експериментів дані можуть бути застосовані тільки для двигунів, що мають аналогічний типорозмір, подібну конструкцію, той же спосіб сумішоутворення тощо. Отже, очевидно, що методика розрахунку двигуна має спиратися на загальні закономірності і мати можливість легко адаптуватися для конкретного двигуна з урахуванням характерних його показників на номінальному режимі роботи. Конструктивна схема механізму зміни ступеня стиску представлена на рис. 2. Оскільки в поршні містяться масляні канали, в яких є масло, це призводить до збільшення інерційних сил. Щоб зменшити інерційні сили, поршень роблять меншим за висотою, обрізаючи до кілець. Температура олії в поршні відповідає температурі рідини, що охолоджує, і становить близько  $90^\circ\text{C}$ .

Переміщення рухомого корпусу (рис. 3.) відбувається під дією прикладених до нього газових  $\Delta P_{\Gamma}$  та інерційних сил  $P_{j\Sigma}$ , а також сил тертя між поршневыми кільцями і стінками циліндру  $P_{\text{тр.к}}$  та тиску масла  $P_{\text{М}}$ .

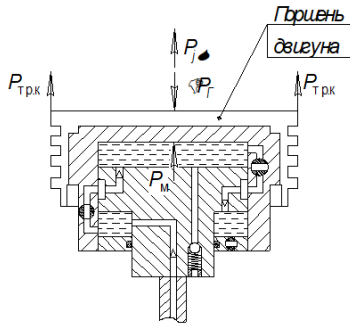


**Рис. 2.** Конструктивна схема механізму зміни ступеня стиску:

- 1 – ущільнення; 2; 10; 16 – масляні канали; 3; 11;  
14 – гідрозамки;  
4; 12; 15 – зворотні клапани; 5 – рухомий корпус;  
6 – поршень; 7; 13 – відповідно верхня та нижня масляні порожнини; 8 – запобіжний клапан; 9 – поршень двигуна; 17 – шток;  
18 – куліса

**Fig. 2.** Constructive scheme of the compression ratio change mechanism:

- 1 – seal; 2; 10; 16 – oil channels; 3; 11 – hydrolocks; 4; 12; 15 – check valves; 5 – movable body; 6 – piston; 7; 13 – upper and lower oil cavities respectively; 8 – safety valve; 9 – engine piston; 17 – rod; 18 – slide



**Рис. 3.** Схема сил, що діють у механізмі зміни ступеня стиску

**Fig. 3.** Diagram of forces acting in the mechanism of compression ratio adjustment

При появі детонаційного згоряння в циліндрі двигуна сигнал від датчика детонації надходить на механізм керування МЗСС. Це призводить до повороту гідрозамків 3 і 11 (див. рис. 2). Після чого під дією сили  $\Delta P_{\Gamma}$  (рис. 3) поршень двигуна разом із рухомих корпусом механізму переміщується вниз, тим самим зменшуючи ступінь стиску доти, доки гідрозамки не повернуться в початкове положення (положення на рис. 2). Цикл повторюється.

Зміна ступеня стиску відбувається в послідовних циклах двигуна поки не відбудеться силове замикання між корпусом та рухомих стаканом за допомогою гідрозамків за командою сигналу від датчика детонації.

**Розрахунок часу спрацьовування МЗСС ілюстровано на рис. 4.**

Час спрацьовування МЗСС  $t$  можна визначити за залежністю:

$$t = \frac{\Delta S_c}{v_{\text{мех}}}, \quad (1)$$

де  $\Delta S_c$  – відносне переміщення рухомого корпусу МЗСС або, як слідство, зміна висоти камери згоряння двигуна;

$v_{\text{мех}}$  – середня швидкість переміщення рухомого корпусу МЗСС, зв'язаного з поршнем двигуна, відносно частин МЗСС, прикріплених до штоку ККМ.

Поточне значення ступеня стиску, тобто значення між тим, що встановлюється заводом-виробником, та оптимальним значенням для даного режиму роботи двигуна, буде дорівнювати

$$\varepsilon_x = \frac{V_h + V_c}{V_h}, \quad (2)$$

де  $V_h$  – робочий об'єм циліндра, м<sup>3</sup>;

$V_c$  – об'єм камери згоряння, м<sup>3</sup>.

Робочий об'єм циліндра

$$V_h = F_{\text{п.д}} S_h, \quad (3)$$

де  $S_h$  – повний хід поршня двигуна, м;

$F_{\text{п.д}}$  – площа поршня двигуна, м<sup>2</sup>.

Об'єм камери згоряння

$$V_c = F_{\text{п.д}} S_c, \quad (4)$$

де  $S_c$  – еквівалентна висота камери згоряння, м.

Беручи до уваги всі наведені залежності, можна визначити швидкість зміни ступеня стиску за секунду  $v_{\varepsilon c}$

$$v_{\varepsilon c} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t}, \quad (5)$$

або з урахуванням (2)

$$v_{\varepsilon c} = \frac{\frac{V_h + V_{c2}}{V_h} - \frac{V_h + V_{c1}}{V_h}}{t} = \frac{V_{c2} - V_{c1}}{t V_h} \quad (6)$$

Враховуючи, що

$$\Delta S_c = \frac{V_{c2} - V_{c1}}{F_{\text{п.д}}} \quad (7)$$

та формулу (1), отримуємо

$$v_{\varepsilon c} = \frac{v_{\text{мех}}}{S}. \quad (8)$$

Також дуже важливим оцінювальним параметром МЗСС є швидкість зміни ступеня стиску за цикл  $v_{\varepsilon \text{ц}}$ . Як відомо, один цикл у чотиритактному двигуні відбувається за два оберти колінчастого вала, тож:

$$v_{\varepsilon \text{ц}} = \frac{720 v_{\varepsilon c}}{n}, \quad (9)$$

де  $n = 5400$  – частота обертання колінчастого вала двигуна, хв<sup>-1</sup>.

Отже, для отримання часу спрацьовування МЗСС необхідно визначити швидкість переміщення рухомого корпусу  $v_{\text{мех}}$  на величину  $\Delta S_c$ . Для вирішення цієї задачі було складено рівняння руху МЗСС, яке є рівнянням другого закону Ньютона у диференціальній формі і складене з урахуванням газових сил з боку двигуна, сил інерції, сил тертя поршневого кілець та гумових ущільнень механізму, а також гідравлічних втрат у гідрозамках, клапанах та каналах механізму

$$m_M \frac{d}{dt} v_{\text{мех}} = \Delta P_{\Gamma} + P_{j\Sigma} + P_{\Gamma} - P_{\text{тр.к}} - P_{\text{гидр}} - P_{\text{тр.у}}, \quad (10)$$

де  $m_M$  – маса рухомої частини механізму, кг;

$\Delta P_{\Gamma}$  – сила тиску газів у циліндрі двигуна, Н;

$P_{j\Sigma}$  – сумарна сила інерції механізму, Н;

$P_T$  – сила тяжіння рухомої частини механізму, Н;

$P_{Tr.k}$  – сила тертя поршневих кілець, Н;

$P_{гидр}$  – сила, що характеризує гідравлічні втрати в механізмі, Н;

$P_{Tr.y}$  – сила тертя в ущільненнях механізму, Н.

Маса рухомої частини механізму

$$m_M = m_{П} + m_{К} + m_{КМ} + m_{КР} + m_{Г} + m_{П.В} \quad (11)$$

де  $m_{П}$  – маса поршня двигуна, кг;

$m_{К}$  – маса поршневих кілець, кг;

$m_{КМ}$  – маса рухомого корпусу механізму, кг;

$m_{КР}$  – маса кришки, кг;

$m_{Г}$  – маса гайки, кг;

$m_{П.В}$  – маса поворотної втулки, кг.

Силу тиску газів знаходять за відомою з курсу ДВЗ залежністю [10] з використанням розгорнутої індикаторної діаграми

$$\Delta P_{Г} = (P_{Г} - P_{0}) F_{П.д}, \quad (12)$$

де  $P_{Г}$  – тиск газів в циліндрі двигуна у довільний проміжок часу, МПа;

$P_{0}$  – атмосферний тиск, МПа.

Сила тиску газів  $\Delta P_{Г}$  враховує вплив таких факторів:

- а) параметри навколишнього середовища;
- б) ступінь стиску;
- в) режим роботи двигуна.

Сумарна сила інерції  $P_{j\Sigma}$  складається з

сили інерції від маси рухомої частини механізму та сили інерції від масла в механізмі

$$P_{j\Sigma} = P_{jM} + P_{jмас}, \quad (13)$$

де  $P_{jM}$  – сила інерції від рухомих мас МЗСС, Н;

$P_{jмас}$  – сила інерції від масла в МЗСС, Н.

Для класичного двигуна, сила інерції від мас, що здійснюють зворотно-поступальний рух, має вигляд [10]

$$P_{jM} = -m_M j = -m_M R \omega^2 (\cos \varphi + \lambda \cos 2\varphi). \quad (14)$$

Конструктивні особливості безштанного двигуна обумовлюють значення  $\lambda = R/L = \infty$ , тому вираз (14) набуває вигляду:

$$P_{jM} = -m_M R \omega^2 \cos \varphi, \quad (15)$$

де  $R$  – радіус кривошипу, м;

$\omega$  – кутова швидкість колінчастого вала, с-1;

$\varphi$  – кут повороту кривошипа, град.

На рис. 5 наведений графік сили інерції

$$P_{jM} = f(\varphi).$$

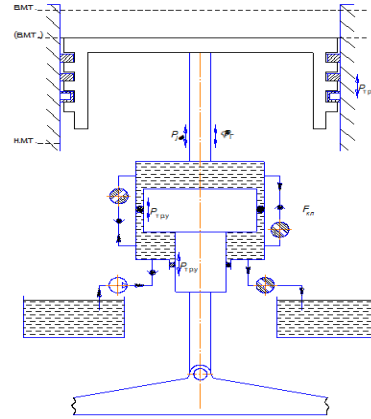
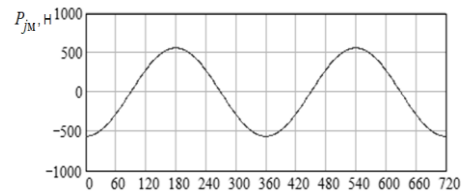


Рис. 4. Схема до розрахунку МЗСС

Fig. 4. Scheme for the calculation of the compression ratio adjustment mechanism



Ф. П. К. В.

Рис. 5. Залежність сили інерції рухомих частин МЗСС  $P_{jM}$

від кута повороту колінчастого вала  $\varphi$

Fig. 5. Dependence of the inertia force of the moving parts of the compression ratio adjustment mechanism  $P_{jM}$  on the crankshaft rotation angle  $\varphi$

Вираз для визначення сили інерції від масла в механізмі складено до аналогії з (15)

$$P_{jмас} = -(m_{M.H} + m_{M.B}) R \omega^2 \cos \varphi, \quad (16)$$

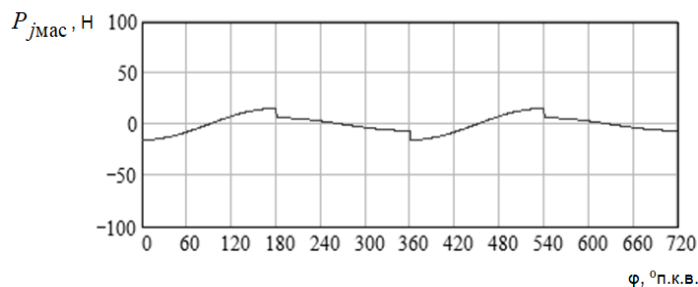
де  $m_{M.H}$ ,  $m_{M.B}$  – маса масла відповідно в нижній та верхній порожнині механізму, кг.

При прямому ході  $m_{M.H} = 0$ , а при зворотному  $m_{M.B} = 0$ . Виходячи з того, що об'єм верхньої та нижньої порожнин механізму змінюється при переміщенні рухомого корпусу механізму, можна дійти висновку, що кількість масла в

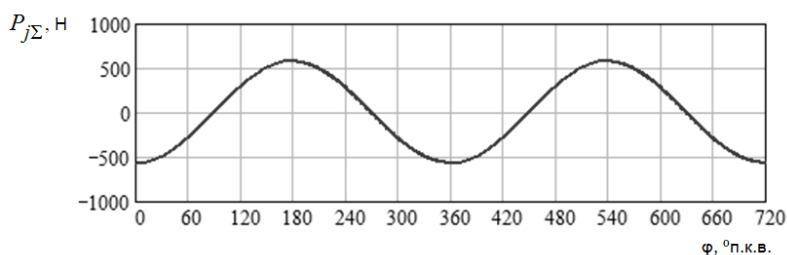
порожнинах змінюється за такими виразами

$$m_{M.B} = f(x), \quad m_{M.H} = f(x).$$

На рис 6 і 7 представлені графіки сил інерції  $P_{jмас} = f(\varphi)$  та  $P_{j\Sigma} = f(\varphi)$ .



**Рис. 6.** Залежність сили інерції масла в МЗСС від кута повороту колінчастого вала  $\varphi$   
**Fig. 6.** Dependence of the inertia force of the oil in the compression ratio adjustment mechanism on the crankshaft rotation angle  $\varphi$



**Рис. 7.** Залежність сумарної сили інерції від кута повороту колінчастого вала  $\varphi$   
**Fig. 7.** Dependence of the total inertia force on the crankshaft rotation angle  $\varphi$

Для визначення кількості мастила в кожній порожнині механізму будемо використовувати такі залежності:

для верхньої –

$$m_{\text{м.в}}(x) = \left( \frac{\pi D_{\text{п.м}}^2}{4} x + \Delta V_{\text{в}} \right) \rho_{\text{м}}, \quad (17)$$

де  $D_{\text{п.м}}$  – діаметр поршня механізму, м;

$\Delta V_{\text{в}}$  – залишковий об'єм масла в верхній порожнині МЗСС, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{м}}$  – густина масла, кг/м<sup>3</sup>;

для нижньої –

$$m_{\text{м.н}}(x) = \left( \frac{\pi (D_{\text{п.м}}^2 - d_{\text{вт}}^2)}{4} (\Delta S_{\text{с}} - x) + \Delta V_{\text{н}} \right) \rho_{\text{м}}, \quad (18)$$

де  $d_{\text{вт}}$  – діаметр втулки механізму, м;

$\Delta V_{\text{н}}$  – залишковий об'єм масла в нижній порожнині МЗСС, м<sup>3</sup>.

Формула для визначення сили тертя комплекту поршневих кілець [11] дозволяє врахувати швидкість поршня, тиск газів, температуру масла та розмір циліндра.

$$P_{\text{тр.к}} = \left( -\text{sign}(v) c_1 \sqrt{|v|} \right) \left( 1 - c_2 \frac{t - t_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}}} \right) \left( 1 + c_3 \frac{p_2 - p_0 + \sigma - \sigma_{\text{пр}}}{p_0} \right) \left( \frac{d}{d_{\text{пр}}} \right)^2, \quad (19)$$

де  $c$  – сталі коефіцієнти, значення яких, згідно з [20],  $c_1 = 28$ ,  $c_2 = 0,25$ ,  $c_3 = 0,3$  при  $v < 0$  і  $c_3 = 0,15$  при  $v > 0$ ;

$v$  – швидкість поршня, м/с;

$t_{\text{пр}}$  – приведена температура, °С. Згідно з [16]  $t_{\text{пр}} = 40$  °С;

$t$  – температура стінки циліндра, °С;

$\sigma$  – радіальна напруга кільця, МПа;

$\sigma_{\text{пр}}$  – приведена радіальна напруга кільця, МПа. Згідно з [16]  $\sigma_{\text{пр}} = 0,1$  МПа;



$d_{пр}$  – приведений діаметр циліндра, мм. Згідно з [11]  $d_{пр} = 165$  мм.

У двигуна з кривошипно-шатунним механізмом швидкість переміщення поршня є величиною змінною і при постійній частоті обертання колінчастого вала залежить тільки від зміни кута повороту кривошипу та відношення  $\lambda = R / L$  [10]

$$v = \omega R \left( \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \right). \quad (20)$$

Але враховуючи зауваження щодо конструктивних особливостей безшатунного двигуна, вираз (20) в нашому випадку матиме вигляд

$$v = R \omega \sin \varphi. \quad (21)$$

На рис. 8 показано графік швидкості поршня в безшатунному двигуні.

Із теоретичних і експериментальних досліджень теплообміну у ДВЗ бачимо, що температура поверхні робочої порожнини циліндра істотно змінюється за висотою дзеркала циліндра. Різниця в значеннях температури поверхні циліндра у верхній частині (у районі в.м.т.) і нижньої частини (у

районі в.м.т.) становить від 330 К [16] до 415 К [16; 20].

У математичній моделі, що розглядається, враховується розподіл температури за висотою циліндра, або, що те ж саме, по ходу поршня, яка може бути визначена за емпіричною формулою, отриманою шляхом апроксимації експериментальних даних по ряду двигунів [12-14; 17]

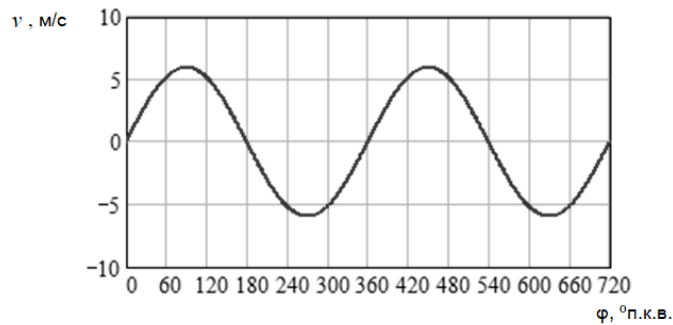
$$T_{цн}(\varphi) = T_{вмт} - (T_{вмт} - T_{нмт}) (\bar{s}(\varphi))^{\frac{1}{z}}, \quad (22)$$

де  $T_{цн}$  – температура по висоті циліндра, К;

$T_{вмт}$  – температура стінки циліндра в районі верхньої мертвої точки, К;

$T_{нмт}$  – температура стінки циліндра в районі нижньої мертвої точки, К;

$z$  – емпіричний показник ступеню. Приймається згідно з емпіричними даними  $z = 2,8$ ;



**Рис. 8.** Залежність швидкості поршня безшатунного двигуна від кута повороту колінчастого вала φ  
**Fig. 8.** Dependence of the piston speed in the rodless engine on the crankshaft rotation angle φ

$\bar{s}$  – відносне переміщення поршня, яке визначається як

$$\bar{s} = s / S_h, \quad (23)$$

де  $s$  – поточне переміщення поршня, мм; визначається за відомим рівнянням

$$s = 0,5 S_h \sigma(\varphi), \quad (24)$$

де  $\sigma(\varphi)$  – кінематична функція переміщення поршня, що для різних типів двигунів має свій вигляд. Наприклад:

для класичного двигуна з КШМ [10; 19]

$$\sigma(\varphi) = 1 + \frac{\lambda}{4} - \left( \cos \varphi + \frac{\lambda}{4} \cos 2\varphi \right); \quad (25)$$

для безшатунного двигуна з ККМ

$$\sigma(\varphi) = 1 - \cos \varphi; \quad (26)$$

для двигуна GoEngine

$$\sigma(\varphi) = 1 - \cos \varphi + \frac{1}{\lambda} (\cos \alpha - \cos \beta) - \sin x, \quad (27)$$

де  $\varphi$  – поточний кут повороту колінчастого вала, відлічуваний від в.м.т.

З урахуванням (24) вираз (23) набуде вигляду

$$\bar{s} = 0,5\sigma(\varphi) \quad (28)$$

Осереднену температуру циліндра  $T_{ц}$  по переміщенню поршня  $S(\square)$  можна визначити, користуючись рівняннями (29) та рис. 9.

$$\left. \begin{aligned} T_{ц} &= \frac{1}{\varphi} \int_0^{\varphi} T_{цн}(\varphi) d\varphi, \quad 0 < \varphi \leq 180^\circ; \\ T_{ц} &= \frac{1}{360^\circ - \varphi} \int_{\varphi}^{360^\circ} T_{цн}(\varphi) d\varphi, \quad 180^\circ \leq \varphi < 360^\circ; \\ T_{ц} &= \frac{1}{\varphi - 360^\circ} \int_{360^\circ}^{\varphi} T_{цн}(\varphi) d\varphi, \quad 360^\circ \leq \varphi < 540^\circ; \\ T_{ц} &= \frac{1}{720^\circ - \varphi} \int_{\varphi}^{720^\circ} T_{цн}(\varphi) d\varphi, \quad 540^\circ \leq \varphi < 720^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

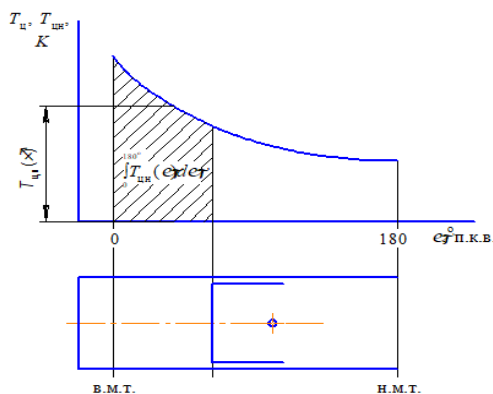


Рис. 9. До визначення середньоінтегральної температури  $T_{ц}$  робочої поверхні дзеркала циліндра залежно від кута повороту колінчастого вала  $\varphi$

Fig. 9. Determining the average integral temperature  $T_{ц}$  of the working surface

Як бачимо, величина  $T_{ц}$  – середньоінтегральна температура поверхні дзеркала циліндра при поточному робочому об'ємі циліндра.

Сила гідравлічних втрат  $P_{гидр}$  враховує втрати на перетікання масла через канали  $P_{кан}$ , зворотні клапани  $P_{кл}$  і гідрозамки  $P_{гз}$ , що виникають при русі масла у корпусі механізму

$$P_{гидр} = \rho g a_i Q_i^2 F_{п.м}, \quad (30)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/s^2$ ;  
 $a_i$  – гідравлічний опір прямого або зворотного каналів,  $s^2/m^5$ ;

$Q_i$  – витрата масла при прямому або зворотному русі корпуса механізму,  $m^3/s$ ;

$F_{п.м}$  – активна площа поршня механізму,  $m^2$ .

Гідравлічний опір прямого й зворотного каналів визначається за формулами Дарсі [15]

$$a_{пр} = \left( \lambda \frac{l_{пр}}{d_{пр}} + \xi_{пр} \right) \frac{8}{\pi^2 d_{пр}^4 g}; \quad (31)$$

$$a_{зв} = \left( \lambda \frac{l_{зв}}{d_{зв}} + \xi_{зв} \right) \frac{8}{\pi^2 d_{зв}^4 g}, \quad (32)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт Дарсі, що характеризує опір за довжиною каналу;

$l_{пр}$ ,  $l_{зв}$  – довжина каналу відповідно при прямому й зворотному ході, м;

$d_{пр}$ ,  $d_{зв}$  – діаметр каналу відповідно при прямому й зворотному ході, м;

$\xi_{пр}$ ,  $\xi_{зв}$  – сумарний коефіцієнт місцевих опорів при прямому й зворотному ході.

Коефіцієнт враховує втрати тиску при зміні діаметра каналів, поворот каналів, наявність клапанів і гідрозамків. Канали в механізмі при прямому і зворотному ході мають досить велику кількість опорів, але між ними мала відстань ( $l < 20d$ ) і принцип накладення втрат тут застосовувати не можна. Тому сумарні опори прямого й зворотного каналу були визначені експериментально на безмоторній установці.

Визначаємо витрату масла: для прямого ходу:

$$Q_{пр} = F_{п.д} v_{мех}; \quad (33)$$

для зворотного ходу

$$Q_{зв} = (F_{п.м} - F_{штг}) v_{мех}, \quad (34)$$

де  $F_{\text{ШТ}}$  – площа штока поршня двигуна, м<sup>2</sup>.

Сила тертя гумових ущільнень при русі корпусу механізму визначається за формулою

$$P_{\text{тр.у}} = \mu \text{sign}(v_{\text{мех}}) (|p_1 - p_2| F_{\text{тр1}} + p_2 F_{\text{тр2}}), \quad (35)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя пари сталь-гума в маслі.

Приймаємо згідно з [15] при  $v_{\text{мех}} = 0$   $\mu = 0,4$ , а в інших випадках –  $\mu = 0,15$ ;

$p_1, p_2$  – тиск відповідно у верхній та нижній порожнині механізму, МПа;

$F_{\text{тр1}}, F_{\text{тр2}}$  – площі ущільнювальних кілець, м<sup>2</sup>;

$$F_{\text{три}} = \pi d_i h_i, \quad (36)$$

де  $d_i$  – діаметр і-того ущільнювального кільця, м;

$h_i$  – висота і-того ущільнювального кільця, м.

Тиск у верхній порожнині механізму залежить від тиску в циліндрі двигуна, сил інерції та від відношення площі поршня двигуна до площі поршня механізму

$$p_1 = (\Delta P_{\Gamma} + P_{\Sigma j}) \frac{F_{\text{п.д.}}}{F_{\text{п.м.}}} \quad (37)$$

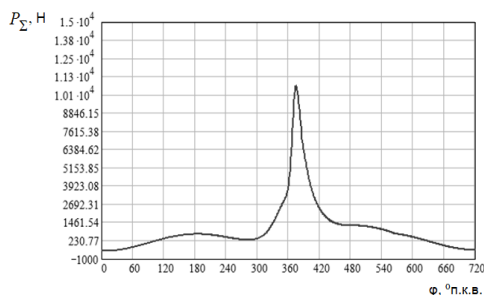
Тиск у нижній порожнині при прямому ході вище тиску в картері двигуна на величину, обумовлену швидкістю переміщення корпусу механізму

$$p_2 = f(v_{\text{мех}}). \quad (38)$$

Сумарна розрахункова сила

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{\Gamma} + P_{\Sigma j} + P_{\text{т}} - P_{\text{тр.к}} - P_{\text{гдр}} - P_{\text{тр.у}}. \quad (39)$$

Вигляд залежності сумарної сили від кута повороту колінчастого вала показаний на рис. 10.



**Рис. 10.** Залежність сумарної сили від кута повороту колінчастого вала  $\varphi$

**Fig. 10.** Dependence of the total force on the crankshaft rotation angle  $\varphi$

**Висновки.** У результаті проведених теоретичних досліджень механізму зміни ступеня стиску отримані такі результати:

1. Отримано залежності, які зв'язують швидкість зміни ступеня стиску з параметрами робочого процесу двигуна;

2. Розроблено методика розрахунку швидкості зміни ступеня стиску в циліндрі чотиритактного бензинового двигуна на часткових режимах роботи;

3. Отримані аналітичні залежності дозволяють відстежити вплив основних параметрів роботи двигуна з МЗСС на швидкість зміни ступеня стиску.

Розрахунок чотиритактного бензинового двигуна зі змінним ступенем стиску автоматизований за допомогою ПЕОМ. Програма розрахунку виконана в середовищі MathCAD і дозволяє легко модифікувати й удосконалити методику розрахунку.

### Бібліографічний список

1. «Saab Reveals Unique Engine Concept That Offers High Performance and Low Fuel Consumption.» Internet. 4 May 2001. URL: <http://www.saabnet.com/tsn/press/000318.html>.

2. Артюх О. М., Дударенко О. В., Кузьмін В. В. Транспортні енергетичні установки. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 264 с.

3. Махалдиани В. В., Эджибия И. Ф., Леонидзе А. М. Двигатели внутреннего сгорания с автоматическим регулированием степени сжатия. Тбилиси, Мецниереба, 1973. 272 с.

4. Pouliot H. N., Robinson C. W. and Delameter W. R. Variable- Displacement Spark-Ignition Engine Final Report. Report № SAND77-8299, Sandia Laboratories, Livermore, California, May 1978.

5. Crank-connecting rod mechanism; Lambertus Hendrik de Gooijer. Пат. В1 США. № 6349684; 26.02.2002.

6. Dispositif de transmission mecanique pour moteur a cylindree variable; Rabhi Vianney Пат. № 2786530 Франція. 19.01.2001. Бюл. № 01/03.

7. Шапко В. Ф. Автомобільні двигуни. Основи теорії та характеристики поршневих двигунів внутрішнього згорання. Харків: Точка, 2014. 148 с.

8. Variable compression ratio mechanism of reciprocating internal combustion engine. Пат. № 1170482, 2002.01.09.

9. Міщенко М. І., Супрун В. Л., Шляхов В. С. Розрахунково-експериментальні дослідження механізму зміни ступеня стиску для безшатуного чотиритактного двигуна. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2009. № 1. С. 80-83.

10. Дяченко В. Г. Двигуни внутрішнього згорання. Теорія. Харків: НТУ «ХПІ», 2008. 488 с.

11. Kornprobst H., Woschni G., Zeilingee K. Simulation des Kolben-Verhaltens in Motorbetrieb Teil 1. «*MTZ: Motortechn. Z.*» 1989. № 11. P. 528–533.
12. Woschni G. Experimentelle Untersuchung des Warmeflusses in Kolben und Zylinderbuchse eines Schnellaufender Dieselmotors. *MTZ*. 1978. № 12. 575–579.
13. Rulfs H. Internationale Entwicklungszarbeiten an Dieselmotoren-CIMAC-kongreß. *Hansa*. 1987. № 20. 1251–1252, 1254–1256, 129.
14. Lauseh W., Grunau P. On-line-Optimierung-eine Voraussetzung für den Entwicklungserfolg des Motors L 40/50 von MAN - B&W. *MTZ: Motortechn. Z.* 1988. № 11. P. 451–456.
15. Федоров В. Г., Мамелюк Н. С., Кепко О. І., Пушка О. С. Гідравліка і гідропривод. Умань: Видавничо-поліграфічний центр «Візаві», 2017. 135 с.
16. Kolesnikova T., Sakno O., Velmagina N., Lysyi O. Thermodynamic analysis of the conrod-free engine. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13, issue 3. – Silesian University of Technology Publishing House, Gliwice. P. 29–39. DOI: 10.20858/tp.2018.13.3.3.
17. Sakno O., Kolesnikova T., Mischenko N., Nikitchenko I. et al. Theoretical Research of the Mechanism for Compression Ratio Changing of the Conrod-Free Engine. SAE Technical Paper 2019-01-5011, 2019, ISSN 0148-7191.
18. Kolesnikova T., Mischenko N., Sakno O., Suprun, V., Filipova, G.A., Nikitchenko, I. Gorpyniuk, A., Nazarenko, M. Theoretical research response time of the mechanism for compression ratio changing of the conrod-free engine. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2019. No 104. P. 69–83.
19. Колеснікова Т. М., Лиходій О. С., Махоркіна Т. А., Шевчук В. В., Толстущко М. М. Перспективи застосування двигунів нетрадиційної конструкції. *Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки» №74 / Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2022. С. 14–20.*
20. Serrano J. R., Arnau F. J., Bares P., Gomez-Vilanova A., Garrido-Requena J., Luna-Blanca M. J., Contreras-Angueta F. J., *Analysis of a novel concept of 2-stroke rod-less opposed pistons engine (2S-ROPE). Testing, modelling, and forward potential. Applied Energy, Elsevier*. 2021. Vol. 282 (PA).

Стаття надійшла 12.04.2024

УДК 539.3.01

## РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНЬ У ПІВПЛОЩИНІ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ ПРИБРОЗТЯГУ ПІД КУТОМ ДО ПРЯМОЛІНІЙНОГО КРАЮ

*Олександр Пономаренко<sup>1</sup>, к. ф.-м. н., Віктор Семерак<sup>1</sup>, к. т. н.,  
Олексій Бурнаєв<sup>1</sup>, к. ф.-м. н., Орест Гавриляк<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: alexanderponomarenko54@gmail.com,  
e-mail: semerakviktor@gmail.com, alexislviv@gmail.com*

*<sup>2</sup>ВСП «Автомобільно-дорожній коледж» Національного університету «Львівська політехніка»,  
вул. Личаківська 2, м. Львів, Україна,  
e-mail: orestgavrilak@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.117>

### **Пономаренко О., Семерак В., Бурнаєв О., Гавриляк О. Розподіл напружень у півплощині з круговим отвором при розтягу під кутом до прямолінійного краю**

У сучасній промисловості та будівництві при проектуванні споруд і машин в авіабудуванні, кораблебудуванні, машинобудуванні широке застосування знаходять пружні деталі у вигляді тонких пластин, які з різних міркувань послаблюються різноманітними отворами. При завантаженні таких деталей поблизу отворів виникає концентрація напружень, яка може негативно вплинути на міцність деталі. Напруження по контурах отворів розподіляються досить нерівномірно: є малі ділянки, які піддаються дії високих напружень. Саме ці ділянки є такими, де з'являються крихкі тріщини або пластичні деформації, розвиток яких може призвести до руйнування конструкції.

Тому вивчення розподілу напружень біля криволінійних отворів є важливим завданням як з теоретичного, так і з інженерного погляду. Отримано розв'язок задачі теорії пружності про концентрацію напружень у півплощині з круговим отвором при розтягу під довільним кутом до прямолінійного краю. Задача розв'язується, виходячи з основної функції напружень, що відповідає напруженому стану в неослабленій отвором півплощині і до цієї функції напружень додається друга бігармонічна функція, яка відповідає додатковому напруженому стану, що виникає у зв'язку з наявністю отвору. Задача зводиться до знаходження бігармонічної функції напружень, яка задовольняє граничні умови на контурі отвору, на прямолінійному краю, та на нескінченності. Наукова новизна полягає в тому, що розв'язок цієї задачі дає відомості про вплив на концентрацію напружень такого фактора, як орієнтування краю півплощини відносно поля навантажень у вигляді розтягу. Розв'язок задачі наведено у біполярних координатах. Отримано формули для напружень по контуру отвору та на прямолінійному краю, а також відомий результат для розтягу півплощини з круговим отвором уздовж прямолінійного краю. Отримано значення напружень для деяких часткових випадків для характерних точок на контурі отвору та на прямолінійному краю. Результати, отримані в роботі, дають змогу теоретично визначити коефіцієнт концентрації напружень біля отворів і можуть бути використані в інженерній практиці під час проектування деталей у корабле-, авіа- та машинобудуванні.

**Ключові слова:** концентрація напружень біля отворів, бігармонічні функції напружень, біполярні координати.

### **Ponomarenko O., Semerak V., Burnaiev O., Havryliak O. Stress distribution in a half-plane with a circular hole under tension at an angle to a straight edge**

In modern industries such as project construction, aircraft manufacturing, shipbuilding, and machine engineering, thin elastic plates are commonly used. Depending on various factors, these plates feature different types of holes, which can lead to strain concentration when loaded near these holes. This concentration of strain can have an unfavorable impact on the durability of the component. The distribution of strains around the contours of the holes is uneven, leading to small sections that experience high strain levels. These critical sections are often where brittle cracks or plastic deformations develop, potentially resulting in structural failure.

Therefore, studying the distribution of strains near curved holes is essential from both theoretical and engineering perspectives. This work presents a solution to the problem of stress concentration in a half-plane with a circular hole, subjected to stretching at an arbitrary angle to a straight edge. The problem is approached by utilizing the main stress function, which corresponds to the stress state in the half-plane without the hole. A second biharmonic function is added to this function, accounting for the additional stress state introduced by the hole's presence. The task involves finding a biharmonic stress function that satisfies the boundary conditions along the contour of the hole, on the straight edge, and at infinity. The novelty of this research lies in its provision of insights regarding the impact of the edge orientation of the half-plane concerning the tensile load field on stress concentration. The solution is

presented in bipolar coordinates, and formulas for the stresses along the contour of the hole and on the straight edge are derived. The stress values obtained for various key points along the hole's contour and the straight edge for specific cases provide a basis for establishing the coefficient of strain concentration near the holes. This information can be beneficial in engineering practices during the design and development of components in the aircraft, shipbuilding, and machine manufacturing industries.

**Keywords:** concentration of stresses near holes, biharmonic functions of stresses, bipolar coordinates.

**Постановка проблеми.** Одним із важливих завдань, що ставиться перед машинобудуванням, є раціональне та економне використання металу, підвищення технічного рівня та якості продукції машинобудування, її надійності та довговічності. Створення нових конструкцій машинобудування з легшою вагою при покращенні їхньої якості можливе лише в разі врахування дійсних умов роботи цих конструкцій у ділянці пружних деформацій.

У сучасній промисловості і будівництві при проектуванні споруд і машин в авіа-, корабле-, машинобудуванні широке застосування знаходять пружні деталі у вигляді тонких пластин, які з різних міркувань послаблюються різноманітними отворами. При завантаженні таких деталей поблизу отворів виникає концентрація напружень, яка може негативно вплинути на міцність деталі. Напруження по контурах отворів розподіляються досить нерівномірно: є малі ділянки, які піддаються дії високих напружень. Саме ці ділянки є такими, де з'являються крихкі тріщини або пластичні деформації, розвиток яких може призвести до руйнування конструкції. Тому вивчення розподілу напружень біля криволінійних отворів є важливим завданням як з теоретичного, так і з інженерного погляду.

Наше дослідження спрямоване на вивчення концентрації напружень у півплощині з круговим отвором при розтягу під довільним кутом до прямолінійного краю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Різні проблеми концентрації напружень розглянуто у працях міжнародної наукової конференції, присвяченої 75-річчю академіка НАН України О. С. Космодам'янського [16]. У праці [1] описано застосування методів теорії пружності для дослідження та розрахунків металургійного обладнання. У працях [2; 5–9] наведено наближений метод визначення напруженого стану багатозв'язної ізотропної півплощини з отворами і тріщинами, розглянуто розв'язок циклічної задачі для пластини з отворами і тріщинами і її застосування в гірничій справі.

У публікації [3] описано дослідження напруженого стану в ортотропній пластині з двома круговими отворами та тріщиною. У монографії [4] викладено сучасні ефективні

методи визначення напруженого стану багатозв'язних однорідних і кусково-однорідних ізотропних пластинок з отворами, тріщинами і включеннями, наведено розв'язки різних класів задач, описано результати числових досліджень з їх аналізом і встановленням закономірностей впливу на значення напружень та їх концентрацію геометричних характеристик отворів, тріщин і включень, їх кількості і розміщення, фізико-механічних характеристик досліджуваних середовищ. У монографії [11] описано застосування методу функції комплексної змінної і конформних відображень стосовно задач теорії пружності. У праці [12] досліджується динамічна концентрація напружень на краю колового отвору за дії на нього неосесиметричного навантаження.

Надзвичайно широкий спектр задач розглянуто учасниками Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми механіки та математики» у 2018 р., присвяченої 90-річчю від дня народження академіка НАН України Я. С. Підстригача та 40-річчю створеного ним Інституту прикладних проблем механіки і математики у Львові [18]. У праці [10] досліджено напружено-деформований стан площини з періодичною системою отворів з крайовими тріщинами або смугами пластичності.

Аналіз напружено-деформованого стану півпростору з нескінченною циліндричною порожниною проведено у праці [13]. Питання регуляризації формули обернення перетворення Лапласа стосовно визначення концентрації динамічних напружень у пластинках з отворами розглянуто у праці [17]. Розтяг пластини з круговим отвором та двома радіальними тріщинами з урахуванням пластичних зон поблизу їх вершин проаналізовано в праці [15]. У публікації [20] проведено дослідження динамічної поведінки ортотропних пластин з отворами та включеннями. У праці [21] проведено скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану тонких пластин, циліндричних і конічних оболонок з отворами і стрічковими включеннями.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є отримання розв'язку задачі теорії пружності про концентрацію напружень у півплощині круговим отвором при розтягу під довільним кутом до прямолінійного краю.

Завданням дослідження є визначення коефіцієнтів концентрації напружень по контуру отвору і на прямолінійному краю залежно від напрямку розтягу та відстані отвору від прямолінійного краю.

Задача розв'язується, виходячи з основної функції напружень, що відповідає напруженому стану в неослабленій отвором півплощині, і до цієї функції напружень додається друга бігармонічна функція, яка відповідає додатковому напруженому стану, що виникає у зв'язку з наявністю отвору. Задача зводиться до знаходження бігармонічної функції напружень, яка задовольняє граничні умови на контурі отвору,

на прямолінійному краю та на нескінченності. Наукова новизна дослідження полягає в тому, що розв'язок цієї задачі дає відомості про вплив на концентрацію напружень такого фактору, як орієнтування краю півплощини відносно поля навантажень у вигляді розтягу.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо задачу про розтяг півплощини з круговим отвором, контур якого вільний від зовнішніх зусиль. Нехай напружений стан на нескінченності слугує розтягом зусиллями  $p$ , що утворюють кут  $\varphi$  з віссю  $OX$ . Визначимо картину напруженого стану в півплощині.

Напружений стан у нескінченно-віддалених частинах площини буде [14]:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(\infty)} &= p \cos^2 \varphi, \\ \sigma_y^{(\infty)} &= p \cos^2 \varphi, \\ \tau_{xy}^{\infty} &= p \sin \varphi \cos \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

а функція напружень матиме вигляд:

$$U_0(x, y) = \frac{p}{2} (y^2 \cos^2 \varphi + x^2 \sin^2 \varphi - x y \sin 2 \varphi). \quad (2)$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} U_{0,1}(x, y) &= \frac{1}{2} p y^2 \cos^2 \varphi = k_1 y^2, \\ U_{0,2}(x, y) &= \frac{1}{2} p x^2 \sin^2 \varphi = k_2 x^2, \\ U_{0,3}(x, y) &= -\frac{1}{2} p x y \sin 2 \varphi = k_3 x y. \end{aligned} \quad (3)$$

Застосовуючи криволінійну систему координат вигляду:

$$x + i y = a \operatorname{cth}(a - i \beta) / 2$$

або

$$x = \frac{a \operatorname{sh} \alpha}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \beta}, \quad y = \frac{a \sin \beta}{\operatorname{ch} \alpha - \cos \beta}, \quad (4)$$

подамо функцію напружень у вигляді суми:

$$U(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^3 [U_{0,i}(\alpha, \beta) + a k_i U_{1,i}(\alpha, \beta)]. \quad (5)$$

Таким чином, задача зводиться до визначення функцій напружень, що зникають на нескінченності і задовольняють граничні умови:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha} |_{\alpha=0} &= \tau_{\alpha\beta} |_{\alpha=0} = 0, \\ \sigma_{\alpha} |_{\alpha=c} &= \tau_{\alpha\beta} |_{\alpha=c} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Враховуючи однозначність переміщень і основний напружений стан, функції  $U_{1i}$  шукаємо у вигляді:

$$gU_{1,i}(\alpha, \beta) = G_i (\operatorname{ch} \alpha - \cos \beta) \alpha + (\mathcal{A}_{1,i} \operatorname{ch} 2 a + \mathcal{B}_{1,i} + \mathcal{C}_{1,i} \operatorname{sh} 2 a) \cos \beta + \sum_{n=2}^{\infty} f_{n,i}(a) \cos n \beta, \quad (i=1,2) \quad (7)$$

$$gU_{1,3}(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{\infty} f_{n,i}(a) \sin n \beta, \quad (8)$$

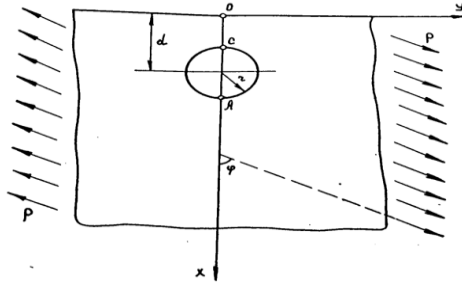
де

$$f_{n,i}(a) = \mathcal{A}_{n,i} \operatorname{ch}(n+1)a + \mathcal{B}_{n,i} \operatorname{ch}(n-1)a + \mathcal{C}_{n,i} \operatorname{sh}(n+1)a + \mathcal{D}_{n,i} \operatorname{sh}(n-1)a, \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

Використовуючи першу граничну умову (6):

$$\sigma_{\alpha} |_{\alpha=0} = \tau_{\alpha\beta} |_{\alpha=0} = 0,$$

отримуємо:



**Рис. 1.** Схема навантаження напівплощини  
**Fig. 1.** Scheme of loading a half-plane

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{n,i} + \mathcal{B}_{n,i} &= 0 \\ (n+1)\mathcal{C}_{n,i} + (n-1)\mathcal{D}_{n,i} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Введемо позначення:

$$E_{n,i} = -\mathcal{D}_{n,i}/(n+1), \quad \mathcal{C}_{n,i} = E_{n,i}(n-1). \quad (11)$$

Тоді бігармонічні функції (7) і (8) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} gU_{1,i}(\alpha, \beta) &= G_i(ch \alpha - \cos \beta)\alpha + (\mathcal{A}_{1,i}ch 2a - 1) \cos \beta + \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} \{ \mathcal{A}_{n,i}[ch(n+1)a - ch(n-1)a] + E_{n,i}[(n-1)sh(n+1)\alpha - \\ &-(n+1)sh(n-1)\alpha] \} \cos n\beta, \quad (i=1,2) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} gU_{1,3}(\alpha, \beta) &= \mathcal{A}_{1,3}(ch 2a - 1) \sin \beta + \sum_{n=2}^{\infty} \{ \mathcal{A}_{n,3}[ch(n+1)a - \\ &-ch(n-1)a] + E_{n,3}[(n-1)sh(n+1)\alpha - (n+1)sh(n-1)\alpha] \} \sin n\beta. \end{aligned} \quad (13)$$

З граничних умов:

$$\sigma_{\alpha} |_{\alpha=c} = \tau_{\alpha\beta} |_{\alpha=c} = 0,$$

після перетворень отримаємо систему, розв'язками якої є такі величини:

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{2}{ch 2c}, & \mathcal{A}_{1,1} &= \frac{e^{-2c}}{2ch 2c} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta \cdot \mathcal{A}_{n,i} &= -n^2 sh^2 c + n shc chc - e^{-nc} shnc, \\ \Delta \cdot E_{n,i} &= n sh^2 c, & \Delta &= 2(sh^2 nc - n^2 sh^2 c) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} G_2 &= \frac{-2}{ch 2c}, & \mathcal{A}_{1,2} &= \frac{-e^{-2c}}{2ch 2c}, \\ \Delta \cdot \mathcal{A}_{n,2} &= n^2 sh^2 c - n shc chc + e^{-nc} shnc, \\ \Delta \cdot E_{n,2} &= -n sh^2 c, \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{A}_{1,3} &= \frac{-e^{-2c}}{2ch 2c}, \\ \Delta \cdot \mathcal{A}_{n,3} &= n^2 sh^2 c - n shc chc + e^{-nc} shnc, \\ \Delta \cdot E_{n,3} &= -n sh^2 c. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Тоді для функцій напружень маємо:

$$U(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^3 U_i(\alpha, \beta), \quad (17)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{gU_1}{\alpha p \cos^2 \varphi} &= \frac{1}{ch 2c} [\alpha(ch \alpha - \cos \beta) + ch(2c - \alpha)sh \alpha \cos \beta] + \\ &+ \frac{1}{2} sh \alpha + \sum_{n=2}^{\infty} [n shc sh(\alpha - c)sh n \alpha - \\ &- sh \alpha sh n(\alpha - c)sh nc] \frac{\cos n\beta}{sh^2 nc - n^2 sh^2 c}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{gU_2}{\alpha p \sin^2 \varphi} &= \frac{1}{ch 2c} [\alpha(ch \alpha - \cos \beta) + sh \alpha ch(2c - \alpha) \cos \beta] + \\ &+ \frac{1}{2} e^{-\alpha} + \frac{1}{2} \cos \beta - \sum_{n=2}^{\infty} [n shc sh(\alpha - c)sh n \alpha - \\ &- sh \alpha sh nc sh n(\alpha - c)] \frac{\cos n\beta}{sh^2 nc - n^2 sh^2 c}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{gU_3}{\alpha p \sin 2\varphi} &= -\frac{1}{sh 2c} sh(2c - \alpha)sh \alpha \sin \beta + \sum_{n=2}^{\infty} [n shc sh(\alpha - c)sh n \alpha - \\ &- sh \alpha sh n(\alpha - c)sh nc] \frac{\sin n\beta}{sh^2 nc - n^2 sh^2 c}. \end{aligned} \quad (20)$$

Для напружень на контурі отвору маємо:



$$\sigma_{\beta|\alpha=c} = \sum_{i=1}^3 p\sigma_{\beta,i} \quad (21)$$

де

$$\sigma_{\beta,1} = 2\cos^2\varphi\left\{\left[1 - 2\left(\frac{sh\ c\ \sin\ \beta}{ch\ c - \cos\ \beta}\right)^2\right] + (ch\ \alpha - \cos\ \beta)\left(\frac{sh\ c}{ch\ 2\ c} + 2e^{-2c}\cos\ \beta + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \cos\ n\ \beta\right)\right\} \quad (22)$$

$$\sigma_{\beta,2} = -2\sin^2\varphi\left\{\left[1 - \frac{2sh^2\ c\ \sin^2\ \beta}{(ch\ c - \cos\ \beta)^2}\right] + (ch\ \alpha - \cos\ \beta)\left(\frac{sh\ c}{ch^2\ c} + 2e^{-2c}\cos\ \beta + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \cos\ n\ \beta\right)\right\}, \quad (23)$$

$$\sigma_{\beta,3} = -\sin\ 2\ \varphi\left\{\frac{8\ sh\ c\ \sin\ \beta\ (ch\ c\ \cos\ \beta - 1)}{(ch\ c - \cos\ \beta)^2} + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \sin\ n\ \beta + e^{-2c}\sin\ \beta\right\} \cdot 4(ch\ c - \cos\ \beta), \quad (24)$$

$$R_n = \frac{1}{sh^2\ nc - n^2\ sh^2\ c} (2n^4\ sh^3\ c \cdot e^{-nc} - 2n^3\ sh\ c\ ch\ c\ e^{-nc} + \frac{3}{2}n^2\ ch\ c\ e^{-nc} - \frac{1}{2}n^2\ sh\ c\ e^{-3nc} - \frac{1}{2}n\ ch\ c \cdot e^{-nc} + \frac{1}{2}n\ ch\ c \cdot e^{-3cn}). \quad (25)$$

На прямолінійному краю для напружень отримаємо:

$$\sigma_{\beta|\alpha=0} = p \sum_{i=1}^3 \sigma_{\beta,i} \quad (26)$$

причому:

$$\frac{\sigma_{\beta,1}}{\cos^2\varphi} = 1 - (1 - \cos\ \beta)\left[-\frac{2e^{-2c}}{ch\ 2\ c}\cos\ \beta + 2\sum_{n=2}^{\infty} (n^3\ sh^2\ c - n^2\ sh\ c\ ch\ c + ne^{-nc}\ sh\ n\ c) \frac{\cos\ n\ \beta}{sh^2\ nc - n^2\ sh^2\ c}\right], \quad (27)$$

$$\frac{\sigma_{\beta,2}}{\sin^2\varphi} = (1 - \cos\ \beta)\left[-\frac{2e^{-2c}}{ch\ 2\ c}\cos\ \beta + 2\sum_{n=2}^{\infty} (n^3\ sh^2\ c - n^2\ sh\ c\ ch\ c + ne^{-nc}\ sh\ n\ c) \frac{\cos\ n\ \beta}{sh^2\ nc - n^2\ sh^2\ c}\right], \quad (28)$$

$$\frac{\sigma_{\beta,3}}{\sin\ 2\ \varphi} = 2(1 - \cos\ \beta)\left(-\frac{e^{-2c}}{sh\ 2\ c}\sin\ \beta + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(n^3\ sh^2\ c - n^2\ sh\ c\ ch\ c + ne^{-nc}\ sh\ n\ c)\sin\ n\ \beta}{sh^2\ nc - n^2\ sh^2\ c}\right). \quad (29)$$

У випадку розтягу півплощини вздовж прямолінійного краю, тобто при  $\varphi = \pi/2$ , маємо відомий результат [19] для напружень на контурі отвору:

$$\frac{\sigma_{\beta}}{p} = 2\left\{\left[1 - 2\left(\frac{sh\ c\ \sin\ \beta}{ch\ c - \cos\ \beta}\right)^2\right] + (ch\ \alpha - \cos\ \beta)\left(\frac{sh\ c}{ch\ 2\ c} + 2e^{-2c}\cos\ \beta + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \cos\ n\ \beta\right)\right\} \quad (30)$$

а також на прямолінійному краю:

$$\frac{\sigma_{\beta}}{p}\Big|_{\alpha=0} = 1 - (1 - \cos\ \beta)\left[-\frac{2e^{-2c}}{ch\ 2\ c}\cos\ \beta + 2\sum_{n=2}^{\infty} (n^3\ sh^2\ c - n^2\ sh\ c\ ch\ c + ne^{-nc}\ sh\ n\ c) \frac{\cos\ n\ \beta}{sh^2\ nc - n^2\ sh^2\ c}\right]. \quad (31)$$

У табл. 1 наведено значення напружень  $\sigma_{\beta}/p$  в точках  $O, C$  (рис. 1) для деяких значень кута  $\varphi$  і для деяких віддалей центру отвору від краю.

Значення напружень  $\sigma_{\beta}/p$  у точці  $\mathcal{A}$  (рис.1) подано в табл. 2.

У табл. 3 наведено значення напружень  $\sigma_{\beta}/p$  в точках  $O, C, \mathcal{A}$  (рис. 1) при значенні кута  $\varphi = 10^\circ$

**Таблиця 1.** Значення напружень  $\sigma_\beta/p$  у точках  $O, C$ .**Table 1.** Values of stresses  $\sigma_\beta/p$  in points  $O, C$ .

c	$\lambda = \frac{d}{r} = \text{chc}$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_O$			$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_C$		
		$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 30^\circ$
0,00	1,0	-	-	-	-	-	-
0,60	1,19	-4,08	-3,98	-2,02	5,06	5,03	2,07
0,80	1,34	-1,96	-1,94	-0,90	4,37	4,35	2,23
1,00	1,54	-0,90	-0,88	-0,41	3,92	3,90	1,99
1,20	1,92	-0,27	-0,25	-0,10	3,61	3,58	1,84
1,40	2,15	0,13	0,12	0,10	3,40	3,34	1,74
1,60	2,18	0,41	0,40	0,25	3,25	3,19	1,64
1,80	3,11	0,59	0,59	0,33	3,16	3,03	1,12
2,00	3,76	0,72	0,71	0,40	3,10	3,00	1,09
2,20	4,57	0,81	0,80	0,45	3,06	2,83	1,07
$\infty$	$\infty$	1,00	1,00	0,54	3,01	2,95	1,54

**Таблиця 2.** Значення напружень  $\sigma_\beta/p$  у точках  $\mathcal{A}$ **Table 2.** Values of stresses  $\sigma_\beta/p$  in points  $\mathcal{A}$ 

c	$\lambda = \frac{d}{r} = \text{chc}$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_{\mathcal{A}}$		
		$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 30^\circ$
0	1	4,00	3,93	2,04
0,60	1,19	3,36	3,31	1,72
0,80	1,34	3,27	3,22	1,67
1,00	1,54	3,20	3,15	1,64
1,20	1,92	3,15	3,10	1,11
1,40	2,15	3,12	3,07	1,10
1,60	2,18	3,09	3,04	1,09
1,80	3,11	3,07	3,01	1,07
2,00	3,76	3,05	2,99	1,06
2,20	4,57	3,04	2,98	1,06
$\infty$	$\infty$	3	2,95	1,54

**Таблиця 3.** Значення напружень  $\sigma_\beta/p$  у точках  $O, C, \mathcal{A}$  при значенні кута  $\varphi = 10^\circ$ **Table 3.** Values of stresses  $\sigma_\beta/p$  in points  $O, C, \mathcal{A}$  by value corner  $\varphi = 10^\circ$ 

$\alpha$	$\lambda = \frac{d}{r}$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_O$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_C$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_{\mathcal{A}}$
0,6	1,185	-3,958	4,912	3,261
0,8	1,337	-1,897	4,235	3,168
1,0	1,543	-0,868	3,801	3,104
1,2	1,811	-0,261	3,501	3,057
1,4	2,151	0,129	3,294	3,022
1,6	2,577	0,392	3,156	2,994
1,8	3,107	0,573	3,067	3,973
2,0	3,762	0,699	3,009	2,957
$\infty$	$\infty$	0,97	2,91	2,91

**Висновки.** Отримано розв'язок задачі теорії пружності про концентрацію напружень у півплощині з круговим отвором при розтягу під довільним кутом до прямолінійного краю та відомий результат для розтягу півплощини з круговим отвором вздовж прямолінійного краю. Аналіз та підрахунки показують, що значення максимального коефіцієнта концентрації напружень досягається у тій точці контуру, яка найближча до прямолінійного краю, тобто в точці  $C$

(див. рис. 1) і прямує до 3 при віддаленні отвору від краю півплощини, а в точці  $O$  прямує до 1. Як видно з табл. 1, при  $c = 0,60$ ,  $\lambda = 1,19$ ,  $\varphi = 0^\circ$  значення максимального коефіцієнта концентрації напружень дорівнює 5,06, при  $\varphi = 5^\circ - 5,03$ , при  $\varphi = 30^\circ - 2,07$ . При  $c = 0,80$   $\lambda = 1,34$  значення максимального коефіцієнта концентрації напружень відповідно при  $\varphi = 0^\circ - 4,37$ , при  $\varphi = 5^\circ - 4,35$ , при  $\varphi = 30^\circ - 2,23$ .

Як видно з табл. 3, при  $c = 0,60$ ,  $\lambda = 1,185$ ,  $\varphi = 10^\circ$  значення максимального коефіцієнта концентрації напружень дорівнює 4,912.

При наближенні отвору до краю півплощини коефіцієнт концентрації напружень у точці С прямує до нескінченності.

Отримані результати дають змогу теоретично визначити коефіцієнт концентрації напружень у півплощині з отвором і можуть бути використані в інженерній практиці під час проектування деталей у кораблебудуванні, авіабудуванні та машинобудуванні.

### Бібліографічний список

1. Бейгул О. О., Лепетова Г. Л. Методи теорії пружності для дослідження і розрахунків металургійного обладнання: навч. посіб. Дніпродзержинськ: Дніпродзерж. держ. техн. ун-т, 2014. 188 с.
2. Вакуленко С. В., Калоеров С. А. Приближенный метод определения напряженного состояния многосвязной изотропной полуплоскости с отверстиями и трещинами. *Теоретическая и прикладная механика*. 2002. Вып. 35. С. 65–76.
3. Довбня К., Врублевський В. Дослідження напруженого стану в ортотропній пластині з двома круговими отворами та тріщиною. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф. (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 33–35.*
4. Калоеров С. А., Авдюшина Е. В., Мироненко А. Б. Концентрация напряжений в многосвязных изотропных пластинках. Донецк: Донецк. нац. ун-т, 2013. 440 с.
5. Калоеров С. А., Авдюшина Е. В. Напряженное состояние горного массива с выработками вблизи загруженной дневной поверхности. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна*. 2004. Вип. 83. С. 129–134.
6. Калоеров С. А., Авдюшина Е. В. Напряженное состояние горного массива с выработкой вблизи дневной поверхности. *Деформация и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: сб. науч. тр. X Междунар. науч. школы, г. Алушта, 18-24 сент. 2000 г. Симферополь, 2000. С. 60–62.*
7. Калоеров С. А., Вакуленко С. В. Решение циклической задачи для пластинки с отверстиями и трещинами и ее приложение в горном деле. *Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки*. 2004. № 1. С. 37–42.
8. Калоеров С. А. Приближенный метод исследования напряженного состояния изотропной полуплоскости и полосы с отверстиями и трещинами. *Теоретическая и прикладная механика*. 2004. Вып. 39. С. 83–93.
9. Калоеров С. А. Решение основных задач теории упругости для полуплоскости с отверстиями и трещинами. *Теоретическая и прикладная механика*. 1998. Вып. 28. С. 157–171.
10. Кравець В. Напружено-деформований стан площини з періодичною системою отворів з крайовими тріщинами або смугами пластичності. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф. (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 44–47.*
11. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. Москва: Наука, 1966. 707 с.
12. Онишко Л. Й., Варивода Ю. Ю., Пономаренко О. М. Дослідження динамічної концентрації напружень на краю колового отвору за дії на нього несиметричного навантаження. *Науковий вісник ЛНУВМБТ ім. С. З. Гжицького*. 2011. 13, № 4 (50), ч. 4. С. 106–114.
13. Проценко В., Українець Н. Аналіз напружено-деформованого стану півпростору з нескінченною циліндричною порожниною. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф. (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 85–87.*
14. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наук. думка, 1968. 887 с.
15. Слободян М., Цуркан М. Розтяг пластини з круговим отвором та двома радіальними тріщинами з урахуванням пластичних зон поблизу їх вершин. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф. (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 96–98.*
16. Современные проблемы концентрации напряжений: тр. Междунар. науч. конф., посвящ. 75-летию академика НАН Украины А. С. Космодамианского (г. Донецк, 21-25 июня 1998 г.). Донецк, 1998. 287 с.
17. Соляр Т., Максимович О. Регуляризація формули обернення перетворення Лапласа стосовно вивчення концентрації динамічних напружень у пластинах з отворами. *Сучасні проблеми механіки і математики: матеріали Міжнар. наук. конф. (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 161–163.*
18. Сучасні проблеми механіки і математики: праці Міжнар. наук. конф., присвяч. 90-річчю від дня народження академіка НАН України Я. С. Підстригача (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): у 3 т. Львів: ІППММ, 2018.

19. Уфлянд Я. С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости. Ленинград: Наука, 1968. 402 с.

20. Шопя Т. Дослідження динамічної поведінки ортотропних пластин з отворами та включеннями. *Сучасні проблеми механіки і МАТЕМАТИКИ*: матеріали Міжнар. наук. конф. (м. Львів, 22-25 трав. 2018 р.): в 3 т. Львів: ІППММ, 2018. Т. 2. С. 168–169.

21. Гарт Е., Семенча О. Скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану тонких пластин, циліндричних і конічних оболонок з отворами і стрічковими включеннями. *Сучасні проблеми механіки та математики – 2023: матеріали Міжнародної наукової конференції* (м. Львів, 23-25 травня 2023р.): Львів: ІППММ, 2023. С. 173–174.

*Стаття надійшла 23.05.2024*

УДК 539.3

## НАПРУЖЕНИЙ СТАН ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНОГО СЕРЕДОВИЩА ЗІ СФЕРОЇДАЛЬНИМ ВКЛЮЧЕННЯМ ЗА УМОВ НЕІДЕАЛЬНОГО КОНТАКТУ

*Тарас Бубняк, к. ф.-м. н., Віктор Семерак, к. т. н., Олексій Бурнаєв, к. ф.-м. н., Олександр Пономаренко, к. ф.-м. н., Лариса Шпак, к. ф.-м. н., Оксана Говда*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: semerakviktor@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.125>

**Бубняк Т., Семерак В., Бурнаєв О., Пономаренко О., Шпак Л., Говда О. Напружений стан трансверсально-ізотропного середовища зі сфероїдальним включенням за умов неідеального контакту**

Просторові задачі теорії пружності і термопружності є важливою частиною сучасної механіки деформованого твердого тіла. Їх актуальність визначається численним застосуванням цієї науки для вирішення важливих технічних і технологічних проблем у різних галузях виробництва. Необхідність таких досліджень зумовлена, передусім, знаннями міцності матеріалів і елементів конструкцій. Як правило, екстремальні напруження досягаються в зонах розділу фаз, оскільки практично всі конструктивні матеріали неоднорідні за своєю структурою.

Важливою є проблема моделювання властивостей міжфазної межі з урахуванням реальних особливостей її структури. Отримання достовірної і повної інформації про розподіл напружень в елементах конструкцій пов'язане з використанням ефективних аналітичних і числових методів розв'язування просторових задач теорії пружності.

У просторових задачах теорії пружності і термопружності для трансверсально-ізотропних тіл розв'язок представляється через потенціальні функції, які є гармонічними у спеціально вибраних системах координат. Це суттєво зменшує математичні труднощі, які виникають під час розв'язування конкретних крайових задач.

Останніми роками з'явилися публікації як вітчизняних, так і зарубіжних вчених, в яких розглядаються задачі теорії пружності і термопружності для ізотропного середовища в умовах неідеального механічного і теплового контактів. Зокрема, у працях А. Т. Улітка, Ю. М. Неміша, Н. Е. Качаловської та ін. розглядаються осесиметричні задачі. Однак для трансверсально-ізотропного тіла з включеннями канонічної форми розв'язки таких задач майже відсутні. На відміну від проаналізованих задач для ідеального контакту, розв'язок останніх отримується не в замкнутому вигляді, а зводиться до розв'язування нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

Важливі результати в цьому напрямі отримані в роботах Я. С. Підстригача, Ю. М. Подільчука, побудовані точні розв'язки просторових задач теорії пружності і статичної термопружності у сферичній, циліндричній, сфероїдальній, параболічній та інших системах координат.

Наведено постановку задачі теорії пружності про розподіл нормальних, меридіальних і кругових напружень трансверсально-ізотропного середовища, яке містить анізотропне включення у формі стиснутого сфероїда при рівномірному всесторонньому стиску, залежно від геометрії включення.

На основі отриманих розв'язків просторових задач теорії пружності і термопружності для трансверсально-ізотропного середовища зі стиснутим сфероїдальним включенням в умовах неідеального механічного і теплового контактів досліджено розподіл термонапружень як у середовищі, так і у включенні за дії довільного лінійного температурного і силового полів. Отримано інженерні формули для розрахунку концентрації напружень у середовищі та включенні за різних механічних навантажень – стиску, розтягу, зсуву, згину та кручення.

**Ключові слова:** потенціальні функції, трансверсально-ізотропне середовище, неідеальний контакт, сфероїд, поля напружень і термонапружень.

**Bubniak T., Semerak V., Burnaiev O., Ponomarenko O., Shpak L., Hovda O. Stress state of a transversally isotropic medium with a spheroidal inclusion under imperfect contact conditions**

Spatial problems related to the theory of elasticity and thermoelasticity play a significant role in the modern mechanics of deformable solids. Their importance arises from the numerous applications of this field in addressing critical technical and technological challenges across various industries. Research in this area is primarily driven by the need to understand the strength of materials and structural components. Typically, extreme stresses occur at the phase interface zones, as nearly all structural materials exhibit heterogeneity in their composition.

Modeling the properties of interphase boundaries while considering their actual structural features is a crucial task. To obtain reliable and comprehensive information about stress distribution in structural elements, effective analytical and numerical methods must be employed to tackle spatial problems within the theory of elasticity.

In spatial problems pertaining to the theory of elasticity and thermoelasticity for transversely isotropic bodies, solutions are expressed through potential functions that are harmonic in specifically chosen coordinate systems. This

approach significantly alleviates the mathematical challenges typically encountered when solving particular boundary value problems.

Recent publications from both domestic and international researchers have addressed issues related to the theory of elasticity and thermoelasticity for isotropic materials, particularly under conditions of imperfect mechanical and thermal contact. For instance, the works of A. T. Ulitko, Yu. M. Nemish, and N. E. Kachalovska explore axiometric problems. However, there are limited solutions available for transversely isotropic bodies with inclusions of canonical forms. Unlike the analyzed problems involving perfect contact, the latter cannot be solved in a closed form but instead requires the resolution of infinite systems of linear algebraic equations.

Notable advancements in this field have been achieved by researchers such as Ya. S. Pidstryhach and Yu. M. Podilchuk, who have constructed exact solutions for spatial problems related to elasticity and static thermoelasticity across various coordinate systems, including spherical, cylindrical, spheroidal, and parabolic configurations.

The current study addresses the distribution of normal, meridional, and circular stresses in a transversely isotropic medium that contains an anisotropic inclusion shaped like a compressed spheroid, subjected to uniform all-around compression. This analysis depends on the geometry of the inclusion.

Building on the solutions derived from spatial problems of elasticity and thermoelasticity involving a transversely isotropic medium with a compressed spheroidal inclusion, investigations were conducted into the thermal stress distribution within both the medium and the inclusion. This was done under the influence of arbitrary linear temperature and force fields. Engineering formulas were developed to calculate stress concentrations in both the surrounding medium and the inclusion under various mechanical loads, including compression, tension, shear, bending, and torsion.

**Keywords:** potential functions, transversally isotropic medium, imperfect contact, spheroid, stress and thermal stress fields.

**Постановка проблеми.** Просторові задачі теорії пружності і термопружності є важливою частиною сучасної механіки деформованого твердого тіла. Їх актуальність визначається численним застосуванням цієї науки для вирішення важливих технічних і технологічних проблем у різних галузях виробництва. Необхідність таких досліджень зумовлена, передусім, знанням міцності матеріалів і елементів конструкцій. Як правило, екстремальні напруження досягаються в зонах розділу фаз, оскільки практично всі конструктивні матеріали неоднорідні за своєю структурою.

Важливою є проблема моделювання властивостей міжфазної межі з урахуванням реальних особливостей її структури. Отримання достовірної і повної інформації про розподіл напружень в елементах конструкцій пов'язане з використанням ефективних аналітичних і числових методів розв'язування просторових задач теорії пружності.

У просторових задачах теорії пружності і термопружності для трансверсально-ізотропних тіл розв'язок представляється через потенціальні функції, які є гармонічними у спеціально вибраних системах координат. Це суттєво зменшує математичні труднощі, які виникають при розв'язуванні конкретних крайових задач [7; 10; 11].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками з'явилися публікації як вітчизняних, так і зарубіжних вчених, в яких розглядаються задачі теорії пружності і термоп-

ружності для ізотропного середовища в умовах неідеального механічного і теплового контактів. Зокрема, у працях А. Т. Улітка, Ю. М. Неміша, Н. Е. Качаловської та ін. розглядаються осесиметричні задачі. Однак для трансверсально-ізотропного тіла з включеннями канонічної форми розв'язки таких задач майже відсутні. На відміну від проаналізованих задач для ідеального контакту, розв'язок останніх отримується не в замкнутому вигляді, а зводиться до розв'язування нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь [1–3].

Важливі результати в цьому напрямі отримані в роботах Я. С. Підстригача, Ю. М. Подільчука, побудовані точні розв'язки просторових задач теорії пружності і статичної термопружності у сферичній, циліндричній, сфероїдальній, параболічній та інших системах координат [7].

**Постановка завдання.** Наведено постановку задачі теорії пружності про розподіл нормальних, меридіальних і кругових напружень трансверсально-ізотропного середовища, яке містить анізотропне включення у формі стиснутого сфероїда при рівномірному всесторонньому стиску та дії довільного лінійного температурного поля, залежно від геометрії включення [8].

**Виклад основного матеріалу.** Для трансверсально-ізотропного тіла загальний розв'язок рівнянь статичної термопружності представляється через потенціальні функції

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial}{\partial x}(\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_4) + \frac{\partial \Phi_3}{\partial y}, \\ v &= \frac{\partial}{\partial y}(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_4) - \frac{\partial \Phi_3}{\partial x} \end{aligned} \quad (1)$$

$$w = k_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial z} + k_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} + k_4 \frac{\partial \Phi_4}{\partial z}.$$

Функції  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  задовольняють рівняння Лапласа, і

$$\frac{\partial^2 \Phi_4}{\partial z^2} = k_3 T,$$

де  $k_j$  – сталі, які залежать від пружних і теплових властивостей матеріалу [4; 6; 9].

Для розв'язування задачі використовувались системи координат для стиснутого сфероїда обертання:

$$\begin{aligned} x &= a_j \sin \theta_j \operatorname{ch} \eta_j \cos \varphi, \\ y &= a_j \sin \theta_j \operatorname{ch} \eta_j \sin \varphi, \\ z &= \sqrt{v_j} a_j \cos \theta_j \operatorname{sh} \eta_j, \quad (j=1,2,3,4), \\ (0 \leq \eta_j < \infty, 0 \leq \theta_j \leq \pi, 0 \leq \varphi < 2\pi), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $v_j$  корені відповідного характеристичного рівняння

$$c_{11} c_{44} v^2 - (c_{44}^2 + c_{33} c_{11} - (c_{13} + c_{44})^2) v + c_{33} c_{44} = 0. \quad (3)$$

Для збіжності граничних поверхонь необхідне виконання рівностей для ( $\eta_j = \eta_{j0}$ ):

$$\begin{aligned} a_1 \operatorname{ch} \eta_{10} &= a_2 \operatorname{ch} \eta_{20} = a_3 \operatorname{ch} \eta_{30}; \\ a_1 \sqrt{v_1} \operatorname{sh} \eta_{10} &= a_2 \sqrt{v_2} \operatorname{sh} \eta_{20} = a_3 \sqrt{v_3} \operatorname{sh} \eta_{30}. \end{aligned} \quad (4)$$

Частинний розв'язок неоднорідних рівнянь рівноваги, який відповідає дії лінійного температурного поля в середовищі  $T_0 = ax + by + cz + d$ , будемо у вигляді [5; 12]

$$\begin{aligned} \Phi_4(x, y, z) &= \frac{1}{2} v_4 k_1 \left\{ A_0 \int_{q_4}^{\infty} (z_4 - z_4(\mu))^2 \frac{d\mu}{\Delta(\mu)} - \right. \\ &- C \left[ \int_{q_4}^{\infty} z_4^2(\mu) (z_4 - z_4(\mu)) \frac{d\mu}{(\mu^2 - 1)\Delta(\mu)} - \right. \\ &\left. \left. - \frac{1}{3} \int_{q_4}^{\infty} (z_4^3 - z_4^3(\mu)) \frac{d\mu}{(\mu^2 - 1)\Delta(\mu)} \right] + \right. \\ &\left. + (Ax + By) \int_{q_4}^{\infty} (z_4 - z_4(\mu))^2 \frac{d\mu}{\mu^2 \Delta(\mu)} \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $z_4(\mu) = a_4 \sqrt{\mu^2 - 1} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{a_4^2 \mu^2}}, \quad \Delta(\mu) = \mu \sqrt{\mu^2 - 1}.$

Якщо до граничної поверхні сфероїда ( $\eta_j = \eta_{j0}$ ) прикладено зусилля  $\sigma_{ij}^0$ , то розв'язок задачі про напружено-деформований стан у трансверсально-ізотропному середовищі зі сфероїдальним включенням за дії лінійного температурного і силового полів в умовах неідеального теплового і механічного контактів (ковзання без відриву) зведено до розв'язування однорідних рівнянь рівноваги з такими граничними умовами ( $\eta_j = \eta_{j0}$ ),  $j = 1, 2, 3$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta}^{(1)} &= \sigma_{\eta}^{(2)} + \sigma_{\eta}^{(ч.н.)}; \quad \tau_{\eta\theta}^{(1)} + \tau_{\eta\theta}^{(ч.н.)} = 0; \\ \tau_{\eta\theta}^{(1)} &= 0; \quad \tau_{\eta\varphi}^{(2)} + \tau_{\eta\varphi}^{(ч.н.)} = 0; \quad \tau_{\eta\varphi}^{(1)} = 0; \\ u_{\eta}^{(2)} + u_{\eta}^{(0)} + u_{\eta}^{(ч.н.)} &= u_{\eta}^{(1)} + u_{\eta}^I. \end{aligned} \quad (6)$$

Індексом (1) позначено компоненти напружень і деформацій у включенні, (2) – аналогічні величини у середовищі. При цьому напружено-деформований стан у середовищі є сумою основного і додаткового, викликаного наявністю включення. Величини  $\sigma_{\eta}^{(ч.н.)}$ ,  $u_{\eta}^{(ч.н.)}$  отримано на основі частинного розв'язку (5), а  $u_{\eta}^{(0)}$ ,  $u_{\eta}^I$  – переміщення, викликані дією температурного поля у середовищі  $T_0$  і визначеної за ним температури  $T_1$  на основі граничної задачі з умовами неідеального теплового контакту:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + v_4 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) (T_0 + T) &= 0, \quad (x \in D) \\ \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + v_4 \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T_1 &= 0, \quad (x \in D) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mu_i (T_0 + T)_{,i} n_i \Big|_{\eta_{40}} = \mu_i T_{,i} n_i \Big|_{\eta_{40}} = \beta (T_1 - T_0 - T) \Big|_{\eta_{40}},$$

(D – область включення).

Розв'язок досліджуваних задач отримано на основі загальних розв'язків зовнішньої та внутрішньої задач теорії пружності для трансверсально-ізотропного стиснутого сфероїда. У випадку

дійсних і різних коренів характеристичного рівняння (3) потенціальні функції мають такий вигляд [4;13–15]:

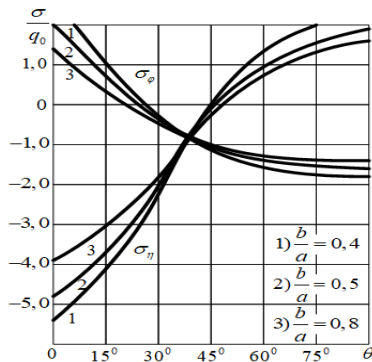
$$\Phi_j(x, y, z_j) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{n+1} \frac{n+m}{i(2n+1)} \left[ \frac{P_{n+1}^{(m)}(p_j) Q_{n+1}^{(m)}(i\bar{q}_j)}{(n+m)(n-m+1)} - \frac{P_{n-1}^{(m)}(p_j) Q_{n-1}^{(m)}(i\bar{q}_j)}{(n-m)(n-m+1)} \right] \cdot (\delta_j a_{nm}^{(j)} \cos m\varphi + b_{nm}^{(j)} \sin m\varphi), \quad (8)$$

$$(j = 1, 2, 3, \delta_1 = \delta_2 = 1, \delta_3 = -1, i^2 = -1)$$

де  $P_n^{(m)}(p)$ ,  $Q_n^{(m)}(i\bar{q}_j)$  – приєднані функції Лежандра першого і другого родів,  $a_{nm}^{(j)}$ ,  $b_{nm}^{(j)}$  – невідомі сталі.

Для визначення коефіцієнтів  $a_{nm}^{(j)}$ ,  $b_{nm}^{(j)}$  з граничних умов (6), прирівнюючи вирази при однакових тригонометричних і сфероїдальних функціях, отримаємо нескінченну систему лінійних алгебраїчних рівнянь, яка має складний структурний вигляд і має єдиний розв’язок, який знайдено методом редукції.

На рис. 1 і 2 наведено концентрацію напружень для сфероїдального включення різної геометрії  $\frac{b}{a} = 0, 4; 0, 6; 0, 8$ , коли на нескінченності задано одновісний стиск, тобто  $\sigma_z^0 = -c_0$ .



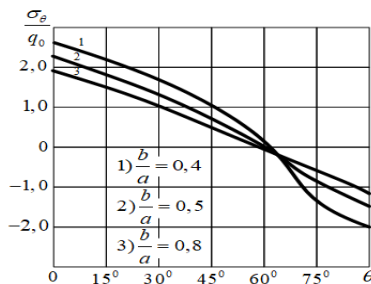
**Рис.1.** Характер концентрації нормальних та кругових напружень

**Fig. 1.** Character of concentration of normal and circular stresses

**Висновки.** При одновісному стиску вздовж осі OZ нормальні та кругові напруження  $\sigma_\eta$  і  $\sigma_\varphi$  (див. рис. 1) перерозподіляються при  $\theta = 35 - 36^\circ$ , спостерігається перехід від розтягувальних до стискальних напружень. Зміна знака меридіальних напружень  $\sigma_\theta$  (див. рис. 2) має місце при  $\theta = 60^\circ$ . При збільшенні відношення  $b/a$  осей сфероїда вздовж OZ і OX концентрація напружень спадає.

У разі рівномірного всестороннього стиску мінімальні стискальні напруження локалізуються біля полюса великої осі включення. Максимального значення нормальні та меридіальні напруження досягають на полюсі меншої осі сфероїда. Напруження мають стискальний характер і зростають при зменшенні відношення осей сфероїда  $b/a$ .

На основі отриманих розв’язків просторових задач теорії пружності і термопружності для трансверсально-ізотропного середовища зі стиснутим сфероїдальним включенням в умовах неідеального механічного і теплового контактів,



**Рис.2.** Характер концентрації меридіальних напружень

**Fig. 2.** Character of meridional stress concentration

досліджено розподіл термонапружень як у середовищі, так і у включенні за дії довільного лінійного температурного і силового полів. Отримано інженерні формули для розрахунку концентрації напружень у середовищі та включенні за різних механічних навантажень – стиску, розтягу, зсуву, згину та кручення.

### Бібліографічний список

1. Бубняк Т. І. Концентрація нормальних напружень у включенні за дії лінійного температурного поля. *Вісник Львівського національного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2018. № 19. С. 46-48.

2. Бубняк Т. І. Розподіл напружень на поверхні порожнини у трансверсально-ізотропному середовищі. *Вісник Львівського національного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2020. № 21. С. 5-9.

3. Бубняк Т., Семерак В., Пономаренко О., Богач М., Воліна Т. Про напруження в компози-



тах при нагріванні. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 27. С. 32-37.

4. Максимук О., Щербина Я. Вплив захисного покриття на тепловий режим обмежених об'ємів. *Вісник Львівського університету. Серія: Прикладна математика та інформатика*. 2002. Вип. 4. С. 126-130.

5. Підстригач Я. С., Коляно Ю. М. Температурні поля, що не встановилися, і напруги в тонких пластинках. Київ: Наук. думка, 1972. 308 с.

6. Підстригач Я. С., Ярема С. Я. Температурні напруження в оболонках. Київ: Вид-во АН УРСР, 1961. 212 с.

7. Подільчук Ю. Н. Граничні задачі статички пружних тіл. *Просторові задачі теорії пружності і пластичності*: в 5 т. Київ: Наук. думка, 1984. Т. 1. 303 с.

8. Семерак В. М., Іваник Є. Г., Сікора О. В. Застосування апроксимаційного методу при моделюванні та аналізі нестационарних теплових процесів внаслідок дії рухомих зон локального нагріву на основі трьохмірних рівнянь. *Вісник Львівського національного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2010. № 11. С.14-27.

9. Семерак В. М., Косарчин В. І. Термонапружений стан в околі локальної ділянки фрикційного контакту. *Вісник Львівського*

*національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 271-275.

10. Соколовський Я. І. Напружений стан трансверсально-ізотропного середовища із сфероїдальним включенням при неідеальнім механічним контакті. *Теоретическая и прикладная механика*. 1995. Вип. 25. С. 17-26.

11. Соколовський Я. І., Бубняк Т. І. Просторова задача трансверсально-ізотропного середовища із сфероїдальним включенням при неідеальному механічному контакті. *Доп. НАН України*. 1996. № 9. С. 45-50.

12. Шевчук В. А. Нестационарна одновимірна задача теплопровідності для циліндра з тонким багат шаровим покриттям. *Математичні методи та фізико-механічні поля*. 2011. № 2. С. 179-185.

13. Attetkov A. V., Belyakov N. S. The temperature field of an infinite solid containing a cylindrical channel with a thermally thin surface coating. *High Temperature*. 2006. 44, No. 1. P. 139-143.

14. Ionescu-Cazimir V. Theoreme de reciprocitate pentru problema dinamica a termoelasticității. *An. Univ. Bucuresti. Ser. stiint. natur.* 1963. Vol. 12, No. 39. P. 93-100.

15. Zorski H. On certain property of thermoelastic media. *Bull. Acad, pol. sci. Ser. sci. techn.* 1958. Vol. 6, No. 6. P. 331-339.

*Стаття надійшла 15.06.2024*

УДК 658:338.3

## ПЕРСПЕКТИВИ РЕОРГАНІЗАЦІЇ МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВ У ВЕЛИКІ МАШИНОБУДІВНІ ФІРМИ УКРАЇНИ

*Сергій Березовецький, к. т. н., Руслан Гуменюк, к. т. н.,  
Олексій Швець, к. т. н., Оксана Березовецька, докт. філос., Петро Коруняк, к. т. н.  
Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: qsikoq@gmail.com; ruslan.video@gmail.com;  
shvets2882@gmail.com; shtoykoog@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.130>

### **Березовецький С., Гуменюк Р., Швець О., Березовецька О., Коруняк П. Перспективи реорганізації машинобудівних підприємств у великі машинобудівні фірми України**

Стаття присвячена проблемі підвищення конкурентоспроможності українських машинобудівних підприємств, що є важливим завданням для забезпечення національної економіки сучасними технологічними засобами виробництва. Наголошено на необхідності забезпечення високої якості продукції машинобудування, яка визначає рівень попиту на вітчизняну техніку та її конкурентоспроможність на внутрішньому й міжнародному ринках. Проведено глибокий аналіз сучасного стану підприємств галузі та виявлено ключові фактори, які перешкоджають досягненню високої якості продукції. Окрема увага надається ролі організаційно-технологічних аспектів у забезпеченні інноваційного розвитку машинобудування та впровадженні передових методів виробництва, що базуються на світовому досвіді. Виявлено, що фірмові виробничо-технологічні системи є найефективнішими для забезпечення повного контролю над життєвим циклом продукції – від розробки до утилізації, що дозволяє досягати високих стандартів якості.

Аналіз історичних аспектів розвитку машинобудування в Україні вказує на проблеми, що виникли внаслідок розриву прямих зв'язків між виробниками і споживачами техніки. Визначено, що відмова від централізованого ремонтно-обслуговуючого виробництва призвела до погіршення якості технічного обслуговування і, відповідно, до зниження ефективності експлуатації техніки. У статті обґрунтовано, що відновлення прямих виробничо-технологічних зв'язків і застосування сучасних методів організації виробництва є ключовими умовами для підвищення якості та конкурентоспроможності української машинобудівної продукції.

Подано пропозиції щодо створення сприятливих умов для розвитку машинобудівних підприємств, зокрема шляхом законодавчого врегулювання питань якості та диверсифікації виробництва. Наголошено на важливості державної підтримки, спрямованої на стимулювання інновацій та підвищення якості продукції. Основний акцент зроблено на необхідності впровадження програмних заходів, які забезпечать зростання обсягів виробництва, підвищення технічних характеристик машин, а також розвиток технологічних систем, що забезпечать ефективну експлуатацію техніки протягом усього життєвого циклу.

**Ключові слова:** машинобудування, реорганізація, виробнича система, машинобудівні фірми, конкурентоспроможність, ефективність, розвиток, технологічний прорив.

### **Berezovetskyi S., Humeniuk R., Shvets O., Berezovetska O., Koruniak P. Prospects for the reorganization of machine-building enterprises into large machine-building companies of Ukraine**

The article focuses on the challenge of enhancing the competitiveness of Ukrainian machine-building enterprises, which is vital for equipping the national economy with modern production technologies. It emphasizes the necessity of producing high-quality machinery products to meet domestic demand and compete effectively in both national and international markets. An in-depth analysis of the current state of the industry identifies key factors that influence the production of high-quality products. The importance of organizational and technological aspects in fostering innovative development in machine building and promoting advanced production methods is highlighted. It has been determined that in-house manufacturing technology systems are the most effective for maintaining complete control over the entire product lifecycle, from development to disposal, which is crucial for achieving high-quality standards.

The historical analysis of machine building in Ukraine reveals challenges stemming from the breakdown of direct relationships between manufacturers and technology suppliers. It was observed that the introduction of centralized repair and maintenance services led to a decline in the efficiency of technical maintenance, which consequently reduced equipment effectiveness. The study has recognized that re-establishing direct production and technological links, along with the implementation of modern production organization methods, are essential for enhancing the efficiency and competitiveness of Ukrainian machinery products.

Moreover, it is crucial to follow the suggestions of experts focused on the development of machine-building enterprises, agriculture, and legislative regulations related to food supply and production diversification. The significance of government support for stimulating innovation and improving product quality is emphasized. The

article stresses the importance of adopting programmatic approaches to ensure increased production responsibilities, advancements in machine technical specifications, and the development of technological systems to enhance the effective operation of the equipment throughout its lifecycle.

**Keywords:** machine building, reorganization, production system, machine-building companies, competitiveness, efficiency, development, technological breakthrough.

**Постановка проблеми.** Для підприємств машинобудування України конкурентоспроможність є дуже актуальною, оскільки вона забезпечує машинно-технологічні виробництва всіх галузей країни сучасними технологічними машинами та обладнанням. Досягнутий рівень якості цих засобів визначає рівень їхньої конкурентоспроможності на українському ринку техніки, ефективність підприємств і галузей машинобудування. Необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності підприємств машинобудування є забезпечення виробництва сучасними продуктивними, якісними машинами та обладнанням відповідно до завдання виробничих потужностей [1].

Забезпечення якості вітчизняних машин та обладнання на рівні найкращих світових аналогів приводить до відмови споживачів від придбання дорогої імпоротної техніки та сприяє підвищенню попиту та обсягів виробництва вітчизняної техніки, створення умов для інноваційного розвитку підприємств машинобудування. Незважаючи на те, що технологічною основою інноваційного розвитку є застосування перспективних технологічних прийомів, методів і засобів, вони є лише засобами технологічного забезпечення виробництва і дозволяють отримати необхідний результат та ефективність тільки при правильному використанні в умовах оптимальної організації виробництва.

У сучасних умовах господарювання машинобудування є основою економіки будь-якої держави та відіграє вирішальну роль у створенні матеріально-технічної бази господарства. Випускаючи засоби виробництва для різних галузей народного господарства, машинобудування забезпечує комплексну механізацію й автоматизацію виробництва, водночас виконуючи важливу роль у прискоренні науково-технічного прогресу. При становленні та розвитку машинобудування через дефіцит якісних конструкційних матеріалів, ремонтно-технологічного обладнання, кваліфікованих робочих кадрів було дуже складно забезпечити високий рівень якості. Наприклад, для сільськогосподарського виробництва було прийнято рішення про створення допоміжних ремонтно-обслуговуючих виробництв – інженерно-технічної служби та машинно-тракторних станцій. Інженерно-технічні служби забезпечували працездатність технологічних машин та обладнан-

ня, а машинно-тракторні станції виконували ще й механізовані роботи та надавали послуги агропідприємствам. Задля більшої працездатності технологічного устаткування промисловості створено служби головного механіка підприємств.

Створення допоміжних ремонтно-обслуговуючих виробництв стало непереборною перешкодою на шляху підвищення якості та розвитку прямих виробничо-технологічних та економічних зв'язків між виробниками та споживачами техніки. У результаті розриву прямих зв'язків вимоги до якості техніки формували не споживачі, а посередники, які, навпаки, були зацікавлені в зростанні обсягів ремонтних робіт і, відповідно, невисокому рівні якості машин і обладнання, що випускаються. Згодом цей розрив посилювався зі створенням спеціалізованого ремонтно-обслуговуючого виробництва з великими ремонтними заводами, спеціальними ремонтними підприємствами, станціями технічного обслуговування та ремонту тощо.

Незважаючи на вимоги споживачів техніки, органів державного контролю та управління, належного та очікуваного підвищення рівня якості техніки, що випускається, дотепер не відбулося. Ще на нижчому рівні якості залишилося і виконання робіт з технічного обслуговування та ремонту машин та обладнання у процесі їх експлуатації. На початку 1990-х років це призвело до відмови споживачів техніки від послуг підприємств з технічного обслуговування та ремонту техніки і, як наслідок, до ліквідації ремонтно-обслуговуючого виробництва як самостійної галузі системи [2; 3].

Використання техніки, машин та устаткування за службовим призначенням супроводжується різними відмовами. Раптові відмови техніки, якщо вони відбуваються на морі, у повітрі, в космосі, в бойових умовах, можуть призвести до серйозних наслідків: не тільки втрат матеріальної частини, а й до трагедії, техногенної катастрофи. При виконанні виробничо-технологічних процесів у різних сферах економіки виникнення відмов техніки призводить, як правило, до економічних втрат ресурсів, продукції, доходу, погіршення показників ефективності виробництва [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні тенденції розвитку машинобудів-

вного комплексу України в своїх працях досліджували такі науковці: Дзюба М. І., Данилишин Б. М., Карачина Н. П., Романко О. П., Стадник В. В., Шапуров О. О., Чупир О. М., Черномазюк А. Г. та ін. [5-10]. Проте залишаються недостатньо вивченими питання сучасного стану машинобудівних підприємств України та перспективи реорганізації їх розвитку.

Глибокий ретроспективний аналіз розвитку машинобудування та підвищення якості техніки дозволив встановити пряму залежність поліпшення якості машин, що випускаються, від застосування прогресивних форм і методів організації виробництва, рівня його концентрації, спеціалізації та кооперації. Саме ці організаційно-технологічні аспекти та фактори визначають технологічні можливості підвищення якості продукції машинобудування зарубіжних виробників [12; 13].

**Постановка завдання.** Головною перевагою фірмової виробничо-технологічної системи є те, що вона забезпечує управління не тільки виробництвом машинобудівної продукції, а й усіма процесами від ідеї створення машини до її списання та утилізації. Практична реалізація цих завдань дозволяє зарубіжним фірмам стабільно забезпечувати максимально конкурентоспроможний рівень якості технологічних машин і обладнання, що випускаються, а також оцінити ефективність функціонування у напрямку забезпечення і підвищення якості продукції машинобудування всіх структур фірмової виробничо-технологічної системи на всіх етапах життєвого циклу машини (проектування, конструювання, виготовлення, експлуатації, утилізації або використання на вторинному ринку). Використовуючи отриману інформацію, зарубіжні фірми керують параметрами надійності машин, щоб надати дилерам певні можливості щодо реалізації послуг технічного сервісу, запасних частин та ремонтно-технічних матеріалів фірми.

**Виклад основного матеріалу.** Організаційно-технологічною основою машинобудівного виробництва є фірма. Незважаючи на наявність великої кількості інноваційних розробок, що забезпечують високу якість техніки: використання нових конструкційних матеріалів, прийомів, методів, технологій і технічних засобів, що їх реалізують, вони практично не застосовуються, залишаються незатребуваними. Із 35–40 тис. винаходів і патентів, щорічно реєструються в країні, тільки 7–10 % знаходять застосування у реальному масовому виробництві. Тоді як у високорозвинених зарубіжних економіках рівень використання машинобу-

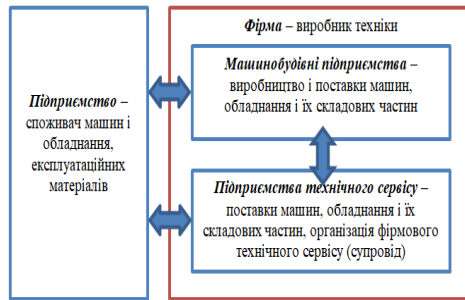
дівними фірмами патентів перевищує 25...45 % [12]. Це вказує на відсутність в Україні виробників машин та обладнання, реально зацікавлених у підвищенні якості своєї продукції до рівня кращих світових аналогів. Розробки багатьох НДІ та ВНЗ, винаходи та патенти залишаються незатребуваними – немає реального споживача інноваційної науково-технічної продукції. Ситуація, що склалася, вказує на необхідність реорганізації існуючої системи виробництва у машинобудуванні [13; 14].

Основною вимогою проведення організаційно-технологічних досліджень є забезпечення високої ступеня точності та достовірності результатів на всіх етапах роботи. Тому основними методами дослідження слугували сучасні методики обґрунтування та оптимізації параметрів, збору, систематизації й обробки вихідної та статистичної інформації про процеси виробництва і використання машин та обладнання за прямим призначенням, забезпечення їхньої працездатності та відновлення ресурсу; дослідження та оцінки параметрів потоків вимог на профілактичні роботи та раптові відмови; дослідження та оцінки процесів зношування відповідальних робочих поверхонь з'єднань (спряжень) деталей машин та обладнання, їх вузлів та агрегатів; моніторингу та аналізу процесів створення машин та їх використання, оцінки технічного стану та ефективності використання машин та обладнання в умовах реальної експлуатації при виробництві продукції [7; 9].

Основним завданням при реалізації на практиці мети досліджень – забезпечення конкурентоспроможного рівня техніки – є відновлення обсягів виробництва машин і обладнання та створення умов системного характеру, що радикально змінюють підходи і ставлення виробників до якості машин і обладнання, що випускаються. Випуск машинобудівної продукції з сьогоднішнім рівнем якості не тільки не підвищить престиж виробника, а й знизить ефективність виробничо-господарської діяльності споживачів техніки, що призведе до подальшого зниження попиту та цін на машини та обладнання та зниження ефективності машинобудівного виробництва. Тому доцільно від початку реалізації поставлених завдань розробити програму (розгорнутий план) їх вирішення та практичного впровадження. Результати проведених аналітичних досліджень, викладені раніше, дозволяють прийняти такі етапи та послідовність їх реалізації [8].

На початковому етапі необхідно розробити основні принципи (концепція) організації такої виробничої системи, яка гарантовано забезпечить досягнення поставленої мети рішенням

поставлених завдань. Як показує світовий досвід, найдоцільнішою та найефективнішою в умовах ринкової конкуренції є фірмова виробничо-технологічна система (рис. 1).



**Рис. 1.** Організація технічного обслуговування продукції фірми

**Fig. 1.** Organization of technical maintenance of the company's products

Основними перевагами такої системи перед іншими виробничими системами є самоорганізація та адаптація до конкретних ринкових умов та ситуацій, а також оперативне реагування на зміну ринкової кон'юнктури, наявність прямих зв'язків зі споживачами, концентрація та інтеграція зусиль для вирішення найважливіших у конкретний момент завдань та проблем, для забезпечення комплексності та системності за дотримання світового рівня якості машин та обладнання на всіх етапах життєвого циклу. Саме використання фірмової системи організації виробництва провідних виробників техніки забезпечило ефективне масове виробництво для всього світу високоякісної продукції машинобудування.

Отримані результати однозначно вказують на гостру необхідність радикального підвищення якості вітчизняної продукції машинобудування. Без вирішення проблеми підвищення якості неможливо вирішити проблеми конкурентоспроможності та інноваційного розвитку машинобудування, здійснити диверсифікацію та технологічну модернізацію виробництва, забезпечити ресурсозбереження тощо. Це вимагає принципової зміни, реорганізації існуючої системи виробництва. Враховуючи світовий досвід інноваційного розвитку машинобудування, можна дійти висновку про доцільність та необхідність реорганізації наявної організації виробництва та переходу на фірмові виробничо-технологічні системи. Фірми здатні сконцентрувати та забезпечити управління якістю продукції на всіх етапах життєвого циклу технологічних машин та обладнання – від ідеї створення до утилізації, у тому числі експлуатації [11].

Основною перевагою фірмових виробничо-технологічних систем на етапах проектування та конструювання машин є концентрація та інтеграція зусиль проектних і конструкторських організацій для отримання максима-

льно об'єктивних вимог до машини, що розробляється як з боку споживача, так і виробника в плані уніфікації виробів, застосування нових технологій та технічних засобів, що дозволяють забезпечити не тільки підвищення продуктивності, а й якості, собівартості виробництва техніки. На цьому етапі з'являється додаткова можливість підвищення якості виробів за рахунок коригування полів допусків розмірів; зменшення шорсткості поверхонь; підвищення точності розташування геометричних поверхонь; застосування високоточних засобів вимірювання та інших робочих поверхонь деталей відповідальних з'єднань. Як показує практика існуючого ремонтного виробництва, це забезпечує збільшення у 2,5-3 рази ресурс, довговічність цих спряжень. У напрямку підвищення точності виготовлення, збільшення їхнього ресурсу доцільно переглянути всі основні вузли та агрегати машин. Це дасть змогу забезпечити вже на першому етапі роботи безвідмовність машин на рівні чинних нормативів [12-13].

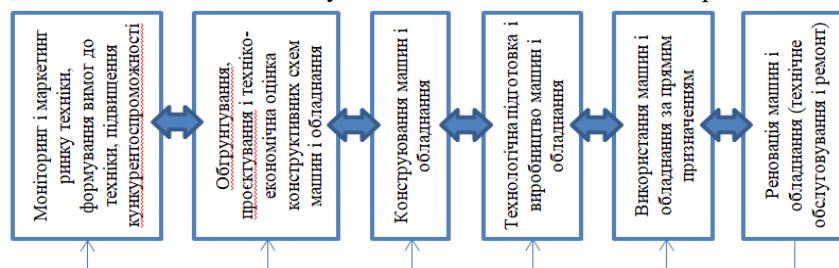
Для прискореного та ефективного вирішення проблеми підвищення якості техніки терміново потрібна не лише фінансова державна допомога, а й участь держави у реалізації цього проекту. Держава, володіючи наявними інноваційними науковими розробками та досвідом, повинна регулювати та стимулювати підвищення якості техніки. Узнявши за основу отримані результати справжніх організаційно-технологічних досліджень, необхідно на державному рівні визначити як пріоритетний напрямок розвитку машинобудування «підвищення якості продукції виробничо-технічного призначення до рівня кращих світових аналогів і вище», розробити законодавчо-правову базу, основоположні принципи та механізми вирішення проблеми.

Законодавчо-правова база повинна містити закони про захист прав споживачів техніки, про фірмовий інженерно-технічний супровід (забезпечення) використання машин за прямим призначенням, про ціноутворення на техніку світового рівня якості, про критерії оцінки якості та ефективності техніки та ін. Усі вони можуть бути об'єднані в єдиному законі «про підвищення якості продукції виробничо-технічного призначення до рівня кращих світових аналогів на основі реорганізації підприємств машинобудування у фірмові виробничо-технологічні системи та організації фірмового інженерно-технічного супроводу своєї продукції».

Організаційно-технологічні основи та організаційно-економічні механізми покликані забезпечити формування інноваційних систем,

їх оптимальне функціонування та обґрунтування виробничо-технологічних та економічних параметрів, взаємини між усіма учасниками систем, критерії та методи оцінки діяльності, орієнтуючи всі дії систем машинобудування на максимальне підвищення якості продукції. Стимулюючи так випуск конкурентоспроможної техніки, дотуючи машинобудівне виробництво для випуску техніки світового рівня якості, держава створює умови для його прискореного інноваційного розвитку. На цьому етапі важливо визначити напрями та ступінь диверсифікації виробництва. Найбільш доцільним є розширення сфери діяльності фірми – виробника техніки в напрямку розвитку технологічної спеціалізації у сфері інженерно-технологічного супроводу машин і обладнання, що випускаються нею, на всіх етапах їх життєвого циклу.

Управління процесами проєктування, конструювання, виготовлення та експлуатації



**Рис. 2.** Організація фірмового інженерно-технологічного супроводу продукції машинобудування  
**Fig. 2.** Organization of the company's engineering and technological support for machine-building products

У цьому змінюється коло функцій, виконуваних фірмовою системою технічного сервісу. Поряд з виконанням робіт та послуг з технічного сервісу, постачання запасних частин, ремонтно-технічних матеріалів та інших ресурсів для забезпечення працездатності парку технологічних машин та обладнання, на них повинні бути покладені функції моніторингу, маркетингу, контрольно-випробувальні (в умовах рядової експлуатації) та експериментально-дослідні, а також всі функції, які забезпечують отримання достовірної інформації про досягнутий рівень якості машин та обладнання, їх відповідальних деталей, вузлів, агрегатів (швидкості зношування робочих поверхонь, доцільні способи відновлення працездатності, підвищення ресурсу складових частин); підготовці аналітичних звітів, пропозицій, рекомендацій з усіх аспектів підвищення якості, надійності та ефективності машин; постійного оперативного зв'язку зі спеціальними структурами і службами фірми-виробника щодо вирішення поточних і перспективних питань, що виникають.

Для цього у складі фірми формуються маркетингові, проєктні, конструкторські, výro-

машин для оперативного впливу на якість продукції можливе тільки в рамках єдиної виробничо-технологічної системи, якою є фірма-виробник. При цьому всі інноваційні рішення, що закладаються на перших етапах життєвого циклу, оперативно контролюватимуть і коригуватимуть у процесі експлуатації машин у реальних виробничих умовах (рис. 2).

Забезпечення фірмового інженерно-технічного супроводу доцільно покласти на фірмову систему технічного сервісу. При використанні наявного ремонтно-обслуговуючого виробництва як фірмова система технічного сервісу необхідно попередньо скоригувати цілі та завдання її функціонування, критерії оцінки діяльності. Для цього можна використовувати наявні спеціалізовані ремонтно-обслуговуючі виробництва та підрозділи споживачів техніки, машин та обладнання, які можуть входити до складу машинобудівних фірм як залежні або незалежні їх технічні представники [2; 11].

бничі, інженерно-технологічні та інші структури, зусилля яких мають бути об'єднані та сконцентровані на вирішенні проблем якості. Фірма безпосередньо керує та контролює всі процеси створення та споживання своєї продукції, забезпечує не лише проведення моніторингу цих процесів, а й їх постійне вдосконалення, підвищує їх стабільність та ефективність, здійснює збір, систематизацію та обробку інформації, починаючи з визначення потреб реального виробництва та вимог споживачів до техніки; її технічного рівня; якості виготовлення; надійності та ефективності; до параметрів надійності, періодичності профілактичних робіт з технічного сервісу та напрацювань на відмови; ремонтно-придатності та інших факторів у реальних виробничих умовах експлуатації. З метою підвищення ресурсу машини фірма встановлює вимоги до якості виготовлення відповідальних робочих поверхонь за точністю розмірів та граничним відхиленням полів допусків, шорсткості поверхонь, їх геометричного розташування та інших параметрів; визначає фактичні швидкості зношування відповідальних робочих спряжених поверхонь.

Одночасно із зміною функцій наявних систем технічного сервісу мають бути змінені критерії оцінки їхньої діяльності. Головним оцінним показником замість обсягів виконуваних робіт і витрат на технічний сервіс мають стати показники надійності – справність (готовність) і безвідмовність (напрацювання на відмову). Досвід підприємств сільськогосподарського виробництва показує, що вже на першому етапі реалізації ці заходи в комплексі дозволяють збільшити у 3-4 рази напрацювання на відмову та до 0,85-0,88 коефіцієнт готовності парку технологічних машин та обладнання підприємства [14].

Підвищення якості та ефективності техніки забезпечує не тільки зростання її конкурентоспроможності та престиж України, а й ресурсозбереження. По-перше, високонадійної техніки знадобиться значно менше (на 30-40%); збільшення ресурсу машин пропорційно покращує показники ефективності використання виробничо-технічних ресурсів. По-друге, зниження простоїв технологічних машин та устаткування з технічних причин зменшує витрати і втрати споживачів під час виробництва продукції, робіт і надання послуг. По-третє, перехід структур системи технічного сервісу на нові критерії оцінки діяльності (справність і безвідмовність) забезпечує економію 20...25% виробничих ресурсів (енергії, запчастин тощо).

**Висновки.** Основні недоліки, що гальмують інноваційний розвиток машинобудівного виробництва та машинно-технологічних галузей:

- неконкурентоспроможний рівень якості продукції машинобудування, що багаторазово знижує споживчий попит на вітчизняну техніку в умовах ринку та конкуренції;
- зниження обсягів виробництва вітчизняних машин та обладнання нижче критичного рівня;
- наявність існуючої організації машинобудівного виробництва, незацікавленої у серйозному підвищенні якості продукції, що є основою прориву.

Необхідно реорганізувати наявні заводи-виробники, фірмові виробничо-технологічні системи (фірми).

Доцільно забезпечити участь і управління фірми у підвищенні якості техніки, що випускається на всіх етапах життєвого циклу; визначити напрямки диверсифікації виробництва, поклавши в основу розширення та поглиблення технологічної спеціалізації виробництва та сфери інженерно-технологічного забезпечення машинвикористання; доцільні критерії оцінки діяльності всіх структур фірми, що

забезпечують підвищення якості технологічних машин та обладнання рівня кращих світових аналогів.

### Бібліографічний список

1. Василюшин Т. Аналіз сучасного стану машинобудівної промисловості України та визначення основних проблем розвитку. *Галицький економічний вісник*. 2013. № 4 (43). С. 10–20.
2. Васильєва Н. Ф., Кавура В. Л. Машинобудування як матеріально-технічна основа неоіндустріальної економіки України. *Економіка промисловості*. 2014. № 4. С. 88–96.
3. Войтко С. В., Покрас О. С. Питання розвитку галузі приладобудування в Україні. *Економіка та держава*. 2019. № 3. С. 52–56.
4. Короткий Ю. В. Машинобудівна промисловість України: здобутки та перспективи. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія: Економіка та менеджмент*. 2015. № 11. С. 117–120.
5. Дзюба М. І. Аналіз стану машинобудівних підприємств України на зовнішніх та внутрішніх ринках. URL: <http://mevhnua.at.ua/load/2-1-0-91> (Дата звернення: 21.03.2024).
6. Карачина Н. П. Машинобудування України: сучасний стан, тенденції та перспективи розвитку за умов економічної кризи URL: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/vnulp/Management/2009\\_647/11.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/vnulp/Management/2009_647/11.pdf) (Дата звернення: 21.03.2024).
7. Чупир О. М. Тенденції розвитку машинобудівного комплексу України: сучасний стан і перспективи. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2013. № 43. С. 99–103.
8. Романко О. П. Чинники формування конкурентоспроможності машинобудівного підприємства. *Актуальні проблеми економіки*. 2009. № 3. С. 113–125.
9. Черномазюк А. Г., Стадник В. В. Сучасні тенденції розвитку вітчизняного машинобудування та його ресурсні детермінанти. *Вісник Запорізького національного університету*. 2010. №2 (6). С. 91–99.
10. Шапуров О. О. Стан і тенденції розвитку машинобудування. *Актуальні проблеми економіки*. 2009. № 3. С. 57–63.
11. Сирочук Н. А. Машинобудування України : стан, проблеми, перспективи в умовах виходу із фінансово-економічної кризи. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2011. № 3. С. 213–217.
12. Тарасова Н. В., Клименко Л. П. Ємельянов В. М. Промисловість України: тенденції, проблеми, перспективи : навч. посіб. Миколаїв: Чорноморський національний університет ім.

Петра Могили. 2010. 472 с.

13. Киридон А.М. Україна. 30 років незалежності. Стислий довідник. Київ: Державна наукова установа «Енциклопедійне видавництво», 2021. 536 с.

14. Шубна О. В. Сучасний стан, проблеми і перспективи розвитку машинобудівного комплексу України. *Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. №3 (24Е). С. 153–158.

*Стаття надійшла 20.04.2024*



УДК 623.437.446

## ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

*Василь Кохан<sup>1</sup>, к.т.н., Олександр Гончарук<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного*

*Вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, Україна,*

*e-mail: vdv29121973@gmail.com*

*<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка» Інститут поліграфії та медійних*

*технологій Вул. Підголоско, 19, м. Львів, Україна*

*e-mail: goncharuk131@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.137>

### **Кохан В., Гончарук О. Шляхи інтенсифікації процесу підготовки деталей для відновлення автомобільної техніки**

Війна російської федерації з Україною суттєво змінила технологічні процес підготовки колісної військової автомобільної техніки до відновлення робіт, ремонту і технічного обслуговування, через втрату стаціонарних ремонтних пунктів, баз, заводів. Згідно з аналізом наявних військових і цивільних ультразвукових установок і технологій очистки, що застосовуються для замочування і очищення паливних та ходових систем автомобілів, було виявлено низку важливих аспектів та недоліків у процесі роботи установок, які слід врахувати у розробці нових зразків. Такі ультразвукові установки часто використовуються для очищення деталей, що зазнають значного забруднення під час експлуатації, зокрема паливних форсунок, фільтрів, насосів, деталей ходової частини тощо і вимагають від ультразвукових установок: ефективності очищення, мобільності, енергоефективності; надійності і простоти в обслуговуванні, безпеки використання, а також урахування вимог щодо безпечного використання у військових умовах.

Запропонована нова технологія підготовки поверхні деталей ультразвуком для мобільних відновлювально-ремонтних підрозділів Сил оборони України. Нова технологія в поєднанні із запатентованою універсальною установкою будуть відповідати таким вимогам, зокрема:

- мати компактний та легкий дизайн для зручності транспортування і використання в польових умовах;
- працювати від стандартних джерел живлення, з можливістю автономного і мережевого живлення (від генераторів та інших альтернативних джерел);
- використовувати передові ультразвукові технології для глибокого замочування та очищення паливних систем і деталей ходової частини;
- бути оснащеною інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом для швидкого налаштування і використання без потреби в додатковій підготовці персоналу;

Універсальна ультразвукова установка з новою технологією очищення сприятиме підвищенню ефективності і якості виконання поставлених завдань та скороченню часу на відновлення автомобільної техніки в умовах бойових дій, що особливо актуально є для підрозділів, які займаються технічним обслуговуванням в польових умовах.

**Ключові слова:** відновлення, мобільний ремонт, ультразвук, військова автомобільна техніка.

### **Kokhan V., Honcharuk O. Enhancing the process of preparing parts for automotive equipment restoration**

The ongoing conflict between the Russian Federation and Ukraine has significantly altered the technological processes involved in preparing wheeled military automotive equipment for restoration, repair, and maintenance. This shift has been largely due to the loss of stationary repair stations, bases, and factories. An analysis of the existing military and civilian ultrasonic cleaning units, along with the technologies employed for soaking and cleaning fuel and running systems in vehicles, has highlighted several important aspects and shortcomings in their operational processes. These factors must be addressed in the development of new designs. Ultrasonic units are commonly used to clean heavily contaminated parts, such as fuel injectors, filters, pumps, and chassis components. Therefore, these units must meet the following requirements: cleaning efficiency, mobility, energy efficiency, reliability, ease of maintenance, safety of use, and considerations for safe operation in military conditions.

The authors propose a new technology for the surface preparation of parts using ultrasound for the mobile restoration and repair units of the Defense Forces of Ukraine. This innovative technology, combined with a patented universal unit, will fulfill several essential requirements, including:

- a compact and lightweight design for easy transportation and field usage;
- compatibility with standard power sources, allowing for both autonomous operation and connection to network power supplies (including generators and alternative energy sources);
- utilization of advanced ultrasonic technology for deep soaking and cleaning of fuel systems and chassis components;
- an intuitive interface that allows for quick setup and operation without the need for extensive training.

The universal ultrasonic unit, equipped with this new cleaning technology, will enhance the efficiency and quality of restoration tasks, significantly reducing the time required to repair automotive equipment in combat

conditions. This is particularly vital for units involved in maintenance operations in the field.

**Keywords:** restoration, mobile repair, ultrasound, military automotive equipment.

**Постановка проблеми.** Згідно з аналізом наявних ультразвукових установок, що застосовуються для обслуговування паливних та ходових систем колісних автомобілів, було виявлено низку недоліків, які слід врахувати при розробці нових рішень. Такі установки часто використовуються для очищення деталей, що зазнають значного забруднення під час експлуатації, зокрема паливних форсунок, фільтрів, насосів, деталей ходової частини тощо.

Загальні вимоги до ультразвукових установок для автомобільних систем повинні відповідати таким військовим критеріям:

1. «Ефективність очищення»: установка повинна забезпечувати глибоке очищення деталей від нагару, масел, сажі та інших забруднень, які важко усунути звичайними методами за короткої час.

2. «Мобільність»: особливо важливо для військових умов, де потрібна можливість швидкого переміщення та використання установки в польових умовах.

3. «Економічність»: пристрій має бути енергоефективним (енергоекономічним), щоб зменшити навантаження на джерела живлення в польових умовах.

4. «Надійність і простота в обслуговуванні»: установка повинна бути максимально надійною, стійкою до пошкоджень та легкою в ремонті.

5. «Безпека використання»: має враховувати вимоги щодо безпечного використання у військових умовах.

6. «Компактність та ергономічність» –

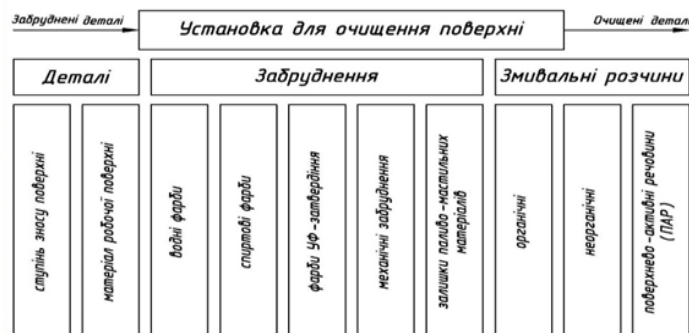
бути невеликими за розмірами, функціонально зручними та оптимальними для використання людиною.

Військовим підрозділам потрібна нова універсальна ультразвукова установка для мобільних відновлювально-ремонтних підрозділів Сил оборони України, яка б відповідала усім вимогам технологічного процесу підготовки деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений авторами аналіз літературних джерел [1–2], вебсайтів виробників і підприємств, що надають послуги [3–6], а також патентів [7–9], показав, що технологічний процес очищення деталей від забруднення характерний значною кількістю та трудомісткістю технологічних операцій, чималими енергозатратами та проблемами, що виникають із захистом здоров'я військовослужбовців, задіяних у цьому процесі [10].

При виборі способу очищення деталей зазвичай враховують будову, ступінь і вид забруднення поверхні самої деталі. Для видалення кожного з видів забруднень використовують відповідний змивний розчин, температурний режим і частоти ультразвуку.

Чистота поверхні деталей – одна з визначальних факторів якісної підготовки деталей до відновлення. З узагальненої схеми технологічного процесу очищення деталей, що представлена на рис. 1, бачимо, які складові процесу впливають на якість підготовки деталі до очищення і під час очищення деталі.



**Рис. 1.** Складові традиційного процесу очищення поверхні деталей

**Fig. 1.** Components of a traditional workpiece surface cleaning process

Зі схеми добре видно, що змивальні розчини є тією складовою процесу, які можуть варіюватися залежно від зміни інших складових аналізованого технологічного процесу [1–3].

Сьогодні є багато методів очищення автомобільних деталей та технологій їхньої реалізації, які детально висвітлено у спеціалізованих джерелах [1–6]. Учені дослідили наявні

способи очищення окремих компонентів і пристроїв, виявили фактори, що впливають на результати очищення [1–6], та запропонували конструкцію нової вітчизняної універсальної установки для ультразвукового очищення деталей. Попри високу вартість імпортного обладнання і технічно застарілого обладнання, виготовленого ще в СРСР, більшість

не гарантують необхідного рівня чистоти поверхонь, оскільки після очищення можуть залишатися залишки механічних, паливо-мастильних і лакофарбних забруднень.

**Постановка завдання.** Метою цього дослідження є вдосконалення ультразвукової установки для очищення зовнішньої і внутрішньої поверхні деталей і пристроїв шляхом замочування і змивання, а також удосконалення системи кріплення деталей, що дозволить під-

вищити ефективність технологічного процесу та забезпечити більшу чистоту деталей паливної системи і пристроїв ходової системи.

**Виклад основного матеріалу.** Вибір способу очищення визначається специфікою поверхні деталі і пристроїв, яка очищується і, значною мірою від характеру забруднень. Способи очищення деталей і пристроїв умовно можна розділити за різними класифікаційними ознаками (рис. 2.) [1–6].



**Рис. 2.** Класифікація способів очищення деталей та пристроїв  
**Fig. 2.** Classification of cleaning methods for parts and devices

На думку авторів, якісне очищення, підготовка деталей і пристроїв можливі лише при застосуванні автоматизації процесу з використанням комбінованих методів підготовки і очищення у поєднанні з компактним ультразвуковим обладнанням.

У зв'язку із цим розглянемо основні способи очищення деталей і пристроїв за природою (див. рис. 1).

Під хімічним способом розуміємо очищення деталей і пристроїв за допомогою спеціальних змивних засобів, основним компонентом яких є хімічно активні речовини. Такий спосіб полягає у розчиненні залишків бруду (наприклад, фарби) і, після чого продукти змивання необхідно видалити, для цього найчастіше застосовують струмінь води під тиском, тобто це вже механічний спосіб очищення поверхні вала [1–9].

Фізичні способи очищення можуть полягати в нагріванні активно змивальної речовини (АЗР) за допомогою тенів, що активно руйнують забруднення на поверхні деталей.

Популярне очищення деталей і пристроїв за допомогою ультразвукових хвиль (звукового тиску, кавітації, акустичних потоків, звукокапілярного ефекту, радіаційного тиску) [1–9].

Як бачимо, на практиці застосовують різноманітні способи очищення забрудненої поверхні деталей і елементи пристроїв. Більшість способів, що використовуються, характерні значною трудомісткістю, використанням агresi-

вних АЗР і високих температур, що потенційно небезпечно для здоров'я обслуговуючого персоналу. Водночас застосування ультразвуку є універсальним і безпечним технологічним методом та дозволяє збільшити продуктивність праці за менших затрат людських і матеріальних ресурсів.

Вважаємо, що застосування для очищення забрудненої поверхні деталей і пристроїв комбінованим фізико-хімічним способом очищення за допомогою одночасного застосування ультразвуку, температури та АЗР значно підвищує інтенсивність цього процесу, а також зменшує концентрацію застосовуваних хімікатів, скорочує час, необхідний для повного видалення забруднення, і зменшує собівартість очищення та збільшує його безпечність.

Отже, наявна науково-прикладна проблема очищення деталей потребує нових технологічних підходів і рішень з метою спрощення процесу очищення, зменшення енерговитрат за рахунок використання передових способів інтенсифікації процесів очищення, зменшення робочих площ і використання безпечних АЗР, які б не забруднювали навколишнє середовище та не мали негативного впливу на здоров'я персоналу [1–9].

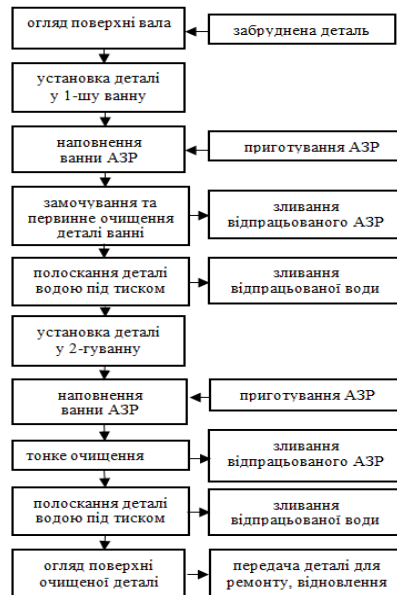
Перспективним щодо вдосконалення технологічного процесу очищення деталей і пристроїв може стати створення вітчизняного універсального обладнання для їх очищення за допомогою ультразвуку, покращення експ

луатаційних характеристик АЗР, що може суттєво удосконалити цей процес.

На рис. 3 зображено технологічну схему очищення деталей. На рис. 4 бачимо техно-



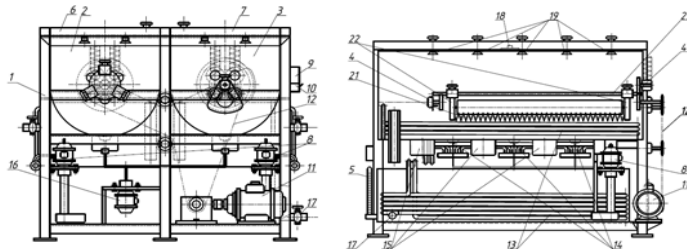
**Рис. 3.** Технологічна схема очищення деталей традиційним способом  
**Fig. 3.** Technological scheme of parts cleaning in the traditional way



**Рис. 4.** Технологічна схема очищення деталей запропонованим способом  
**Fig. 4.** Technological scheme of parts cleaning by the proposed method

Порівнюючи наведені технологічні схеми, можна дійти висновку, що запропонована технологія у поєднанні з ультразвуковим обладнанням, незважаючи на деяке збільшення операцій, може покращити якість очищення «чутливих» деталей за рахунок операцій замочування, змивання водою і оброблення деталей і пристроїв ще одним змивальним розчином.

Прикладом може бути створена авторами вискоелективна універсальна установка для очищення деталей і пристроїв ультразвуком (рис. 5), яка є інноваційним винаходом, що зменшує вплив людського фактора на технологічний процес, підвищує чистоту деталей, є можливість використання установки для відновлення деталей в авторемонтному виробництві.



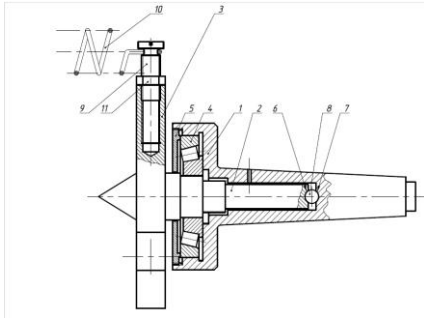
**Рис. 5.** Універсальна установка для очищення деталей амортизаторів, карбюраторів, паливних насосів, паливної апаратури ультразвуком [11]  
**Fig. 5.** Universal installation for cleaning shock absorber parts, carburetors, fuel pumps, fuel equipment with ultrasound [11]

**Рис. 5.** Universal installation for cleaning shock absorber parts, carburetors, fuel pumps, fuel equipment with ultrasound [14]  
**Fig. 5.** Universal installation for cleaning shock absorber parts, carburetors, fuel pumps, fuel equipment with ultrasound [14]

Установка складається з корпусу установки 1, ванни замочування та очищення 2, ванни тонкого очищення 3, вузлів кріплення 4, термодатчика 5, кришки ванни замочування та очищення 6, кришки ванни тонкого очищення 7, насоса подачі дистильованої води 8, сенсорного дисплея керування 9, двопозиційного перемикача вибору режиму роботи «Занурення» чи «Обертання» 10, електродвигуна 11, ланцюгової передачі 12, тінів підігріву змивного розчину 13, форсунок подачі повітря під тиском 14, генераторів ультразвуку 15, компресора 16, крана сливу відпрацьованих технологічних розчинів 17, замків блокування 18 кришки ванни, розпилювачів дистильованої води 19, знімних центрів для кріплення деталей 20, металевих пружин стиснення 21, кріплення деталей для занурення 22, знімного суцільнометалевого вала 23.

Особливістю універсальної установки є те, що вона працює у двох режимах («Занурення», «Обертання») і виконує три операції («Замочування», «Очищення», «Тонке очищення»). Для якісного очищення деталей і пристроїв в установці використовується запатентований

авторами винахід «Знімний центр з суцільним диском» (рис. 6), що покращує якість фіксації і закріплення деталей різних габаритів і форм, підвищену надійність та технологічність обробки деталей під час обертання.



Знімний центр з диском для кріплення деталей, містить корпус з конічним хвостовиком 1, шпindel з конічним наконечником 2 і диском 3, роликовий радіально-упорний підшипник 4, що служить опорою передньої частини шпинделя, кришку 5 з фетровим ущільнювачем, який вкручений у корпус 1, одночасно захищаючи підшипник від забруднення та витікання мастила, а також, упираючись у торець зовнішнього кільця підшипника 4, регулює внутрішній зазор у ньому. У хвостовику шпинделя 2 і в корпусі 1 виконані виїмки (заглиблення) у формі півсфер 6 і 7, куди встановлена кулька 8, що слугує опорою задньої частини шпинделя. Крім того, шпindel містить регулюючі стійки-тримачі 9 для пружин розтягу 10, і контргайки 11.

**Рис. 6.** Знімний центр із суцільним диском для кріплення деталей, що потребують технологічної обробки [12; 15]

**Fig. 6.** Removable center with a solid disk for mounting workpieces requiring machining [12; 15]

Використання універсальної установки забезпечує вказаний технічний результат і може бути впроваджено у відновлених підрозділах Сил оборони України у підготовці деталей і приладів до відновлення і ремонту. І підтвердженням цього є отримання колективом науковців-винахідників диплома першого ступеня у номінації «Автомобільна техніка» на конкурсі «Кращий винахід року».

**Висновки.** Вибір способу, методу і обладнання очищення залежить від: виду забруднення; необхідної чистоти поверхні; впливу змивного розчину на матеріали поверхні вала; наявності змивального обладнання, його конструкції і ступеня механізації; санітарно-гігієнічних і економічних вимог.

#### Бібліографічний список

1. Кохан В.Ф. Можливості використання ультразвукових коливань в інтенсифікації процесів поліграфічного виробництва. *Поліграфія і видавнича справа*. Львів, 2011. № 4. С. 101–104. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pivs\\_2011\\_4\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pivs_2011_4_16) (дата звернення: 01.09.2024).
2. Луговський О. Ф., Гришко І. А., Зілінський А. І., Шульга А. В., Мовчанюк А. В., Берник І. М. Л83 Ультразвукові кавітаційні технології. *Знезараження та фільтрування*: монографія. Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. 268 с.
3. Послуги ультразвукового очищення забруднень будь-якої складності!. *UCS*. URL: <https://ultrasonic.in.ua/ua> (дата звернення: 01.09.2024).
4. Ультразвукові ванни. *Masteram*. URL: [https://masteram.com.ua/uk/catalogue/ultrasonic-cleaning/ultrasonic-cleaners/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjwurS3BhCGARIsADdUH50hpkHW6KerHbQPeRTZ0uoN217TmVOH8zclZ1m01WvY4OnsEfwz0LYaAsz3EALw\\_wcB](https://masteram.com.ua/uk/catalogue/ultrasonic-cleaning/ultrasonic-cleaners/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwurS3BhCGARIsADdUH50hpkHW6KerHbQPeRTZ0uoN217TmVOH8zclZ1m01WvY4OnsEfwz0LYaAsz3EALw_wcB) дата звернення: 03.09.2024).
5. Стандартні УЗВ мийки (до 100 л.). *Unichem*. URL:

[https://unichem.com.ua/uk/standartnie\\_uzv\\_moiki\\_do\\_100\\_l](https://unichem.com.ua/uk/standartnie_uzv_moiki_do_100_l) (дата звернення: 03.09.2024).

6. Ультразвукове обладнання і технології. *ТОВ "ПУТЕК"*. URL: <https://ultrasonic.com.ua/> (дата звернення: 10.09.2024).

7. Спосіб вводу ультразвукових коливань до розплаву зварювальної ванни: пат. 41533 Україна: МПК В06В 3/00, В23К 26/00 Опубл. 25.05.2009; Бюл. № 10. 4 с.

8. Laser/ultrasonic welding technique: Пат. 4330699 США, МКИ В23 К26 Michael M. Farrow (США); Boulder, CO. – № 61350; Заявл. 27.07.1979; Опубл. 18.05.1982. 5 с.

9. Спосіб ультразвукової очистки деталей: пат. RU РФ №2429920 С1, МПК В 08, В 3/12; заявл. 23.04.2010; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 20. 4 с.

10. Шкідливий вплив ультразвуку на здоров'я працюючих та його профілактика. *Охорона праці*. URL: <https://oppb.com.ua/news/shkidlyvyuy-vplyv-ultrazvuku-na-zdorovya-pracyuyuchyh-ta-yogo-profilaktyka> (дата звернення: 10.09.2024).

11. Універсальна установка для очищення деталей амортизаторів, карбюраторів, паливних насосів, паливної апаратури ультразвуком : пат. на корисну модель 153694 Україна, В 08 В 3/12, № u202203275; заявл. 07.09.2022 ; опубл. 16.08.2023 Бюл. № 33. 4 с.

12. Знімний центр з суцільним диском для кріплення деталей, що потребують технологічної обробки : пат. на корисну модель 153696 Україна, МПК В23В23/04; В08В3/12, № u202203950; заявл. 24.10.2022; опубл. 16.08.2023 Бюл. № 33/2023. 4 с.

Стаття надійшла 10.09.2024

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ. УПРАВЛІННЯ  
ПРОЄКТАМИ ТА ПРОГРАМАМИ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

---

УДК 004.738

ВИКОРИСТАННЯ ОНЛАЙН СЕРВІСІВ НАВЧАННЯ ІЗ ШТУЧНИМ  
ІНТЕЛЕКТОМ

*Віталій Фіялковський, Христина Мозуль, Святослав Штогрин,  
Павло Луб, к. т. н., Любомир Чухрай, к. ф.-м. н.*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: vitalik.fyalkovsky@i.ua, kristinamozul@gmail.com, sviatoslav.shtohryn@gmail.com,  
pollylub@ukr.net, l.chukhrai@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.142>

**Фіялковський В., Мозуль Х., Штогрин С., Луб П., Чухрай Л. Використання онлайн сервісів навчання із штучним інтелектом**

Узагальнено досвід, переваги та недоліки використання ШІ-технологій в освіті. Проаналізовано сучасний стан використання штучного інтелекту в освіті. Проаналізовано сучасні аналоги ШІ та обґрунтовано доцільність їхнього використання. Описано сервіси для онлайн навчання із технологіями ШІ, які користуються популярністю як в навчальних закладах, так і у виробничих компаніях. Основну увагу приділено таким мовним моделям та сервісам як Chat GPT, Microsoft Gemini та «На Урок». Акцентується на тому, що ШІ може надавати інформацію та відповіді на запитання з різних предметів, допомагаючи розширити свої знання тощо. Наведено перелік завдань у вищій освіті, до яких доцільно застосовувати ШІ-технології, що спрощуватиме і робитиме більш цікавим навчання студента та роботу викладача. Наведено переваги та недоліки окремих онлайн сервісів для навчання, що використовують ШІ-технології, узагальнено показники їхньої точності, надійності та простоти використання. Наголошено на тому, що незважаючи на недоліки наявних ШІ, вони мають значні переваги перед ручним пошуком потрібної інформації, включаючи збір даних у режимі реального часу, підвищену точність і порівняно нижчий рівень невідповідності. Використання розглянутих інструментів ШІ у навчальному процесі дає змогу підвищити коректність запитів, точність збору даних та, відповідно, підвищити коректність отриманої інформації для навчального контенту. Встановлено, що використання ШІ має великий потенціал для розвитку освітнього процесу. Підкреслено загальноосвітню зацікавленість ШІ-технологіями у виробничій сфері, яка має зростаючу тенденцію. Таку тенденцію логічно пов'язано із вимогами до знань студентів, що в майбутньому знадобиться у їх кар'єрній діяльності. Встановлено, що використання ШІ має великий потенціал для підвищення ефективності освітнього процесу і не тільки.

**Ключові слова:** онлайн сервіс, навчання, штучний інтелект, аналіз, використання, Chat GPT, Gemini.

**Fialkovskiy V., Mozul Kh., Shtrohryn S., Lub P., Chukhrai L. Using online learning services that incorporate artificial intelligence**

The text summarizes the experiences, advantages, and disadvantages of using AI technologies in education. It analyzes the current state of artificial intelligence in this field and evaluates various modern AI equivalents, justifying their potential use. The overview includes popular online learning services that incorporate AI technologies, utilized by both educational institutions and manufacturing companies. The focus is primarily on language models and services such as ChatGPT, Microsoft Gemini, and Na Urok. It highlights how AI can provide information and answers across various subjects, thereby helping to expand knowledge. The authors also outline a list of tasks in higher education where AI technologies can be effectively applied, making learning more engaging for students and easing the workload for teachers. The text discusses the advantages and disadvantages of specific online learning services that employ AI technologies, summarizing their accuracy, reliability, and ease of use. Despite certain shortcomings of existing AI, it emphasizes its significant advantages over traditional information searches, including real-time data collection, enhanced accuracy, and reduced inconsistency. The incorporation of these AI tools in the educational process can improve query correctness, data collection accuracy, and, consequently, the quality of information obtained for educational content. It concludes that AI holds considerable potential for advancing the educational process and its efficiency. Additionally, the authors note the growing global interest in AI technologies within the manufacturing sector, linking this trend to the future knowledge requirements for students. Ultimately, it is established that the use of AI can significantly enhance the effectiveness of both the educational process and other areas.

**Keywords:** online service, learning, artificial intelligence, analysis, use, Chat GPT, Gemini.

**Постановка проблеми.** У галузі освіти існують різноманітні виклики, які сьогодні вирішують за допомогою впровадження штучного інтелекту (ШІ). Одним із обмежень на шляху вирішення цього завдання є нерівний доступ до технологій ШІ у навчальних закладах. Заклади освіти мають обмежені ресурси та технічні можливості для впровадження цих технологій. Водночас це формує потребу до відповідної підготовки викладачів, що дасть змогу ефективно використовувати технології ШІ у навчальному процесі, а також потребу розробляти рішення ШІ, які відповідають конкретним освітнім завданням і реаліям навчального закладу. Окрім того, впровадження технологій ШІ може привести до перегляду системи оцінювання роботи студентів, перевірки доброчесності, етичних питань використання ШІ тощо. Це веде також до перегляду критеріїв та методів оцінювання успішності студентів, які б давали змогу відрізнити самостійну роботу студента від роботи студента із використанням ШІ як корисного помічника.

Отже, використання ШІ в освіті відкриває нові можливості для покращення навчального процесу, забезпечуючи індивідуалізацію, підтримку та ефективність навчання. Розвиток та вдосконалення таких систем значно спрощуватиме і підніматиме рівень сучасної освіти.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** свідчить про те, що ШІ має значний потенціал для підвищення рівня освіти у багатьох аспектах [1; 6]. ШІ може адаптувати навчальний процес до потреб і темпу кожного студента, надаючи персоналізовані завдання, пояснення та оцінювання. Інтерактивні та ігрові методи навчання, засновані на ШІ, можуть зробити освітній процес більш цікавим і захоплюючим, автоматизувати рутинні завдання, зокрема перевірка роботи студентів, оцінювання та планування занять тощо. Такі технології робитимуть освіту більш доступною для людей із особливими потребами [7-9].

**Постановка завдання.** Наше завдання – проаналізувати досвід використання ШІ в освітньому процесі на прикладі таких інструментів як Chat GPT, Gemini, «На Урок»; поширення ШІ інструментів в освіті, визначити тенденцію використання застосування ШІ світовими компаніями, побудувати таблицю переваг та недоліків різних ШІ застосувань.

**Виклад основного матеріалу.** З розвитком технологій штучний інтелект (ШІ) стає необхідним інструментом для вдосконалення освітнього процесу. Його використання може

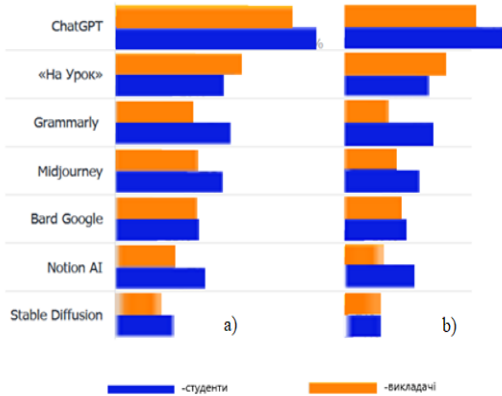
значно полегшити завдання освітян, забезпечити персоналізоване навчання та підвищити якість освіти загалом. Однією із ключових переваг використання ШІ є здатність адаптувати навчальний матеріал до індивідуальних потреб студентів. Окрім того, інструменти ШІ-технологій можна скерувати на аналіз успішності та врахувати особливості кожного студента, надаючи персоналізовані завдання та матеріали. ШІ може значно спростити процес оцінювання завдань та тестів [11]. Автоматизовані системи здатні швидко та об'єктивно оцінити відповіді, надаючи докладні результати та вказівки для покращення вирішення завдань у лабораторно-практичних роботах. Застосування ШІ передбачає створення віртуальних асистентів та чат-ботів, які можуть надавати підтримку студентам. Вони відповідають на питання, надають пояснення та допомагають зрозуміти складні концепції. ШІ дозволяє створювати електронні портфоліо для кожного користувача, автоматично відстежуючи їхні досягнення та прогрес. Це допомагає викладачам та батькам отримувати чітку картину академічного розвитку студента. ШІ дозволяє збирати дані та взаємодіяти з користувачами для постійного вдосконалення навчального процесу.

Очевидно, що типові реферати чи лабораторні роботи ШІ-застосунки можуть виконувати «на відмінно», тому такий тип завдань має залишитися у минулому. Натомість задачі, які вимагають аналізу, індивідуального підходу та критичного мислення, мають займати все більшу частку навчального процесу. Важливо навчити студентів не просто повторювати наявні ідеї, а використовувати їх як основу для творчого розв'язку поставлених завдань [10].

У цьому сенсі ChatGPT і подібні застосунки відкривають додаткові можливості для студентів та освітян. Наприклад, викладач курсу ІТ може запропонувати слухачам завдання згенерувати ідеї для стартапу за допомогою ШІ, проаналізувати та обрати найкращі з них, що сприятиме розвитку творчих та аналітичних навичок студентів. Робота над завданнями, які не мають чіткої правильної відповіді та стимулюють критичне мислення, є важливою у такому контексті використання ШІ в навчальному процесі. Підходи, де аргументована дискусія та аналіз різних позицій, при формуванні яких ШІ-інструменти виступають лише помічниками в зборі інформації – мають бути в основі відповідних завдань студентам. ChatGPT може відповідати на запитання та допомагати у генерації ідей, проте він не є надійним джерелом інформації і не може замінити критичне мислення та самостійний аналіз. Викорис-

товувати ChatGPT для швидкого збору інформації та первинного аналізу, а потім самостійно готувати доповідь на її основі – це позитивний приклад ефективного використання інструменту. До того ж такі кейси використання ШІ в українській освіті вже є, для прикладу «На Урок» [15]. Однак, важливо усвідомлювати, що недостатня перевірка наданої ШІ інформації може призвести до хибних висновків і неправильного тлумачення будь-якої теми [14].

Для практичного використання ШІ в навчальному процесі викладачу необхідно мати певні знання із програмування та аналізу даних, навички створення інтерфейсів та взаємодії з користувачами, а також розуміння етичних питань пов'язаних із застосуванням ШІ в освіті, збереження конфіденційності даних, розуміння принципів створення адаптивних освітніх систем, які враховують індивідуальні потреби студента, здатність генерувати та впроваджувати інновації, швидка адаптація до нових технологій у сфері ШІ тощо [1; 18-21].



**Рис. 1.** Поширення ШІ-інструментів в освіті [1]: а – знають про застосунок; б – користувались застосунком ШІ

**Fig. 1.** The spread of AI tools in education [1]: a – know about the application; b – used an AI application.

Аналізуючи відомості щодо використання ШІ в освітніх процесах, зокрема мовних моделей Chat GPT, Gemini, «На Урок», стає зрозумілим, що ШІ може надавати інформацію та відповіді на запитання з різних предметів для удосконалення своїх знань, зокрема допомагати розв'язувати математичні задачі, фізичні вправи, літературні аналізи; пояснювати складні теоретичні концепції з різних предметів; допомагати у вивченні мов, надаючи правильні переклади, вправи та пояснення граматичних правил; надавати відомості з програмування, допомагати студентам розуміти алгоритми та вдосконалювати навички з ІТ; формувати навички під час самостійного навчання, надаючи відповідні рекомендації та ресурси; сприяти творчому мисленню, допомагаючи генерувати

ідеї та реалізовувати творчі проекти; пропонувати цікаві факти, історії та завдання для концентрування уваги тощо (рис. 1).

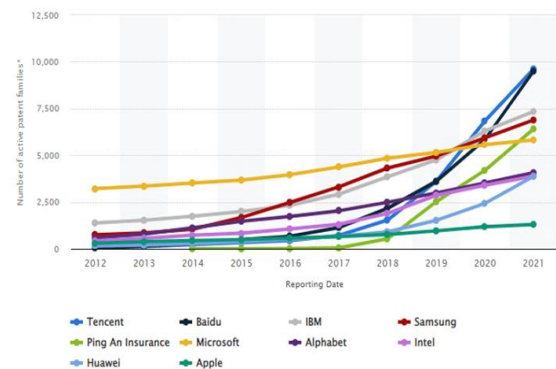
Аналізуючи відомі показники залученості застосунку ШІ «На Урок» [9; 13; 15], де майже 85% користувачів мали досвід його використання, стає зрозумілим, що 75% із них отримали позитивні враження і лише 6% були незадоволені роботою.

Окрім того, загальносвітова увага до використання застосунків ШІ у виробничій сфері з роками стає дедалі більшою (рис. 2). Очевидно, що студенти повинні також володіти навичками використання ШІ для того, щоб у майбутньому використовувати у своїй кар'єрній діяльності.

Кожен із сервісів, що використовує ШІ, має свої переваги та недоліки (табл. 2), а їх вибір залежить від користувача. Більшість ШІ можна поєднувати в єдину систему моніторингу для досягнення кращих результатів.

Із використанням зазначених ШІ пропонується кілька варіантів для підвищення точності роботи з ним. Крім того, використовуючи їх комбінацію, можна реалізувати більш точне використання у певній сфері взаємодії. Ці застосунки можуть допомогти вирішити потенційні задачі та забезпечити точний моніторинг виконання поставленого завдання. Однією з переваг використання ШІ [9; 14] для викладів є спосіб отримання нової інформації у певній галузі та надання унікальних порад щодо їх впровадження. Для студентів це спосіб дізнатись щось нове, відкрити більше інформації для себе у навчанні.

Проте одним із недоліків ШІ [4] в освіті є сильне спрощення навчання для студента. Це призводить до того, що студенти перестають власноруч шукати відповіді на завдання та все більше звертаються за цим до ChatGPT.



**Рис. 2.** Тенденції використання застосунків ШІ різними світовими компаніями [2]

**Fig. 2.** Trends in the use of AI applications by various global companies [2]



З іншого боку, застосунки ШІ ще не досконалі, тому їх інформацію необхідно перевіряти. Сервіси, які частково використовують ШІ в освіті, наведено у табл. 1 [5].

**Таблиця 1.** Сервіси онлайн навчання із технологіями ШІ  
**Table 1.** Online learning services with AI technologies

Сервіси з онлайн навчанням	Використання ШІ
Khan academy	Адаптивна платформа для онлайн-навчання
Duolingo	Вивчення мови за допомогою ігрового процесу
Socratic by Google	Чат-бот, який допомагає у виконанні домашніх завдань
DreamBox Learning	Персоналізоване навчання математиці
Brainly	Платформа для онлайн-навчання, де можна ставити запитання та отримувати відповіді від інших користувачів

**Таблиця 2.** Переваги та недоліки застосунків ШІ  
**Table 2.** The advantages and disadvantages of AI

Різновид ШІ	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
Chat GPT	Швидка інформаційна обробка: Можливість швидкої обробки та аналізу величезних обсягів інформації.	Відсутність інтуїції: Неприсутність емоційної інтуїції та розуміння соціальних контекстів.	Медицина: Діагностика, розробка ліків, персоналізована медицина.
	Гнучкість: Здатність адаптуватися до різних завдань та контекстів.	Залежність від програмування: Робота лише в рамках заздалегідь заданих правил та алгоритмів.	Фінанси: Аналіз ринків, прогнозування, ризик-менеджмент.
	Неперервність роботи: Працездатність у безперервному режимі без втоми.	Залежність від Даних: Потреба у великих обсягах якісних даних для ефективного функціонування.	Освіта: Персоналізовані програми навчання, системи електронного навчання.
	Точність та Консистентність: Здатність виконувати завдання з високою точністю та консистентністю.	Обмежена Креативність: Обмежена здатність до творчого мислення та новаторства.	Технології: Розробка та оптимізація алгоритмів, робототехніка.
	Навчання на великих даних: Здатність виникати з користю з великих обсягів даних та виявляти закономірності.	Етичні Питання: Потенційні етичні проблеми, пов'язані з використанням в різних сферах життя.	Бізнес та Менеджмент: Аналітика, автоматизація бізнес-процесів, прийняття рішень.
Gemini	Може отримувати доступ до інформації з реального світу та обробляти її за допомогою Google Search, а також підтримувати відповідність моєї відповіді результатам пошуку.	Зловживання: Можна використовувати в шкідливих цілях, наприклад, для поширення дезінформації або створення фейкових новин.	Може використовуватися для навчання людей різним предметам, надаючи інформацію, відповідаючи на запитання та генеруючи навчальні матеріали.
	Постійно навчається та вдосконалюється, завдяки чому може краще обслуговувати своїх користувачів.	Може бути упередженим у своїх відповідях, залежно від даних, на яких я навчався.	Може використовуватися для дослідження нових ідей та генерування нових гіпотез.

Узагальнюючи вищенаведене, необхідно зазначити що використання застосунків ШІ в освіті піднімає множинну завдань для навчальних закладів, які стосуються не тільки розробки нових предметів, що скеровані на правильне використання цих технологій, але й коректного їх використання студентами для здобуття нових знань та вмінь [12]. Університети так само можуть використовувати ШІ для навчання студентів з особливими потребами. Інструменти використання ШІ мають вбудовану безпеку даних для користувачів з метою захисту їх даних пошуку і безпеки інтерактивного зв'язку студента та викладача.

**Висновки.** 1. Використання ШІ-технологій в освітньому процесі відкриває нові можливості для отримання знань; зміни підходів у навчанні; індивідуалізацію; підтримку та інформаційний супровід студента завдяки розумній системі, яка також здатна паралельно вчитися. Розвиток та вдосконалення таких систем вагомо спрощуватиме і підніситиме як рівень вимог до студента, викладача, навчального середовища, так і рівень сучасної освіти загалом.

2. Через те, що мовні моделі на зразок Chat GPT, є загальнодоступними, «можуть вчитися» та значно спрощують пошук інформації студентам, їх популярність серед академічної молоді дедалі зростатиме. Такі процеси необхідно скеровувати в сторону спільного позитивного ефекту як для студента чи викладача, так і для навчального закладу загалом. Окрім того, загальносвітова увага до використання застосунків ШІ у виробничій сфері стає дедалі більшою, тому молоді працівники повинні також володіти ШІ-технологіями у своїй професійній діяльності.

3. У результаті виконаного аналізу щодо сфери використання, переваг і недоліків застосунків ШІ встановлено, що більшість їх може використовуватися під час вивчення різних дисциплін на різних спеціальностях із опрацюванням відповідних запитів, наданням відповідей та генеруванням навчального контенту.

#### Бібліографічний список

1. 5 способів, якими штучний інтелект вже використовується в освіті URL: <https://futurenow.com.ua/5-prykladiv-shtuchnogo-intelektu-u-shhodennomu-zhytti/> (дата звернення 05.03.2024)

2. Блог «ШІ в освіті» URL: <https://ms.detector.media/internet/post/32898/2023-09-07-yunesko-rozroblyla-porady-shchodovykorystannya-shi-v-osviti/> (дата звернення 05.03.2024)

3. Візнюк І.М., Буглай Н. М., Куцак Л. В., Поліщук А. С., Киливник В. В. Використання штучного інтелекту в освіті. Вінниця, 2021. № 59. С. 14-22

4. Гончарова І. П. Використання штучного інтелекту в професійній діяльності педагога: можливості та виклики в умовах цифрового освітнього середовища. Професійна діяльність педагога в умовах цифрового освітнього середовища: *матеріали міжрегіонального науково-практичного семінару*. Біла Церква: БІНПО ДЗВО «УМО» НАПН України, 2023. С. 28-33.

5. Драч І., Петрос О., Бородієнко О., Регейло І., Базелюк О., Базелюк Н., Слободянюк О. Використання штучного інтелекту у вищій освіті. Міжнародний науковий журнал «Університети і лідерство». Київ, 2023. №15. С. 66-82.

6. Коломієць А. М., Кушнір О. І. Використання штучного інтелекту в освітній та науковій діяльності: можливості та виклики. Київ, 2024. № 70. С. 45-57.

7. Корнелл Р., Кузьміна І. Персоналізоване навчання за допомогою штучного інтелекту. Хам, Швейцарія. 2023. 328 с.

8. Ковальчук С., Заболотної О., Ковтун І. Штучний інтелект та освіта: український контекст. Київ: Лілея-НВ. 2021. 224 с.

9. Лозов І., Петренко О. Використання штучного інтелекту в освіті: посібник для вчителів. Київ: Лілея-НВ. 2023. 184 с.

10. Мовчан А. Школа майбутнього: як штучний інтелект змінює освіту. Київ: Наш формат. 2020. 288 с.

11. Сайт «Інститут штучного інтелекту в освіті». URL: <https://www.ipai.net.ua/> (дата звернення 05.03.2024)

12. Спецпроект «Освіта 4.0». URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/ministr-osviti-i-nauki-ukrayini-prezentuvav-programu-velikoyi-transformaciyi-osvita-40-ukrayinskij-svitanok> (дата звернення 05.03.2024)

13. Чи може штучний інтелект замінити вчителів? URL: <https://vseosvita.ua/news/chy-zmozhe-shtuchnyi-intelekt-zaminyty-vchytelia-6235.html> (дата звернення 05.03.2024)

14. Штучний інтелект: революція в освіті? URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2024/01/29/709270/> (дата звернення 05.03.2024)

15. Штучний інтелект в освіті: три аспекти: <https://osvita.ua/school/method/91077/> (дата звернення 05.03.2024)

16. Штучний інтелект допомагає учням визначити майбутню професію. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/shtuchnij-intelekt->

dopomagaye-uchnyam-viznachiti-majbutnyu-profesiyu (дата звернення 05.03.2024)

17. Штучний інтелект допомагає учням визначити майбутню професію. URL: <https://mon.gov.ua/ua/news/shtuchnij-intelekt-dopomagaye-uchnyam-viznachiti-majbutnyu-profesiyu> (дата звернення 05.03.2024)

18. Як ШІ впливає на систему освіти. URL: <https://www.facerua.com/iak-shi-vplivaie-na-sistemu-osviti/> (дата звернення 05.03.2024)

19. Ahram T. Artificial Intelligence in Education: Challenges and Opportunities for Sustainable Development. Cham, Switzerland, 2023. 349 p.

20. *Artificial Intelligence in Education*. 19th International Conference. London, UK. 2018. P. 152-160.

21. Azevedo R., Moos D. AI in Education: Promise and Implications for Teaching and Learning. Leiden, Netherlands, 2018. 42 p.

22. Luckin R. Artificial Intelligence in Education. London, 2020. 224 p.

23. Milner-Bolotin M. The Role of Artificial Intelligence in Education: Perspective of Educational Developers. Cham, Switzerland. 2023. 210 p.

24. Moos D., Azevedo R. Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning. Cham, Switzerland. 2018. 150 p.

*Стаття надійшла 27.09.2024*

УДК 004.056: 338.242.4

## ВПЛИВ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ПРОЦЕСИ ІНІЦІАЦІЇ ТА ПЛАНУВАННЯ ПРОЄКТІВ РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА РЕГІОНІВ

*Анатолій Тригуба<sup>1</sup>, д. т. н., Оксана Маланчук<sup>2</sup>, к. ф.-м. н., Інна Тригуба<sup>1</sup>, к. с.-г. н., Анна Мармуляк<sup>3</sup>, аспірантка, Василь Демчина<sup>3</sup>, ад'юнкт, Олег Андрушків<sup>3</sup>, здобувач, Роман Олійник<sup>3</sup>, здобувач*

<sup>1</sup> Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,

<sup>2</sup> Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького,  
вул. Пекарська, 69, м. Львів, Україна,

<sup>3</sup> Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,  
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна,

*e-mail: trianamik@gmail.com; oksana.malan@gmail.com; trinle@ukr.net;  
anya.marmulyak@gmail.com; demchynavasy@gmail.com; andruskivoleg6@gmail.com;  
oliinykroman186@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.148>

**Тригуба А., Маланчук О., Тригуба І., Мармуляк А., Демчина В., Андрушків О., Олійник Р. Вплив сучасних інформаційних технологій на процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів**

Проаналізовано стан розвитку громад та регіонів. Встановлено потребу реалізації проєктів, управління якими потребує використання різноманітних інформаційних технологій. Виявлено потребу розроблення підходу до визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів. Наведено особливості використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами. Запропоновано оцінювати рівень інформаційного розвитку проєктних офісів на підставі аналізу взаємодоповнювальних процесів діджиталізації, цифровізації та цифрової трансформації. На основі цього класифіковано проєктні офіси на три рівні розвитку. Встановлено, що використання сучасних інформаційних технологій для виконання процесів ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів має свої особливості. Вони відображаються управлінськими операціями збору та аналізу великих обсягів даних.

Запропонований підхід до визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів. Він передбачає визначення показників швидкості доступу до інформації, покращення якості ухвалення рішень проєктними менеджерами та рівня інформаційного розвитку проєктних офісів. Використання запропонованого підходу забезпечує врахування особливостей формування даних про показники проєктного середовища. Вони покладені в основі вибору інформаційних технологій, які забезпечать ефективну реалізацію проєктів розвитку громад у різних сферах із оптимальним використанням ресурсів та досягненням стратегічних цілей розвитку громад та регіонів.

На підставі використання запропонованого підходу кількісно оцінено показники та рівень інформаційного розвитку проєктних офісів для заданих умов. Встановлено, що найвища швидкість доступу до інформації спостерігається у екологічних проєктах, що становить приблизно 80 Кбайт/сек, а найнижча швидкість доступу у соціальних проєктах – 32 Кбайт/сек. Найбільше значення показника покращення якості ухвалення рішень спостерігається у транспортних проєктах, близько 25 % порівняно з ухваленням рішень без використання інформаційних технологій, а найнижче – 20 % у соціальних проєктах. Встановлено, що різні типи проєктів мають різний рівень використання інформаційних технологій, що впливає на швидкість доступу до інформації та покращення якості ухвалення управлінських рішень проєктними менеджерами.

**Ключові слова:** інформаційні технології, ініціація, планування, проєкти, інформаційний розвиток, проєктні офіси.

**Tryhuba A., Malanchuk O., Tryhuba I., Marmuliak A., Demchyna V., Andruskiv O., Oliinyk R. Impact of modern information technologies on the processes of initiating and planning the community and regional development projects**

An analysis was conducted on the development status of communities and regions, leading to the identification of a need for projects that utilize various information technologies. Additionally, it was recognized that a method is required to assess the informational capacity of project offices responsible for implementing community and regional development initiatives. The analysis highlighted the unique aspects of employing modern information technologies in project management within these project offices. It is suggested that the assessment of information development levels in project offices should be based on an exploration of the interconnected processes of digitalization, digitization, and digital transformation. Accordingly, project offices can be classified into three distinct development levels. The findings indicate that leveraging modern information technologies significantly influences the initiation and planning phases of community and regional development projects. These effects are evident in management tasks involving the

collection and analysis of large volumes of data.

An approach to evaluating the level of information development of project offices engaged in community and regional development projects has been presented. This approach focuses on key indicators such as the speed of information access, the quality of decision-making by project managers, and the overall information development status of the project offices.

Implementing this approach allows for the consideration of the unique aspects related to generating data on project environment indicators. These indicators form the foundation for selecting appropriate information technologies that will facilitate the effective execution of community development projects across various sectors, ensuring optimal resource use and the achievement of strategic community and regional development goals.

Based on this approach, a quantitative evaluation of the information development indicators and levels of project offices under specified conditions was conducted. The results revealed that the fastest information access speeds occur in environmental projects, at approximately 80 KB/sec, while social projects exhibited the slowest access speeds at 32 KB/sec. Moreover, the highest improvement in decision-making quality, at around 25%, was seen in transport projects with the aid of information technology, compared to a 20% improvement in social projects. It was also discovered that different types of projects employ varying levels of information technology, impacting both the speed of information access and the quality of management decision-making by project managers.

**Keywords:** information technology, initiation, planning, projects, information development, project offices.

**Постановка проблеми.** Процеси ініціації та планування проектів виконуються на початковій стадії їхнього життєвого циклу. Результати зазначених процесів є основою для виконання подальших етапів проектів – планування та виконання. Проектні менеджери визначають різні види процесів та структур управління, які зумовлюються процесами ініціації та планування проектів. Під час ініціації та планування проектів також проектні менеджери виконують різні види управлінських операцій. Вони стосуються ініціації виконання проектів та окремих видів робіт, планування якості, ресурсного забезпечення, навчання персоналу, узгодження цінності для зацікавлених сторін, ризиків тощо [1–3]. Для нашої держави, на території якої відбувається війна, досить актуальними є проекти розвитку громад та регіонів, як у теперішній час, так і у післявоєнний.

На ефективність виконання процесів ініціації та планування проектів розвитку громад та регіонів значною мірою впливає наявність даних та інформації як стосовно існуючого та прогнозованого стану проектного середовища, так і стосовно виконання окремих дій. При цьому сучасні інформаційні технології мають значний вплив на процеси ініціації та планування проектів розвитку громад та регіонів. Впровадження сучасних інформаційних технологій в управлінську діяльність проектних менеджерів потребує виконання діджиталізації, цифровізації та цифрової трансформації [4–6]. Ці процеси забезпечують підвищення точності та ефективності управлінської діяльності, прозорості, залучення більшої кількості зацікавлених сторін завдяки вчасному інформуванню щодо стану та особливостей реалізації проектів розвитку громад та регіонів, а також точного оцінення їх результативності. Водночас необхідно зазначити, що діджиталізація, цифровізація та цифрова трансформація є не окремими етапами розвитку проектної діяльності, а скоріше безперервними системними етапами ін-

формаційного розвитку проектних офісів. Більшість проектних офісів, які виконують процеси ініціації та планування проектів розвитку громад та регіонів, починають свій інформаційний розвиток із діджиталізації. У подальшому переходять до цифровізації, а після того прагнуть до значного підвищення ефективності виконання управлінських операцій завдяки цифровій трансформації проектної діяльності.

Для мотивації проектних офісів, які виконують процеси ініціації та планування проектів розвитку громад та регіонів, до використання сучасних інформаційних технологій у проектній діяльності, необхідно обґрунтувати особливості їх інформаційного розвитку та виконати кількісну оцінку ефективності зазначеної діяльності [7]. Саме обґрунтування особливостей використання сучасних інформаційних технологій для виконання процесів ініціації та планування проектів розвитку громад та регіонів залишилося поза увагою науковців. Також відсутні наукові праці, які стосуються виконання досліджень із кількісною оцінкою ефективності інформаційного розвитку проектних офісів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні проектні менеджери використовують різноманітні інформаційні технології, які є основою методів та моделей управління проектами [8–10]. Вони успішно використовуються в різних галузях проектного менеджменту і кожна з них має свої переваги та недоліки. Однак вони не завжди забезпечують адаптацію до мінливих потреб і умов окремих громад та регіонів. Сучасні інформаційні технології відіграють важливу роль у розвитку громад та регіонів. Їх вплив на процеси ініціації та планування проектів стає дедалі більш наглядним.

У окремих наукових працях [11–13] їх автори висвітлюють переваги використання інформаційних технологій у проектному менеджменті. Зокрема, інформаційні технології доз-

воляють легко і швидко обмінюватися інформацією та ідеями з різними зацікавленими сторонами проєктів, що робить процес ініціації та планування проєктів більш прозорим та інклюзивним. При цьому інформаційні технології автоматизують багато управлінських операцій, пов'язаних з ініціацією та плануванням проєктів, що зменшує тривалість ухвалення управлінських рішень проєктними менеджерами і витрату ресурсів [14-16].

У окремих роботах [17-19] зазначено, що інформаційні технології дають доступ до різних видів інформації та даних, які є корисними під час ініціації та планування проєктів. Окрім того, інформаційні технології дозволяють виконувати моделювання різних сценаріїв розвитку проєктів, що допомагає ухвалювати точні та обгрунтовані управлінські рішення. Також інформаційні технології використовуються для відстеження ходу реалізації проєктів та звітування про їхні результати.

У окремих дослідженнях вивчали використання інформаційних технологій у процесах ініціації та планування проєктів [20-21]. Дослідження показало, що країни, які ширше використовують ІТ, мають більш високі показники успішності реалізації проєктів. Звіт організації економічного співробітництва та розвитку ОЕСР відображає переваги та виклики використання інформаційних технологій в управлінні проєктами [22]. Він рекомендує урядам використовувати інформаційні технології для покращення координації між різними зацікавленими сторонами, підвищення прозорості та підзвітності, а також для кращого управління ризиками.

Отже, сучасні ІТ мають значний вплив на процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів. Їхнє використання допомагає покращити комунікацію та співпрацю між зацікавленими сторонами, підвищити ефективність та продуктивність, а також зробити процес планування проєктів більш прозорим та підзвітним. Однак поза увагою науковців залишилися задачі, які стосуються обгрунтування особливостей використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами, а також класифікації проєктних офісів за рівнем їх інформаційного розвитку. Усе вищесказане свідчить про потребу розроблення підходу до визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів.

**Постановка завдання.** Для підвищення ефективності діяльності проєктних офісів, які здійснюють управління проєктами розвитку

громад та регіонів, пропонується використовувати підхід та методику визначення рівня їх інформаційного розвитку. Вони базуються на обгрунтованих особливостях та оціненні стану інформаційного розвитку проєктних офісів для управління проєктами розвитку громад та регіонів. Ними передбачається визначення обгрунтованих показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій, до яких належить швидкість доступу до інформації та покращення якості ухвалення рішень проєктними менеджерами, а також визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів. Наше завдання – означення особливостей використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами, класифікації проєктних офісів за рівнем їх інформаційного розвитку, а також на їх основі обгрунтуванні підходу до визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- означити особливості використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами, виконати класифікацію проєктних офісів за рівнем їх інформаційного розвитку та означити сучасні інформаційні технології для збору даних, ініціації та планування окремих видів проєктів розвитку громад та регіонів;
- запропонувати підхід до визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів;
- на підставі використання запропонованого підходу виконати кількісне оцінення показників та рівня інформаційного розвитку проєктних офісів для заданих умов.

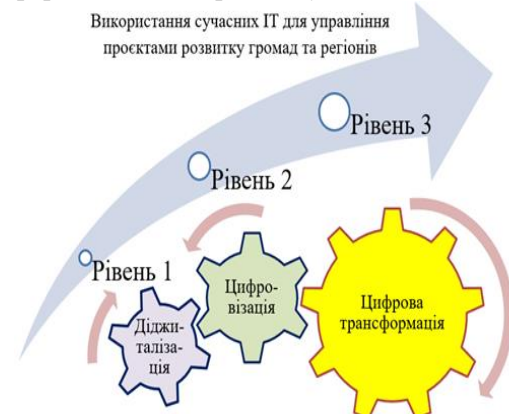
**Виклад основного матеріалу.** У різних предметних галузях актуальними сьогодні є процеси використання сучасних інформаційних технологій. Зокрема це стосується діджиталізації, цифровізації та цифрової трансформації. Зазначені процеси у більшості наукових праць мають різні визначення, схожі між собою. Водночас вони не тотожні поняття, але часто використовуються один замість одного (рис. 1).

Під діджиталізацією (оцифруванням) розуміємо процес переведення інформації про стан проєктного середовища та реалізацію проєктів з аналогового формату в цифровий. Сюди належать сканування документів із даними про виробничі та природно-кліматичні умови, перенесення даних із паперових форм у цифрові тощо.

Цифровізація є значно ширшим поняттям, яке охоплює не лише переведення інформації в цифровий формат, але й використання цифрових технологій для покращення проєктної діяльності менеджерів проєктів та обміну даними між зацікавленими сторонами. Це стосується впровадження у проєктних офісах електронного документообігу, використання онлайн-платформ для співпраці із зацікавленими сторонами проєктів розвитку громад та регіонів, а також автоматизацію окремих управлінських операцій.

Цифрова трансформація – найширший зпоміж трьох означених процесів інформаційного розвитку проєктних офісів. Акцентується увага не лише на переведення інформації та процесів у цифровий формат, але й докорінну зміну підходів до проєктної діяльності за допомогою сучасних інформаційних технологій. Це передбачає розробку власних інформаційних систем підтримки ухвалення рішень, які враховують особливості проєктного середовища та реалізацію окремих видів проєктів розвитку громад та регіонів, створення нових моделей для ініціації та планування, що базуються на сучасних інформаційних технологіях, а також зміну організаційної структури проєкт-

них офісів та їх культури із врахуванням рівня інформаційного їх розвитку.



**Рис. 1.** Схема використання у проєктних офісах сучасних ІТ для управління проєктами розвитку громад та регіонів

**Fig. 1.** Scheme of using modern IT in project offices to manage community and regional development projects

Процеси діджиталізації, цифровізації та цифрової трансформації зумовлюють стан інформаційного розвитку проєктних офісів для управління проєктами розвитку громад та регіонів та мають свої особливості, які представлено у табл. 1.

**Таблиця 1.** Особливості та стан інформаційного розвитку проєктних офісів для управління проєктами розвитку громад та регіонів

**Table 1.** Features and state of information development of project offices for managing community and regional development projects

Рівень інформаційного розвитку проєктного офісу	Процеси інформаційного розвитку проєктного офісу	Характеристики інформаційного розвитку проєктного офісу	Приклад інформаційного розвитку проєктного офісу
Рівень 1	Діджиталізація	Створення цифрових баз даних про проєктне середовище, дії у проєктах, учасників, ресурси. Оцифрування карт, планів, звітів та інших документів.	Створення електронного реєстру проєктів. Оцифрування архівів проєктної документації. Переведення паперових анкет на онлайн-опитування.
Рівень 2	Цифровізація	Застосування онлайн-платформ для спільної роботи команди над проєктами. Впровадження систем електронного документообігу. Використання GIS-технологій для аналізу даних про проєкти.	Використання онлайн-платформ для подання заявок на гранти. Застосування електронного документообігу для координації роботи над проєктами. Створення GIS-карти з проєктами розвитку громад.
Рівень 3	Цифрова трансформація	Залучення громадян до процесів ухвалення рішень щодо проєктів. Використання штучного інтелекту для прогнозування складових проєктів. Використання генеративного інтелекту для означення ідей. Створення цифрових двійників проєктів для їх візуалізації та моделювання.	Проведення онлайн-консультацій з громадськістю щодо проєктів. Використання штучного інтелекту для прогнозування впливу продукту проєкту на економіку регіону. Створення 3D-моделі проєкту для візуалізації його впливу на навколишнє середовище.

Використання сучасних інформаційних технологій для виконання процесів ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів має свої особливості (рис. 2). Сучасні інформаційні технології дають змогу збирати та аналізувати великі обсяги даних щодо стану розвитку громад та регіонів. До них належать демографічні дані, дані щодо охорони здоров'я, дані про екологічні показники, статистичні дані щодо транспортних потоків тощо.

Сучасні інформаційні технології пропонують широкий спектр інструментів для інтелектуального аналізу даних, які можуть значно покращити процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів. Їх можна поділити на декілька категорій: 1) платформи для візуального програмування; 2) бібліотеки машинного навчання для виконання управлінських процесів прогнозування, класифікації, кластеризації, асоціації тощо; 3) інструменти візуалізації результатів виконання управлінських операцій. Приладом платформи візуального програмування є KNIME. Ця платформа з відкритим кодом, що дуже добре підходить для візуально-орієнтованого програмування. Вона пропонує широкий спектр модулів для аналізу даних, машинного навчання та візуалізації. Наступна платформа RapidMiner має комерційну та безкоштовну версію і пропонує схожий функціонал, як і KNIME.



**Рис. 2.** Схема використання сучасних ІТ для виконання процесів ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів

**Fig. 2.** Scheme for using modern IT to initiate and plan community and regional development projects

Доступні для виконання управлінських процесів бібліотеки машинного навчання, які забезпечують вирішення задач прогнозування, класифікації, кластеризації, асоціації тощо. Прикладами таких бібліотек є TensorFlow, PyTorch та Scikit-learn. TensorFlow є бібліотекою з відкритим кодом, яка розроблена Google. Її використовують проєктні менеджери для створення та тренування нейронних мереж. Бібліотека PyTorch також має відкритий код. Вона розроблена Facebook. Використовується для створення та тренування нейронних мереж. Бібліотека Scikit-learn має відкритий код. Ця бібліотека використовується проєктними менеджерами для машинного навчання на мові

Python.

Щодо інструментів візуалізації результатів виконання управлінських операцій, то сьогодні найпоширенішими у проєктній діяльності є Tableau, Power BI та Matplotlib. Платформа Tableau для візуалізації даних пропонує можливості щодо створення широкого спектру інтерактивних графіків і діаграм. Аналогічною є платформа Power BI, яка забезпечує візуалізацію даних від Microsoft, що надає схожі можливості, як Tableau. Для проєктних менеджерів, які можуть писати код на мові Python, цінною є бібліотека Matplotlib. Вона забезпечує створення графіків і діаграм, що візуалізують тенденції зміни проєктного середовища та окремих складових виконання проєктів.

Використання методів штучного інтелекту та аналітика великих даних дозволяє проєктним менеджерам виявляти та прогнозувати закономірності стосовно розвитку громад та регіонів. Отримані результати є вагомими для формулювання ефективних стратегій та сценаріїв розвитку громад та регіонів. Сьогодні відомі інструменти такі як Apache Spark, Hadoop, Kafka, що використовуються проєктними менеджерами. Зокрема Apache Spark є платформою для розподіленої обробки даних, яка використовується для аналізу великих даних. Платформу Hadoop використовують проєктні менеджери для зберігання та обробки великих даних. Систему обробки потоків даних Kafka використовують проєктні менеджери для аналізу даних у реальному часі. Вибір правильного інструменту залежить від потреб для виконання процесів ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів і досвіду проєктних менеджерів.

На підставі використання інформаційних технологій можна створювати моделі розвитку громад та регіонів з врахуванням різних чинників і сценаріїв. Це дозволяє здійснювати прогнози щодо ефективності різних стратегій розвитку громад та регіонів. Заслуговує на увагу електронне управління проєктами (EPM). Сучасні інформаційні системи для управління проєктами надають зручний інструментарій для планування, виконання та контролю проєктів. Це дозволяє ефективно реалізовувати процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів.

Сучасні інформаційні технології створюють можливості для віртуальної співпраці між різними зацікавленими сторонами проєктів розвитку громад та регіонів. До них належать комунікація між зацікавленими сторонами через спеціалізовані платформи, спільне використання документів та обмін ідеями онлайн, спільне вирішення окремих управлінських задач.



Для управління соціальними, медичними, екологічними та транспортними проектами розвитку громад та регіонів, досить часто проєктні менеджери використовують геоінформаційні системи (ГІС). Вони дозволяють виконувати аналіз просторових даних, визначення оптимального сценарію територіального розташування об'єктів інфраструктури, моніторинг стану дов-

кілля тощо.

Для виконання процесів ініціації та планування проєктів розвитку громад використовують різні інформаційні технології, які залежать як від виду проєктів, так і від етапів та управлінських процесів, для яких вони використовуються (табл. 2).

**Таблиця 2.** Використання сучасних інформаційних технологій для збору даних, ініціації та планування окремих видів проєктів розвитку громад та регіонів

**Table 2.** Use of modern information technologies for data collection and planning of certain types of community and regional development projects

Вид проєкту	Етапи життєвого циклу проєкту		
	Збір даних	Ініціація проєктів	Планування проєктів
Медичні проєкти	Аналіз даних про захворювання населення з електронних медичних карт. Використання мобільних додатків для збору даних про самопочуття населення громад.	Використання штучного інтелекту для прогнозування потреб у медичних послугах. Розробка проєктів з профілактики захворювань на основі інтелектуального аналізу даних.	Планування витрат ресурсів для реалізації окремих медичних проєктів на основі машинного навчання. Розподіл пацієнтів між медичними закладами. Планування змісту та часу реалізації медичних проєктів.
Соціальні проєкти	Використання парсингу для збору даних про реалізовані соціальні проєкти. Використання чат-ботів для збору інформації про потреби людей.	Використання генеративного інтелекту для означення ідей. Використання машинного навчання для прогнозування ризиків соціальних проєктів.	Визначення пріоритетних проєктів надання соціальної допомоги на основі алгоритмів обчислювального інтелекту. Планування доступності соціальних послуг для людей з різними потребами.
Екологічні проєкти	Моніторинг стану довкілля за допомогою технологій IoT. Аналіз супутникових знімків для відстеження змін у довкіллі.	Використання обчислювального інтелекту для прогнозування сценаріїв реалізації проєктів. Розробка стратегій збереження природних ресурсів із використанням систем електронного управління проєктами.	Створення 3D-моделей процесів для візуалізації їх впливу на навколишнє середовище. Використання платформ візуального програмування для прогнозування впливу продукту проєкту на екологічний стан регіону.
Проєкти розвитку транспортної інфраструктури	Збір та аналіз даних про транспортні потоки на території окремих населених пунктів із використанням фреймворку OpenStreetMap. Використання програмного забезпечення Overpass API з відкритим вихідним кодом для збору інформації про транспортну інфраструктуру.	Використання обчислювального інтелекту для прогнозування потреб у об'єктах транспортної інфраструктури. Визначення пріоритетних для відновлення об'єктів транспортної інфраструктури із використанням фреймворку OpenStreetMap.	Використання неймереж GANs для створення штучних наборів даних для прогнозування транспортних потоків, заторів на дорогах, використання парковок тощо. Імітаційне моделювання трафіку із використанням програмне забезпечення SUMO з відкритим кодом для імітації міської мобільності.

Використання сучасних інформаційних технологій для збору даних, ініціації та планування окремих видів проєктів із означеними їх особливостями дозволяє ефективно впроваджувати та виконувати проєкти розвитку громад у сферах медицини, соціального захисту, охорони довкілля та транспортної інфраструктури, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів та досягнення стратегічних цілей розвитку.

Запропоновано методикку визначення кількісних показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій, а також їх

впливу на процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів. Вона розроблена на підставі даних, що представлено у таблиці 1. Це дає можливість врахувати рівні інформаційного розвитку проєктних офісів. Нею передбачається визначення ключових показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій.

Швидкість доступу проєктних менеджерів до інформації про проєктне середовище та проєкти визначається за формулою:

$$S_s = \frac{A_i}{T_A}, \quad (1)$$

де  $S_s$  – швидкість доступу проєктних менеджерів до інформації про проєктне середовище та проєкти, Кбайт/сек;  $A_i$  – загальний обсяг отриманої інформації про проєктне середовище та проєкти, Кбайт;  $T_A$  – час впродовж якого отримано інформацію про проєктне середовище та проєкти, сек.

Формула (1) відображає співвідношення між обсягом отриманої інформації та часом, який потрібно витратити проєктним менеджерам на її отримання. Чим менший час  $T_A$  доступу, впродовж якого отримано інформацію при заданому обсягу інформації, тим швидший доступ до інформації  $S_s$ , що характеризує більш ефективний рівень інформаційного розвитку проєктного офісу.

Показник покращення якості ухвалення рішень  $\Delta Q$  за допомогою інформаційних технологій можна визначити за допомогою порівняння якості ухвалення рішень до та після впровадження інформаційних технологій. Ось формула для цього показника:

$$\Delta Q = \frac{Q_a - Q_t}{Q_t} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $\Delta Q$  – показник покращення якості ухвалення рішень за допомогою інформаційних технологій, %;  $Q_a, Q_t$  – відповідно точність ухвалення рішень з використанням інформаційних технологій та без використання інформаційних технологій, %.

Отримане значення показника покращення якості ухвалення рішень  $\Delta Q$  виражається у відсотках і показує, наскільки впровадження інформаційних технологій впливає на точність ухвалених рішень проєктними менеджерами.

Оскільки рівень інформаційного розвитку проєктних офісів представляється кількома рівнями (наприклад, рівень 1, рівень 2, рівень 3), їх оцінення можливе на підставі врахування частки проєктів на кожному рівні відносно загальної кількості реалізованих проєктів розвитку громад та регіонів. Для визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів, використовують формулу:

$$L_{id} = \frac{N_{pl}}{\sum N_p} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де  $L_{id}$  – показник рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів, %;  $N_{pl}$  – кількість реалізованих проєктів розвитку гро-

мад та регіонів, які відповідають використанню інформаційних технологій окремого рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, од;  $\sum N_p$  – загальна кількість реалізованих проєктів розвитку громад та регіонів у заданому проєктному офісі, од.

Кількість реалізованих проєктів розвитку громад та регіонів  $N_{pl}$ , які відповідають використанню інформаційних технологій окремого рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, визначається відносно проєктів, які відповідають наявним процесам інформаційного розвитку проєктного офісу (діджиталізація, цифровізація або цифрова трансформація). Загальна кількість проєктів  $\sum N_p$  – сума всіх проєктів, що реалізовані проєктним офісом стосовно розвитку громад та регіонів. Отримане значення рівня інформаційного розвитку  $L_{id}$  проєктних офісів виражається у відсотках і показує на те, яка частина проєктів знаходиться на кожному із рівнів відносно загальної кількості реалізованих проєктів.

Для визначення кількісних показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій на процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів нами написано код на мові Python, який базується на запропонованій методиці. Він забезпечує розрахунок швидкості доступу до інформації та покращення якості ухвалення рішень проєктними менеджерами, а також визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів.

На підставі поданих даних (табл. 1 та табл. 2) сформовано варіанти проєктів розвитку громад та регіонів у різних сферах. Використовуючи запропоновану методику для кожного з варіантів проєктів, задано початкові дані для визначення кількісних показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій, які наведено у табл. 3.

У табл. 3 наведено початкові дані, які взято із звітів організації економічного співробітництва та розвитку (OECD). Вони стосуються використання сучасних інформаційних технологій у різних видах проєктів з розвитку громад та регіонів. Медичні проєкти використовують приблизно 1000 Кбайт даних за 20 секунд, що становить 85 % від загальної масштабованості технологій, при цьому ефективність їхнього використання складає 70 %. У соціальних проєктах обсяг даних становить 800 Кбайт, час обробки 25 секунд, а використання технологій – 80 %. Їхня ефективність оцінюється на рівні 65 %. Екологічні проєкти відрізняються великим обсягом даних – 1200 Кбайт, швидкістю обробки – 15 секунд та високим рівнем

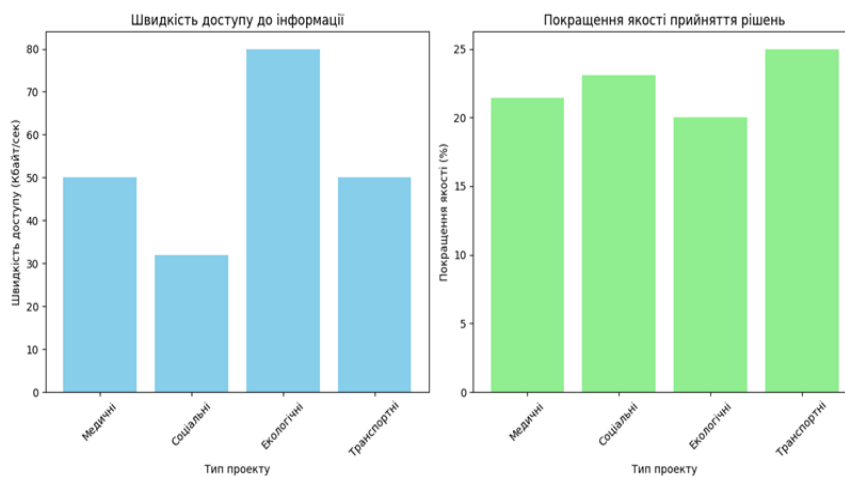
використання інформаційних технологій – 90 %. Їхня ефективність досягає 75 %. У транспортних проєктах об'єм даних становить 1500 Кбайт, час обробки – 30 секунд, а використання технологій – 75 %. Проте їхня ефективність найнижча і становить 60 %. За результатами виконаного аналізу встановлено, що найвищий рівень використання сучасних інформаційних технологій мають екологічні проєкти, у яких спостерігається найбільша ефективність. Найнижчий рівень ефективності спостерігається у транспортних проєктів. Такий

аналіз допомагає проєктним менеджерам зрозуміти, проєкти яких сфер потребують більшої уваги щодо використання та розвитку сучасних інформаційних технологій для підвищення ефективності управління ними.

На підставі даних табл. 3 та із використанням написаного коду на мові Python визначено показники швидкості доступу до інформації та покращення якості ухвалення рішень проєктними менеджерами (рис. 3).

**Таблиця 3.** Початкові дані для визначення кількісних показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій під час ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів  
**Table 3.** Initial data for determining quantitative indicators of the effectiveness of the use of modern information technologies in the initiation and planning of community and regional development projects

Вид проєкту	Показники використання сучасних інформаційних технологій			
	$A_I$ Кбайт	$T_A$ , сек.	$Q_a$ , %	$Q_t$ , %
Медичні проєкти	1000	20	85	70
Соціальні проєкти	800	25	80	65
Екологічні проєкти	1200	15	90	75
Транспортні проєкти	1500	30	75	60



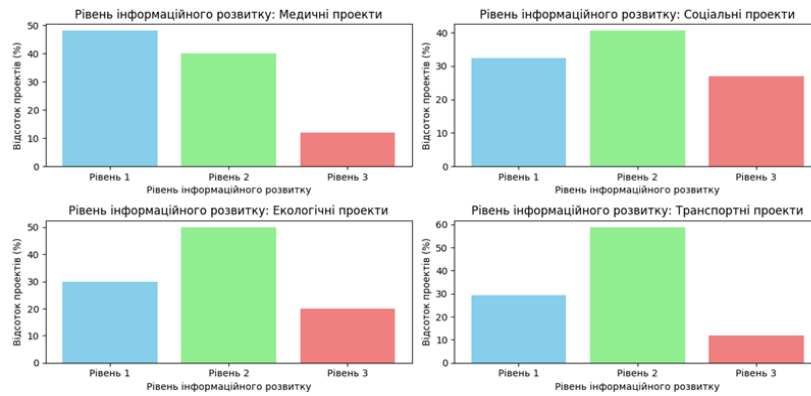
**Рис. 3.** Результати визначення швидкості доступу до інформації та покращення якості ухвалення рішень проєктними менеджерами

**Fig. 3.** Results of determining the speed of access to information and improving the quality of decision-making by project managers

Отримані гістограми (рис. 3) свідчать про те, що вони дають можливість порівняти різні типи проєктів за двома показниками, які описані формулами (1) та (2). Вони відповідно відображають швидкість доступу до інформації та покращення якості ухвалення рішень з використанням інформаційних технологій. Встановлено, що найвища швидкість доступу до інформації спостерігається у екологічних проєктах, що складає приблизно 80 Кбайт/сек, а найнижчу швидкість доступу мають соціальні проєкти з приблизно 32 Кбайт/сек. Найбільше значення показника покращення якості ухвалення рішень спостерігається у транспортних проєктах, близько 25 % порівняно з ухваленням рішень без

використання інформаційних технологій, а нижче 20 % у соціальних проєктах. На основі аналізу графіків можна дійти висновку, що різні типи проєктів виявляють різний вплив використання інформаційних технологій на швидкість доступу до інформації та покращення якості ухвалення управлінських рішень проєктними менеджерами.

На підставі даних табл. 3 та із використанням написаного коду на мові Python визначено рівень інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів. Отримані гістограми із відображенням рівня інформаційного розвитку проєктних офісів представлено на рис. 4.



**Рис. 4.** Результати визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів

**Fig. 4.** Results of determining the level of information development of project offices implementing the community and regional development projects

Отримані гістограми із відображенням рівня інформаційного розвитку проєктних офісів показують, як змінюється рівень інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують чотири різних типи проєктів на трьох рівнях. Встановлено, що 48 % медичних проєктів реалізуються на рівні 1 інформаційного розвитку проєктних офісів, 39 % – на рівні 2 та 13 % – на рівні 3. Щодо соціальних проєктів, то 32 % реалізуються на рівні 1 інформаційного розвитку проєктних офісів, 40 % – на рівні 2 та 28 % – на рівні 3. Стосовно екологічних проєктів, то 30 % реалізуються на рівні 1 інформаційного розвитку проєктних офісів, 49 % – на рівні 2 та 21 % – на рівні 3. Щодо транспортних проєктів, то 29 % реалізуються на рівні 1 інформаційного розвитку проєктних офісів, 59 % – на рівні 2 та 12 % – на рівні 3. Найбільша кількість проєктів реалізуються на рівні 2 інформаційного розвитку проєктних офісів і це стосується всіх типів проєктів, за винятком медичним проєктів, де їх найбільше виконується на рівні 1 інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів.

На підставі отриманих результатів визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів, можна зробити декілька загальних висновків і рекомендацій для проєктних менеджерів. Проєктним менеджерам потрібно ретельно аналізувати розподіл проєктів на різних рівнях інформаційного розвитку. Щоб підвищити рівень інформаційного розвитку, необхідно вдосконалити інфраструктуру інформаційних систем та використовувати інструментарій, який базується на сучасних інформаційних технологіях. Інвестування у нові інформаційні технології та програмне забезпечення може сприяти покращанню доступу до інформації. Важливо забезпечити навчання та підтримку проєктних менеджерів для набуття

навичок у галузі інформаційних технологій та систем управління проєктами. Загальною метою є створення ефективної та динамічної системи управління проєктами, яка відповідає вимогам сучасного бізнесу та забезпечує успішну реалізацію проєктів розвитку громад та регіонів.

Запропонований підхід забезпечує визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів. Він враховує кількісні показники ефективності використання сучасних інформаційних технологій під час ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів. У подальшому для використання запропонованого підходу до розвитку проєктних офісів необхідно розробити систему підтримки ухвалення рішень, яка забезпечить пришвидшення визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів.

**Висновки.** 1. Проведений аналіз стану розвитку громад та регіонів свідчить про те, що є потреба в реалізації проєктів, управління якими вимагає використання різноманітних інформаційних технологій. Попри значну кількість наукових праць із використання інформаційних технологій у проєктному менеджменті, поза увагою науковців залишилися питання щодо обґрунтування особливостей використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами, класифікації проєктних офісів за рівнем їх інформаційного розвитку. Усе це свідчить про потребу розроблення підходу до визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів.

2. Означені особливості використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами. Зокрема для визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів пропонується оцінювати взаємодоповнюючі процеси діджиталізації, цифрові

зації та цифрової трансформації, що дають можливість їх класифікувати на 3 рівні розвитку. Встановлено, що використання сучасних інформаційних технологій для виконання процесів ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів має свої особливості. Вони відображаються управлінськими операціями збору та аналізу великих обсягів даних. Ці дані стосуються оцінення стану розвитку громад та регіонів на основі демографічних показників, показників щодо охорони здоров'я населення, екологічних показників та показників транспортних потоків тощо.

3. Запропонований підхід до визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів, передбачає визначення швидкості доступу до інформації, покращення якості ухвалення рішень проєктними менеджерами та рівня інформаційного розвитку проєктних офісів. Вони забезпечують врахування особливостей формування даних про показники проєктного середовища, що лежить в основі вибору інформаційних технологій, які забезпечать ефективну реалізацію проєктів розвитку громад у сферах медицини, соціального захисту, охорони довкілля та транспортної інфраструктури із оптимальним використанням ресурсів та досягненням стратегічних цілей розвитку громад та регіонів.

4. На підставі використання запропонованого підходу кількісно оцінені показники та рівень інформаційного розвитку проєктних офісів для заданих умов. Встановлено, що найвища швидкість доступу до інформації спостерігається у екологічних проєктах, що становить близько 80 Кбайт/сек, а найнижчу швидкість доступу мають соціальні проєкти з приблизно 32 Кбайт/сек. Найбільше значення показника покращення якості ухвалення рішень спостерігається у транспортних проєктах, близько 25 % порівняно з ухваленням рішень без використання інформаційних технологій, а найнижче 20 % у соціальних проєктах. Встановлено, що різні типи проєктів мають різний рівень використання інформаційних технологій, що впливає на швидкість доступу до інформації та покращання якості ухвалення управлінських рішень проєктними менеджерами.

#### Бібліографічний список

1. Каверіна С. Ю., Башинська І. О. Інформаційні технології в управлінні проєктами. *Економіка і суспільство*. 2017. Вип. 10. С. 883–887.
2. Міхровська, М. Діджиталізація, діджиталізація, цифрова трансформація: зміст та особливості. *Грааль науки*, 2021, 1, 128–130.

<https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.02.2021.023>

3. Співробітництво в рамках Організації Економічного співробітництва та розвитку. URL: <https://mfa.gov.ua/mizhnarodni-vidnosini/organizaciya-ekonomichnogo-spivrobitnictva-ta-rozvitku> (Last accessed 26.03.2024).

4. Тригуба А. М., Сидорчук О. В. Особливості планування проєктів та програм аграрного виробництва: *матеріали VI Міжнар. конф. «Управління проєктами: стан та перспективи»*. Миколаїв, 2010. С. 313–316.

5. Application of sarima models in information systems forecasting seasonal volumes of food raw materials of procurement on the territory of communities / A. Tryhuba, N. Koval, I. Tryhuba, O. Boiarchuk. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. 3295. P. 64–75.

6. Bashynsky O. Coordination of dairy workshops projects on the community territory and their project environment. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2019. 3. P. 51–54.

7. Batyuk B., Dyndyn M. Coordination of configurations of complex organizational and technical systems for development of agricultural sector branches. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. 2(2). P. 63–76.

8. Bushuyev S., Verenysh O. Organizational Maturity and Project: Program and Portfolio Success. *Developing Organizational Maturity for Effective Project Management (Chapter 6: Organizational Maturity and Project: Program and Portfolio Success)*. 2018. 104–127. doi: 10.4018/978-1-5225-3197-5.

9. Establishing patterns of change in the indicators of using milk processing shops at a community territory / M. Rudynets, et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Control processes*. 2019. 3/6. 102. P. 57–65.

10. Forecasting the Fund of Time for Performance of Works in Hybrid Projects Using Machine Training Technologies / N. Koval, I. Kondysiuk, O. Boiarchuk, M. Rudynets. *MoMLeT+ DS*, 2021. P. 196–206.

11. Forecasting the risk of the resource demand for dairy farms basing on machine learning / 17. V. Boyarchuk, et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. 2631. P. 327–340.

12. Justification of models of changing project environment for harvesting grain, oilseed and legume crops / O. Bashynskiy, Y. Medvediev, S. Slobodian, D. Skorobogatov. *Independent Journal of Management & Production*, 2019. 10 (7). P. 658–672.

13. Kovalchuk O., Zachko O., Kobylkin D. Criteria for intellectual forming a project teams

- in safety oriented system. *17th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2022. 2. P. 430–433.
14. Liu, B. Application of Computer Electronic Information Technology in Engineering Project Management. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2023, 170, P. 172–180.
15. Method of quantitative evaluation of the risk of benefits for investors of fodder-producing cooperatives / A. Tryhuba, I. Tryhuba, O. Ftoma, O. Boyarchuk. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2019. 3. P. 55–58.
16. Planning of Territorial Location of Fire-Rescue Formations in Administrative Territory Development Projects / A. Tryhuba, R. Ratushny, O. Bashynsky, V. Ptashnyk. *CEUR Workshop Proceedings 2565*. 2020. P. 18–20.
17. Raymond L. Information systems design for project management: a data modeling approach. *Project Manage.* 1987. 18. (4), P. 94–99.
18. Substantiating the effectiveness of projects for the construction of dual systems of fire suppression / R. Ratushnyi, P. Khmel, E. Martyn, O. Prydatko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4(3-100). P. 46–53.
19. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I. Forecasting of a lifecycle of the projects of production of biofuel raw materials with consideration of risks. *International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2019. P. 420–425.
20. Tryhuba A., Tryhuba I., Bashynsky O. Conceptual model of management of technologically integrated industry development projects. *Proceedings of the 15th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2020. P. 155–158. doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9321903.
21. Yan, H., Li, M. Application of Modern Information Technology in Information Construction of Project Management. *ACM International Conference Proceeding Series*, 2022, Pp. 132–135.
22. Zhao, L., Deng, J., Ma, Y., Zhu, Y. Design of digital business center of enterprise project management system based on Information Technology. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1744(2), 022010

Стаття надійшла 27.03.2024

УДК 004.77:659.3

## МЕТОДИКА ВИКОРИСТАННЯ UTM-МІТОК ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТРАФІКУ САЙТУ ТА ВЕБАНАЛІТИКИ

*Христина Мозуль, Павло Луб, к. т. н., Любомир Чухрай, к.ф.-м. н., Святослав Штогрин, Віталій Фіялковський*

*Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл.  
e-mail: kristinamozul@gmail.com, pollylub@ukr.net, l.chukhrai@gmail.com  
sviatoslav.shtohryn@gmail.com, vitalik.fiyalkovsky@i.ua*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.159>

### **Мозуль Х., Луб П., Чухрай Л., Штогрин С., Фіялковський В. Методика використання Utm-міток для моніторингу трафіку сайту та вебаналітики**

Проаналізовано вагомість вебсервісів та Інтернету в площині просування послуг через соціальні мережі та вебсайти. Акцентовано на тому, що підприємства, які просувають товари через вебдодатки та соціальні мережі, прагнуть налагодити зв'язок з аудиторією, а також залучати все більшу кількість клієнтів. Виокремлено переваги маркетингу у соціальних мережах, які сьогодні відносять до найефективніших методів просування товарів та послуг. Зазначено, що освоєння ІТ-інструментів, які дозволяють моніторити активність користувачів у соціальних мережах, є досить актуальним питанням для сучасних підприємств. Проаналізовано технічну можливість моніторингу користувачів у глобальній мережі завдяки інструментам вебаналітики. Зазначено, що ці інструменти надають розробникам та власникам сайтів інформацію про те, що користувачі роблять, які здійснюють навігацію і що їх цікавить найбільше. Описано переваги та недоліки, а також головні інструменти вебаналітики, які лежать в основі метрики – цифрових показників щодо переглядів, покупок, відвідин, цільових дій для відстеження тощо. Подано методику застосування технології Urchin Tracking Module та системи Google Analytics. Означено можливості та спосіб використання UTM-міток, а також методику формування звітів активності користувача на вебсайті. Описано методику створення UTM-мітки, а також складові її запису – параметр та змінну відстеження. Наведено роль кожного із цих елементів щодо виявлення джерела трафіку вебсайту з метою відстежувати потік нових користувачів. Подано перелік результатів моніторингу за користувачами вебсайту, яких можна досягнути за коректного використання UTM-міток та системи Google Analytics. Отримано результати опрацювання окремих звітів Google Analytics та оцінення шпелеску активності користувачів вебсайту.

**Ключові слова:** UTM-мітки, методика, моніторинг, трафік, сайт, вебаналітика, Google Analytics.

### **Mozul Kh., Lub P., Chukhrai L., Shtohryn S., Fiyalkovsky V. Methods of using UTM tags for site traffic monitoring and web analytics**

The article examines the significance of web services and the Internet in promoting products through social networks and websites. It highlights that companies utilizing web applications and social networks aim to connect with their audience and attract more customers. The research identifies the advantages of marketing on social networks, which are currently recognized as some of the most effective methods for promoting goods and services. Additionally, the article discusses the development of IT tools that enable the monitoring of user activity on social networks, a relevant issue for modern enterprises. The authors evaluate the technical capabilities of tracking users in the global network through web analytics tools. These tools provide developers and site owners with insights into user behavior, navigation patterns, and interests. The article outlines both the advantages and disadvantages of web analytics tools and describes the primary metrics - digital indicators that include views, purchases, visits, and targeted actions. It details the application of Urchin Tracking Module (UTM) technology and the Google Analytics system. The methods for utilizing UTM tags and generating reports on user activity on websites are defined. It explains how to create a UTM tag, including the parameters and tracking variables involved. The role of each component in identifying the source of website traffic is discussed, allowing for effective tracking of new user flows. Finally, the article lists the results that can be achieved through proper implementation of UTM tags and the Google Analytics system, presenting the outcomes of specific Google Analytics reports and an evaluation of the increased activity of website users.

**Keywords:** UTM tags, methodology, monitoring, traffic, site, web analytics, Google Analytics.

**Постановка проблеми.** Кількість користувачів Інтернету в світі постійно зростає, що свідчить про перспективи інтегрування бізнесу у вебсервіси, надання послуг у соціальних мережах та використання спеціалізованих інструментів моніторингу користувачів. Водночас розвиток інформаційних технологій (ІТ) приводить до того, що на зміну традиційним маркети-

нговим методам приходять комунікації у соціальних мережах. Просування послуг та товарів через Інтернет формує вимоги щодо поширення інформації (реклами) на сайті чи в групах соціальних мереж, відслідковування дій користувачів, оцінення їхньої активності та зацікавленості відповідними повідомленнями, а відтак внесення змін у їхній контекст, розробку реко-

мендацій щодо структури вебдодатка і підвищення ефективності просування послуг загалом. Із практики відомо [1; 7; 12], що підприємства, які просувають товари через вебдодатки та соціальні мережі, прагнуть налагодити зв'язок з аудиторією, а також залучати все більшу кількість клієнтів. На сьогодні маркетинг у соціальних мережах відносять до найбільш ефективних методів просування товарів та послуг, тому освоєння ІТ-інструментів, що дозволяють моніторити активність користувачів у соціальних мережах, є досить актуальним питанням для сучасних підприємств.

Окрім того, Інтернет дає змогу забезпечити цілий спектр мультимедійних функцій, які уможливають різносторонній зв'язок із клієнтами, постачальниками, конкурентами та працівниками загалом. Розробку вебсайтів скеровують на досягнення різної мети – реклама та представлення послуг компанії, залучення нових клієнтів, їхнє довгострокове утримання та «проектування товару очима споживача», збору персональних даних клієнтів та формування їх кредитної історії, моніторинг активності та удосконалення вебсайту з метою підвищення інформативності, інтуїтивної зручності, доступності тощо. Значну частину цих завдань можна вирішити завдяки засобам вебаналітики, що дають змогу моніторити відвідувачів сайтів та розробляти рекомендації із залучення дедалі більшої аудиторії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** свідчить про те, що питанню просування послуг та товарів у соціальних мережах присвячено чимало досліджень, зокрема ці питання розглядали В. В. Журило, О. І. Рибіна, Г. Л. Чміль, О. В. Кифяк, Л. З. Абдокова та ін. [7; 13; 20]. Вивченням інструментів вебаналітики також присвячено багато праць таких науковців, зокрема Т. М. Винарчук, О. В. Піддубна, О. М. Забарна, О. Є. Яковлев та ін. Узагальнення положень викладених у цих працях дає підстави стверджувати про значну інформативність вебаналітики, перспективи розвитку таких завдань і в майбутньому, а також доцільність спрощення ІТ-інструментів для більш широкого моніторингу активності користувачів відповідних вебсервісів.

**Постановка завдання.** Наше завдання – розкрити вагомість ІТ у просуванні онлайн-послуг та реалізації товарів; описати інструменти та навести основні метрики (цифрові показники) вебаналітики; 3) розкрити основні елементи UTM-міток та їх призначення в контексті моніторингу трафіку на вебсайті; запропонувати практичні рекомендації щодо корект-

ного створення UTM-міток для точного збору даних; навести реальний приклад використання аналізатора джерел трафіку за UTM-мітками в системі Google Analytics – сформувавши аудиторію, поширити інформацію про наданні послуг на сайті, відстежити сплеск активності користувачів узагальнити отримані результати.

**Виклад основного матеріалу.** Реалізація товарів та послуг через Інтернет-сервіси набула значної популярності, що сформувало цілий спектр практичних маркетингових та ІТ-завдань щодо розвитку каналів комунікацій, інтерактивності та ефективності електронної комерції. Відповідно до цього, просування Інтернет-послуг через рекламу, що інтегрована в ІТ-канали, має відповідати вимогам ефективності та заданим витратам ресурсів. Власне, для моніторингу цих процесів у глобальній мережі реалізовано вебаналітику [1; 2], яка надає розробникам та власникам сайтів інформацію про те, що користувачі роблять, як здійснюють навігацію і що їх цікавить найбільше. У технічному розумінні вебаналітика – це спеціалізовані програми та інструменти, котрі збирають дані про активність користувачів на сайті. До головних завдань вебаналітики належать: 1) підвищення активності користувачів сайту; 2) збільшення відвідувачів; 3) оптимізація вебсервісу і його функціональності; 4) визначення комунікативних та технічних проблем сайту; 5) пошук способи їх розв'язання тощо [11; 12].

Переваги та результати використання вебаналітики: 1) розвиток функціональності сайту на підставі аналізу поведінки відвідувачів; 2) оцінка ефективності рекламних кампаній в Інтернеті; 3) виявлення проблемних місць у структурі, навігації та контенті сайту; 4) створення споживацького портрету користувача; 5) виявлення основних тенденцій поведінки користувачів та адаптування під неї реклами і маркетингу; 6) виявлення того контенту, яким читачі хочуть ділитися зі своєю аудиторією; 8) мотивування та заохочення до повторного відвідування сайту тощо. Отримання статистичних показників щодо відвідуваності вебсторінок дає змогу отримати дані щодо [11]: 1) кількості переглянутих вебсторінок; 2) ключових слів і фраз, за якими користувачі знаходять сайт у пошукових системах; 3) географію відвідувачів; 4) час, проведений на вебсторінці; 5) переходи між вебсторінками; 6) аудиторію сайту (випадкові, постійні відвідувачі тощо); 7) зручність навігації сайту; 8) ресурси, з яких користувачі потрапляють на сайт, тощо.

Якщо говорити про метрики – цифрові



показники переглядів, покупок, відвідин, цільових дій тощо, що відстежують інструменти вебаналітики, до основних відносять [1; 2]:

- **CPA (Cost Per Action)** – ціна за дію;
- **CPC (Cost Per Click)** – ціна за клік;
- **ROI (Return on Investment)** – співвідношення вкладених грошей у просування до отриманого прибутку;
- **CTR (Click-through rate)** – показник ефективності, різниця між кількістю відвідувачів, які перейшли по рекламі, до кількості показів;
- **CR (Conversion rate)** – кількість користувачів, які здійснили цільову дію, від загальної кількості відвідувачів;
- **CPL (Cost Per Lead)** – вартість залучення ліда (потенційного клієнта). Метрика показує, скільки витрачено грошей на залучення одного користувача, який залишив свої контакти;
- **CAR (Cart Abandonment Rate)** – кількість користувачів, які додали товар у кошик, але так і не здійснили покупку;
- **ARPC/ARPU** – середній прибуток, який отримується з одного користувача. Це сума доходу з одного клієнта за певний час;
- **CR (Churn Rate)** – кількість втрачених клієнтів за певний період;
- **LTV (Customer Lifetime Value)** – показник загальної суми прибутку з одного клієнта за весь час роботи з ним.

Окрім того, за допомогою геолокації IP можна відстежувати місцезнаходження відвідувачів. Використовуючи базу даних геолокації IP, або API, відвідувачі можуть визначати геолокацію на рівні міста, регіону чи країни [1; 2].

Для збору даних про користувачів вебсайту застосовують різні інструменти вебаналітики, які загалом класифікують на два типи: 1) засоби інтернет-статистики; 2) *log*-аналізатори. Засоби інтернет-статистики – це зовнішні програми, які передбачають розміщення на сайті певного програмного коду. За його допомогою відбувається перенесення даних у базу, яка розміщена на сервері постачальника послуг однак є доступною власнику відповідного веб-ресурсу. Ці програми є досить простими й зручними у використанні та уможливають наочне представлення статистичної інформації.

Щодо *log*-аналізаторів, то це програми, які встановлюються на комп'ютер користувача і формують статистичні звіти у вигляді *log*-файлів. Інформація з цих файлів збирається за певною періодичністю, обробляється та зберігається у внутрішньому архіві. Робота з такими інструментами дещо складніша, потребує спеціальної підготовки аналітика та ґрунтується на прикладних програмах (Webalizer, AWStats), ко-

трі обробляють файли реєстрації подій вебсервера, що генеруються HTML-сторінками та, відповідно, формують статистику роботи вебсайту.

Важливий показник популярності вебсайту – це кількість відвідувачів. Спосіб фіксування цього показника є доволі нескладним і доступним, а відтак дає змогу визначити трафік вебсайту на основі «лічильника відвідувань». Найпопулярнішими серед безкоштовних лічильників є Google Analytics [5], який також дає змогу отримати, опрацювати й аналітично відобразити поведінку користувачів сайту. До основних функцій Google Analytics відносять: 1) порівняння ефективності рекламних кампаній та ключових слів; 2) аналіз внутрішнього пошуку на сайті; 3) порівняння показників ефективності вебсайту із середніми показниками інших вебсайтів у спільній галузі; 4) порівняння даних за різні періоди часу; 5) відстеження електронної торгівлі; 6) передача призначених для користувача звітів електронною поштою; 7) сегментація відвідувачів за регіонами тощо.

Google Analytics та інші сервіси аналітики надають деякі дані про трафік, але з ними не завжди можна об'єктивно оцінити користь від каналів просування. Тобто немає можливості встановити, з якого саме ресурсу надійшла найбільша кількість нових користувачів після того, як розташовано інформаційне повідомлення (реклама) про послуги на вебсайті, який ми моніторимо. Це завдання досить легко виконати завдяки технології Urchin Tracking Module (UTM-мітки). UTM-мітки (теги, або коди) – це невеликі фрагменти коду, які додаються в кінець URL-адреси та дають змогу інструментам аналітики (таким як Google Analytics) відстежувати джерело трафіку.

Кожна UTM-мітка складається із двох складових – параметр та змінна відстеження. Параметри завжди залишаються незмінними, а змінні відстеження вказують на джерела трафіку, що дає змогу відстежувати потік нових користувачів вебсайту. Хоча UTM-параметр має власну функцію, однак їх загальна мета – вимірювати та маркувати трафік, що надходить на вебсайт. Отже, коректне використання UTM-міток дозволяє: 1) дізнатися, звідки саме приходять користувачі; 2) визначити, в якій соціальній мережі рекламна кампанія спрацювала найбільш ефективно; 3) визначити, яка e-mail розсилка привела більше користувачів; 4) дізнатися, який тип контенту користується найбільшою популярністю; 5) аналізувати ефективність рекламних креативів; 6) отримати цінну інформацію щодо сегментації користувачів та розробки контенту; 7) виміряти окупність інвестицій

(ROI) і коректно їх реалізовувати; 8) налаштувати цифровий маркетинг для досягнення найвищої конверсії вебсайту.

Наведено п'ять універсальних UTM-міток, що підтримуються більшістю лічильних сервісів аналітики [11; 13; 19]:

**utm\_source** – визначає джерело, через яке був зроблений перехід на сайт;

**utm\_medium** – визначає тип трафіку, наприклад, перехід після кліку на банер;

**utm\_campaign** – визначає назву рекламної кампанії;

**utm\_term** – визначає ключові слова, які призвели до показу реклами;

**utm\_content** – додатковий ідентифікатор, який допомагає визначити джерело трафіку, якщо інші параметри співпадають.

Для спрощення роботи з UTM-мітками використовують безкоштовні компонувальники посилання, які самостійно збирають потрібний URL – необхідно лише задати значення параметрів. Використання таких сервісів дає змогу сформувати URL із заданими UTM-мітками, що налаштовуються відповідно до мети «інформаційної кампанії» (табл. 1). Зокрема, у звичайному URL немає спеціальних символів, на відміну від URL із згенерованими UTM-мітками.

Параметри, які повинні містити UTM-мітки:

1) Обов'язковий параметр «Джерело трафіку» `utm_source=google` – контекстна реклама в Google Adwords;

2) Обов'язковий параметр «Тип трафіку» `utm_medium=cpc` – контекстна реклама (cost per click), `display` – банерна реклама з оплатою за покази, `social_cpc` – реклама в соціальних мережах з оплатою за клік тощо;

3) Обов'язковий параметр «Назва кампанії» `utm_campaign=visnyk` – рекламна кампанія щодо послуг у науковому віснику Львівського НУП;

4) Необов'язковий параметр «Ідентифікатор оголошення» `utm_content=agroengineeringresearch` – текстове оголошення про секцію «Агроінженерні дослідження» в науковому віснику;

5) Необов'язковий параметр «Ключове слово» `utm_term=2023` – слово-запис, з якого почався показ оголошення;

6) Знак «=» з'єднує параметри та їх значення.

7) & – амперсанд, що має протилежне значення попередньому, він поділяє параметри UTM між собою.

8) ? – знак питання, відокремлює оригінальне посилання від UTM-мітки.

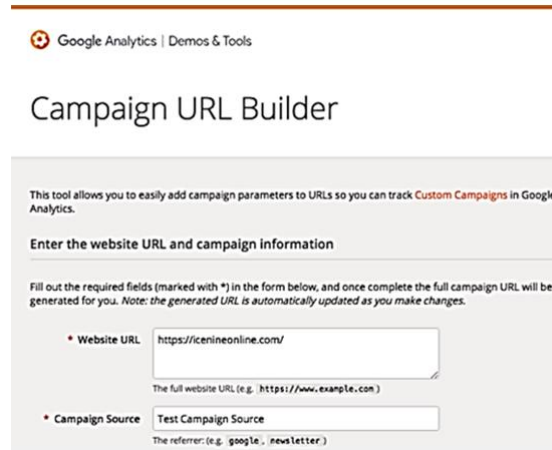
**Таблиця 1.** Реалізація звичайного URL посилання та URL із згенерованою UTM-міткою  
**Table 1.** Implementation of a normal URL link and URL with generated UTM-tag

Звичайне URL посилання	URL посилання із згенерованою UTM-міткою
<a href="http://visnyk.lnup.edu.ua">http://visnyk.lnup.edu.ua</a>	<a href="http://visnyk.lnup.edu.ua/?utm_source=google&amp;utm_medium=cpc&amp;utm_campaign=visnyk&amp;utm_content=agroengineeringresearch&amp;utm_term=2023">http://visnyk.lnup.edu.ua/?utm_source=google&amp;utm_medium=cpc&amp;utm_campaign=visnyk&amp;utm_content=agroengineeringresearch&amp;utm_term=2023</a>

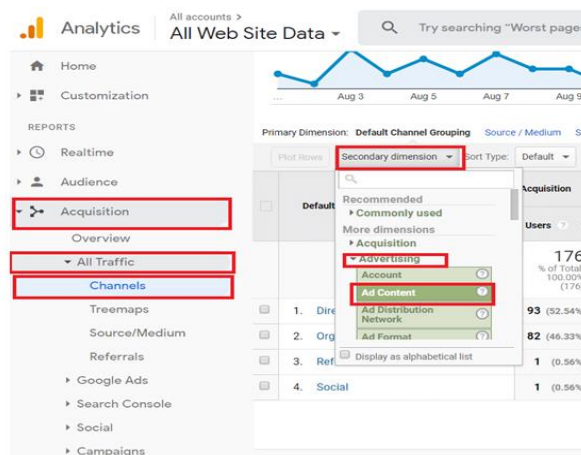
Один із таких сервісів для генерування UTM-міток – Campaign URL Builder від Google Analytics Demos&Tools зображено на рис. 1.

Необхідно зазначити, що UTM-мітки також використовують динамічні змінні, які підтримуються більшістю рекламних систем в Інтернеті. Генерування таких URL зручне для систем із налаштованою динамічною рекламою. Тоді вебсервіс із вбудованою рекламою автоматично додасть потрібні дані в URL-адресу під час кожного переходу за інформаційним (рекламним) повідомленням. Таке використання динамічних змінних в UTM-мітках є зручним, коли необхідно налаштувати велику кількість ключових слів для рекламної кампанії, але потім потрібно буде встановити яке із поширених повідомлень найкраще працює. Для таких «масових» завдань не потрібно генерувати окреме посилання для кожного ключа із параметром `utm_term`, а практичніше використати динамічне значення.

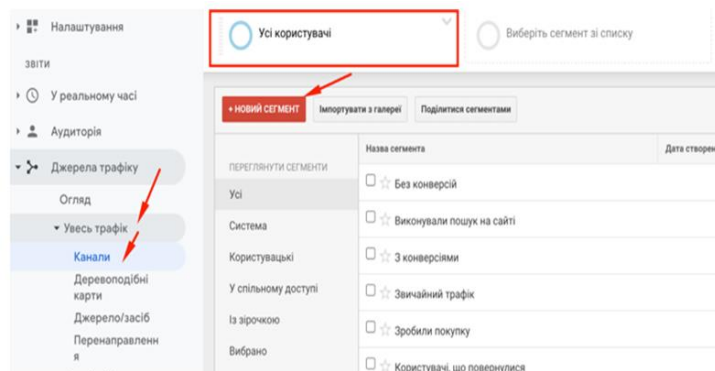
Динамічний параметр прописується у фігурних дужках – `utm_term={keyword}`, наприклад, щоб дізнатися про тип пристрою, з якого отримано клік. Якщо використовувати динамічний фрагмент на зразок – `utm_content={device}`, то після переходу за посиланням з динамічним параметром Google Ads задіє автоматичну зміну `{device}` на тип пристрою, з якого перейшли: 1) «m» – мобільний телефон; 2) «t» – планшет; 3) «c» – комп'ютер. У цьому разі, дані які збирають мітки надходять до сервісів аналітики. Для того, щоб встановити джерела трафіку вебсайту та сформувати звіт активності користувачів за допомогою системи Google Analytics в меню цієї сторінки, необхідно обрати «Джерела трафіку» > «Увесь трафік» > «Джерело/канал» і саме тут знаходяться дані, зібрані за параметрами `utm_source` та `utm_medium` (рис. 2).



**Рис. 1.** Компонувальник Campaign URL Builder для створення URL з UTM-міткою  
**Fig. 1.** Layout tool Campaign URL Builder for creating URLs with UTM-tags



**Рис. 2.** Увімкнення аналізатора джерел трафіку за UTM-мітками в системі Google Analytics  
**Fig. 2.** Enabling the analyzer of traffic sources by UTM-tags in the Google Analytics system



**Рис. 3.** Активація компоувальника сегменту в Google Analytics  
**Fig. 3.** Activation of the segment layout in Google Analytic

Інформацію щодо аудиторії каналу, а також детальний звіт стосовно зацікавленості поширеним повідомленням, можна отримати користуючись компоувальником сегментів – «Джерела трафіку» → «Весь трафік» → «Канали». Вибрати зверху пункт «Усі користувачі» та кнопку «Сегмент», яка з'явиться нижче (рис. 3).

З метою практичного застосування технології Urchin Tracking Module (UTM-мітки) для

моніторингу трафіку сайту та вебаналітики використано систему Google Analytics. Зокрема, після поширення повідомлень у соціальних мережах окремих ВУЗів України (табл. 1) щодо можливості видання наукових праць через веб-сайт Вісника «Агроінженерні дослідження» Львівського національного університету природокористування, встановлено сплеск активності нових користувачів на цьому сайті.

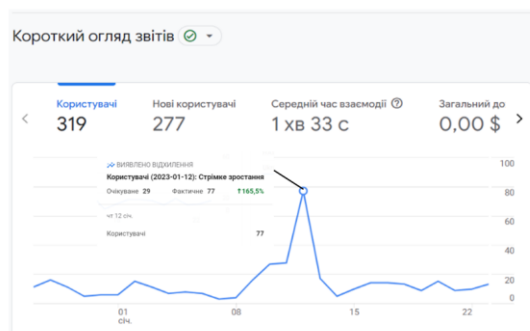
**Таблиця 2.** Цільова аудиторія поширення інформації щодо видання наукових праць у віснику «Агроінженерні дослідження» ЛНУП

**Table 2.** Target audience for the dissemination of information on the publication of scientific works in the “Agroengineering Research” bulletin of LNEU

№ з/п	Навчально-науковий заклад	Соціальні мережі
1	Луцький національний технічний університет (Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій; Факультет аграрних технологій та екології)	Групи викладачів у Viber
2	Вінницький національний технічний університет (Факультет машинобудування та транспорту)	Групи викладачів у Viber
3	Національний університет «Одеська політехніка» (Інститут цифрових технологій, дизайну та транспорту)	Групи викладачів у Viber, Telegram
4	Національний університет біоресурсів та природокористування України (Механіко-технологічний факультет)	Групи викладачів у Viber
5	Подільський технічний університет (Інженерно-технічний факультет, кафедра тракторів, автомобілів та енергетичних засобів)	Групи викладачів у Viber, Telegram
6	Кембриджський університет (Study camp foreign teachers)	Групи слухачів у WhatsApp, Telegram
7	Приватні оголошення	Instagram

Зокрема, результати відгуку та активності користувачів проаналізовано завдяки Google Analytics для періоду з – 01.01.24 по 24.01.24 р. У результаті проведеної інформаційної рекламної кампанії отримано сплеск активності на сайті та приріст нових користувачів (рис. 4).

Отже, використання UTM-міток дає змогу встановити швидкість реакції користувачів на рекламні повідомлення, терміни найвищої активності нових користувачів на вебсайті, її тривалість тощо. Зокрема, зростання активності користувачів становило 165.5 %, що вказує на зрозумілість та прийнятність інформації, поданої в оголошеннях щодо наукового Вісника. Нові користувачі переважно залучалися внаслідок direct переходів через URL, або за збереженими вкладками. Аналіз джерел надходження нових користувачів дав змогу встановити, що «Джерело сеансу» відбувалося в основному за прямим посиланням, котре розміщене в оголошенні про надання послуг вебсайту.



**Рис. 4.** Сплеск активності користувачів вебсайту наукового вісника «Агроінженерні дослідження» ЛНУП

**Fig. 4.** Surge in the activity of the website users of scientific bulletin “Agroengineering Research” of LNEU

Визначено, що найактивнішими «Джерелами сеансу» були три ресурси – пряме посилан-

ня (direct), пошукова система Google та офіційний сайт університету Львівського НУП.

**Висновки.** 1. За допомогою технології Urchin Tracking Module можна зібрати інформацію про джерело трафіку вебсайту, ключові слова, які привели до показу оголошення, та інші показники, що важливі для оцінки ефективності повідомлень щодо просування послуг у вебсервісах Інтернету. Моніторинг такої активності користувачів можна реалізовувати завдяки різним інструментам вебаналітики, зокрема використовуючи систему Google Analytics, яка дає змогу збирати дані з вебсайтів і додатків і формувати звіти щодо активності та дій користувачів.

2. Системи інтернет-статистики використовуються масово, завдяки своїй зручності й простоті. Кожна із них має свої переваги та недоліки. Зокрема, Google Analytics володіє багатьма функціями для аналізу трафіку вебсайту, має адаптивний інтерфейс, значну кількість режимів, фільтрів і налаштувань що дає змогу детально аналізувати відвідувачів сайту, їх потенціал, вподобання і потреби, а також оформляти зручні та наочні звіти.

3. Використання UTM-міток дає змогу встановити швидкість реакції користувачів на рекламні повідомлення, терміни найвищої активності нових користувачів на вебсайті, її тривалість тощо. Зокрема використання цієї технології для поширення інформації про вебсайт наукового вісника Львівського НУП дало змогу зафіксувати зростання активності користувачів цього ресурсу на рівні 165.5 %. Нові користувачі переважно залучалися внаслідок direct переходів через URL, або за збереженими вкладками. Аналіз джерел надходження нових користувачів дав змогу встановити, що «Дже-

рело сеансу» відбувалося загалом за прямим посиланням.

#### Бібліографічний список

1. Беляева Я. Звести рахунки: 5 інструментів аналітики сайтів-конкурентів. *Platforma*. URL: <http://platfor.ma/magazine/text-sq/media-innovations-lab/analytic-tools/> (дата звернення 05.03.2024)
2. Веб-аналітика корпоративного класу. *Google Аналітика*. URL: <http://www.google.com/analytics/> (дата звернення 05.02.2024)
3. Мозуль Х. І. Інформаційно-комунікаційні технології просування інтернет-магазину в соціальних мережах. Кваліфікаційна робота. Кафедра ІТ. Дубляни, Львівський НУП, 2023. 74 с. URL: <https://repository.lnup.edu.ua/jspui/handle/123456789/899> (дата звернення 05.03.2024)
4. Маркова О. М. Моделі використання хмарних технологій у підготовці ІТ-фахівців. *Наук. часоп. НПУ імені М. П. Драгоманова : зб. наук. праць*. 2016. № 18 (25). Київ: НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2016. С. 85–94.
5. Осипенков Я. *Google Analytics 2019: Tutorial Book*. 754 с.
6. Переваги та недоліки використання хмарних технологій підприємствами України. URL: <http://www.bsfa.edu.ua/files/konf2013/62.pdf> (дата звернення: 20.01.2024).
7. Рамський Ю. С. Вивчення інформаційно-пошукових систем мережі Інтернет : навч.-метод. посіб. Нац. пед. унт ім. М. П. Драгоманова. Київ, 2008. 60 с.
8. Специфіка інформаційних систем на основі технології cloud computing. URL: [http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/vcndtu/2011\\_53/29.htm](http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/vcndtu/2011_53/29.htm) (дата звернення: 10.01.2024).
9. Спірін О. М. Зміст навчального матеріалу спецкурсу «Хмарні інформаційно-аналітичні технології у науково-дослідному процесі». *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2016. Т. 52, Вип. 2. С. 108–120.
10. Хмарні технології. URL: <http://j.parus.ua/ua/358> (дата звернення: 15.01.2024).
11. Черубіні Ф. Тенденція 7 – еволюція аналітики – ключові індикатори для вимірювання зростаючих аудиторій редакціями. Тенденції в редакціях 2015. URL: <https://drive.google.com/file/d/0BxNmkm4Or6qa3B4WnQteE5UaUdEWW8tTnhza25rWmVWekJ3/view> (дата звернення: 25.03.2024). С. 79–86.
12. Як проаналізувати сайт конкурентів, якщо у нього закрита статистика. *Прес-центр*. URL: [http://presscentre.com.ua/news/jak\\_proanalizuvati\\_sajt\\_konkurentiv\\_jakshho\\_u\\_nogo\\_zakrita\\_statistik\\_a/2015-02-02-564](http://presscentre.com.ua/news/jak_proanalizuvati_sajt_konkurentiv_jakshho_u_nogo_zakrita_statistik_a/2015-02-02-564) (дата звернення: 08.03.2024).
13. 300+ Marketing Tools: The Ultimate MarTech Stack for 2021 / *MobileMonkey*. 2021. URL: <https://mobilemonkey.com/blog/marketing-tools>. (дата звернення: 08.03.2024).
14. Bratushka S. M., Novak S. M., Khailuk S. O. *Decision support systems, DVNZ «UABS NBU»*, Sumy, 2010. 265 с.
15. Burby J. Brown A. *Web Analytics Definitions Version 4.0*. URL: <http://www.digitalanalyticsassociation.org> (дата звернення: 12.02.2024).
16. Clifton B. *Advanced Web Metrics with Google Analytics (3rd ed.)*. Indianapolis, IN: John Wiley & Sons., 2012. P. 11–16 с.
17. Demydenko M. A. *Decision support systems, National Mining University, Dnipro*. URL: <http://nmu.org.ua>. (дата звернення: 20.02.2024).
18. Gambling market revenue in Europe / H2 Gambling Capital. URL: <https://www.egba.eu/eu-market/> (дата звернення: 20.03.2024).
19. *Google Analytics: розширений курс. Курси академії Google Analytics*. URL: <https://analytics.google.com/analytics/academy/course/7> (дата звернення: 22.03.2024).
20. *Global Sports Betting Market 2021-2025 / Research and Markets*. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4894526/global-sports-betting-market-2021-2025> (дата звернення: 26.03.2024).
21. Nakatani, K., Chuang, T. A web analytics tool selection method: an analytical hierarchy process approach. *Internet Research*. 2011. No 21(2). P. 171–186 с.

Стаття надійшла 03.04.2024

УДК 004.77:005:635.07

## ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПРОСТЕЖУВАНІСТЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ

*Алла Желєзняк, к. е. н., Вадим Пташник, к. т. н., Роман Падюка, к. т. н.,  
Валентин Смолінський, к. е. н., Володимир Станько, к. е. н.  
Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: azheleznjak@ukr.net, ptashnykproject@gmail.com, padyukaroman@gmail.com,  
vsmolinski@ukr.net, vstanko@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.166>

### **Желєзняк А., Пташник В., Падюка Р., Смолінський В., Станько В. Використання інтелектуальних інформаційних систем для управління простежуваністю сільськогосподарської продукції**

Розвиток сільського господарства в сучасних умовах повинен враховувати не лише технологічні чинники виробництва та рівень використання ресурсного потенціалу, а й вимоги до якості сільськогосподарської продукції. На законодавчому рівні в Україні впроваджуються вимоги управління ланцюгами поставок сільськогосподарської продукції. У зв'язку з цим у виробників продуктів харчування виникає потреба в автоматизації процесу управління простежуваністю сільськогосподарської продукції. Це дасть змогу переробним підприємствам впроваджувати внутрішні стандарти якості відповідно до регламентів Європейського Союзу та законодавчих норм України. Виробники продуктів харчування можуть нести юридичну відповідальність за безпеку продуктів харчування на всіх етапах: від виробництва до збуту в роздрібній мережі, що зумовлює важливість окресленого питання для цієї категорії підприємств як користувачів інформаційних систем і технологій. Впровадження спеціалізованих інтелектуальних інформаційних технологій дасть змогу виробникам та переробним підприємствам ефективніше управляти ланцюгами поставок та бути конкурентоспроможними на внутрішньому і зовнішньому ринках.

У статті здійснено аналіз перспектив використання інтелектуальних інформаційних систем для управління ланцюгом постачання та простежуваністю сільськогосподарської продукції. Розглядаються основні компоненти інтелектуальної інформаційної системи, яка б дозволяла виконувати поставлені вимоги із забезпечення простежуваності продукції від виробництва до реалізації. Здійснено опис процесів, що впливають на простежуваність продукції та можуть бути автоматизовані: ідентифікація та маркування, система ведення запасів, впровадження технологій та інструментів відстеження. Описано допоміжні технології, які можуть використовуватися для забезпечення продукції для сільського господарства. Розглянуто можливості застосування технологій безконтактного обміну даними та інструментів відстеження на прикладі RFID. Запропоновано напрями вирішення проблем простежуваності продукції для сільськогосподарських виробників з використанням інтелектуальних інформаційних технологій.

**Ключові слова:** інтелектуальні інформаційні системи, простежуваність, ланцюги поставок, сільськогосподарська продукція.

### **Zheliezniak A., Ptashnyk V., Padiuka R., Smolinskyi V., Stanko V. Intelligent information systems for managing the traceability of agricultural products**

The development of agriculture in modern conditions must take into account not only technological production factors and the efficient use of resources but also the quality requirements for agricultural products. Ukraine is establishing legislative measures for managing agrarian supply chains. Consequently, food producers need to automate the process of tracking the traceability of agricultural products. This automation will enable processing companies to implement internal quality standards that comply with both EU regulations and Ukrainian legislation. Food producers can be legally held accountable for food safety at all stages, from production to retail sales. This makes traceability a critical issue for these enterprises, particularly as users of information systems and technologies. By introducing specialized intelligent information technologies, manufacturers and processing companies can manage their supply chains more effectively and enhance their competitiveness in both domestic and international markets.

The article analyzes the potential for employing intelligent information systems to manage supply chains and the traceability of agricultural products. It discusses the main components of an intelligent information system that could help ensure product traceability from production to sale. It also describes the processes that affect traceability and can be automated, including identification and labeling, inventory management systems, and the implementation of technologies and tools for tracking. Furthermore, the authors explore additional technologies that can support agricultural products, examining the use of contactless data exchange technologies and tracking tools, such as RFID. Finally, they propose solutions for addressing the challenges of product traceability for agricultural producers through intelligent information technologies.

**Keywords:** intelligent information systems, traceability, supply chains, agricultural products.

**Постановка проблеми.** 23 червня 2022 року Європейська рада надала Україні статус законодавства, імплементації спільних політик, співробітництва тощо, зокрема й щодо вимог з виробництва, переробки та розповсюдження (реалізації) сільськогосподарської продукції та продуктів харчування [3]. Незважаючи на значний спад зовнішньої торгівлі України з початком повномасштабного вторгнення, у 2023 році з України експортували товарів на 36 млрд дол. США, з яких основна частка операцій припадала на експорт товарів продовольства (здебільшого зерна) та металів [6]. Експорт продовольства у цей період в загальному становив 21,8 млрд дол. США, або 60,6 %. Незважаючи на труднощі, які виникли в українських експортерів через блокування польськими протестувальниками кордону та можливостей використання сухопутних шляхів для експорту зерна та інших товарів продовольства, за підсумками січня–вересня 2023 року основними торговельними партнерами України, куди експортувалася українська продукція, були: Польща (3,7 млрд дол. США), Румунія (3 млрд дол. США), Туреччина (1,9 млрд дол. США) [8]. Європейський Союз був і залишається стратегічним партнером України. У 2022 році питома вага торгівлі товарами та послугами України з ЄС становила 53,6 % від загального обсягу торгівлі України [1]. У структурі українського експорту в ЄС 16,8 % у 2022 році припадало на зернові культури, 11 % – на жири та олії, 10,4 % – насіння і плоди олійних рослин. Ці дані свідчать про важливість та пріоритетність ринку Європейського Союзу для українських виробників продуктів харчування та сільськогосподарської продукції, а отже, й необхідність врахування вимог законодавства країн Європейського Союзу щодо простежуваності та безпеки продукції, що надходить та реалізовується на ринку ЄС. Відповідно до директив та регламентів ЄС простежуваність завжди вимагається для будь-якої речовини, що може або буде використовуватись у продуктах харчування або кормах, однак існують жорсткіші вимоги простежуваності до таких продуктів, як тварини, генно-модифіковані організми (ГМО), фрукти та овочі, деякі товари тваринного походження (яловичина, риба, мед), оливкова олія [3]. Маркуванню та ідентифікації також підлягають продукти харчування та корми, які розміщуватимуться або можуть розміщуватися на ринку ЄС [3]. Забезпечення простежуваності сільськогосподарської продукції передбачає обробку та аналіз даних, пов'язаних з усіма етапами логістичного ланцюга продукції, забезпечення достовірності цих даних, їх повноти та своєчасності. Розв'язання

кандидата на вступ до ЄС [9], що ознаменувало новий етап реалізації заходів із гармонізації задач, зумовлених відповідністю законодавства з окресленого питання, можливе із застосуванням інформаційних технологій та автоматизації цього процесу на всіх етапах, створенням відповідних реєстрів та обміну даними, зокрема й за рахунок використання інтелектуальних інформаційних технологій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз останніх публікацій Групи Світового банку [4] дав змогу встановити, що забезпечення простежуваності продукції відповідно до найкращих практик має відбуватися завдяки забезпеченню безперервності інформації на всіх етапах виробничого процесу із врахуванням законодавчо встановленої вимоги «крок назад – крок вперед», створенню та підтримці точних облікових записів простежуваності, відстеженню фізичного руху продукту харчування вздовж харчового ланцюга. Багато наукових праць присвячено питанню автоматизації простежуваності продукції, що зумовлено розвитком інформаційних технологій та змінами в законодавчій базі низки країн [2; 11; 16; 19]. Окремі дослідження глибше розкривають питання застосування інтелектуальних технологій для простежуваності й безпеки продуктів харчування [12; 13]. Водночас у наукових дослідженнях не повністю розкрито питання реалізації простежуваності сільськогосподарської продукції з урахуванням тенденцій розвитку інтелектуальних інформаційних систем на основі технологій штучного інтелекту. Тому виникає потреба в глибшому аналізі перспектив застосування інтелектуальних інформаційних технологій, інтегрованих із допоміжними технологіями, технологіями без контактного обміну даними, інструментами відстеження, для виконання операційних завдань, пов'язаних з автоматизацією процесу управління простежуваністю сільськогосподарської продукції.

**Постановка завдання.** Наше завдання – представити результати аналізу перспектив застосування інтелектуальних інформаційних технологій для управління простежуваністю сільськогосподарської продукції; обґрунтувати напрямки застосування та рекомендовані компоненти інтелектуальної інформаційної системи для управління простежуваністю сільськогосподарської продукції.

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до законодавства Європейського Союзу під простежуваністю сільськогосподарської продукції слід розуміти здатність виявити і простежити за будь-яким харчовим продуктом, кормом, твариною, призначеною для виробництва харчових продуктів, або речовиною, що буде

використана для споживання, на всіх етапах виробництва, переробки та розповсюдження [3]. Сільськогосподарські виробники не здатні реалізувати поставлені завдання з управління простежуваністю сільськогосподарської продукції відповідно до вимог законодавства без використання ефективної інформаційної системи, адже цей процес передбачає збір, зберігання та обробку великих обсягів даних про партії сільськогосподарської продукції на всіх етапах логістичного ланцюга та доступність цієї інформації для всіх зацікавлених сторін у будь-який момент часу.

Управління простежуваністю сільськогосподарської продукції може охоплювати процеси, які сприяють контролю, відстеженню та безпеці продуктів від полів до столу (табл. 1). Початковим етапом у формуванні простежуваності сільськогосподарської продукції є ідентифікація та маркування партій продукції відповідними кодами та записами в реєстрах. Після проведення ґрунтового аналізу цього процесу було виявлено, що найтипівішими помилками на цьому етапі є неточність внесених даних, часто зумовлена людським чинником. На практиці в період збору врожаю можуть виникати неточності у фіксуванні даних у відповідних реєстрах, зокрема внесенні даних про дату

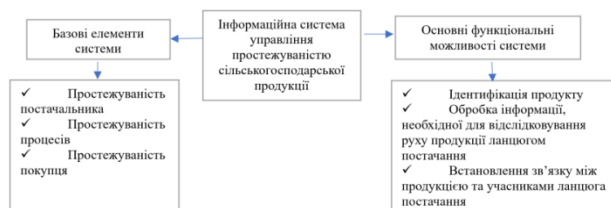
збору врожаю, номер поля або сорт культури. Значний вплив на якість зібраних даних на цьому етапі мають надійність і технічні характеристики системи. Перебої з електропостачанням та інтернет-з'єднанням під час маркування та ідентифікації партій продукції можуть призвести до втрати або спотворення даних, появи помилок під час передачі даних. Якість автоматизованого управління ланцюгом простежуваності визначається також рівнем інтеграції різноманітних систем управління ланцюгом постачання, що зумовлено якістю передачі даних на всіх етапах постачання. Зазвичай учасниками процесу простежуваності сільськогосподарської продукції є кінцеві споживачі, виробники сільськогосподарської продукції, заклади громадського харчування, харчові та переробні підприємства, представники мережі ритейлу, оператори ринку, які здійснюють зберігання продукції, компанії-перевізники, брокери, трейдери тощо. На практиці можливе виникнення ситуацій, які можуть підірвати довіру до системи простежуваності, адже недобросовісні виробники або посередники можуть підробляти маркування продукції, щоб приховати її походження, підвищити цінність, реалізувати підроблену або неякісну продукцію під виглядом сертифікованих товарів.

**Таблиця 1.** Опис процесів, пов'язаних із простежуваністю сільськогосподарської продукції  
**Table 1.** Description of processes related to the traceability of agricultural products

Назва процесу	Короткий опис
1. Ідентифікація та маркування	Кожна партія сільськогосподарської продукції повинна бути ідентифікована та позначена унікальними кодами або маркуванням, яке дозволяє відстежувати її від початкової точки вирощування до кінцевого споживача
2. Система ведення записів	Автоматизована система ведення записів відображає всі етапи вирощування, обробки, збирання та реалізації продукції. Сюди належить інформація про використані добрива, засоби захисту рослин, дати збирання, умови зберігання та транспортування
3. Технології та інструменти відстеження	Використання сучасних технологій, як наприклад, RFID (радіочастотна ідентифікація), з метою полегшення процесів відстеження продукції від поля або ферми до кінцевого споживача
4. Стандарти безпеки та якості	Встановлення стандартів безпеки та якості дає змогу забезпечити відповідність сільськогосподарської продукції нормативним вимогам та зменшити ризики виникнення проблем
5. Системи трасування та взаємозв'язку	Забезпечення можливості відслідковувати всі взаємозв'язки між різними етапами вирощування та переробки сільськогосподарської продукції для швидкого реагування в разі виникнення проблем із якістю або безпекою

Використання інформаційної системи допоможе унікально ідентифікувати кожен партію продукції та відстежувати її шлях від початкового вирощування до кінцевого пункту продажу. Виходячи із завдань, пов'язаних із забез-

печенням простежуваності продукції [4], інформаційна система управління цим процесом повинна забезпечувати наявність базових елементів відповідно до законодавства та реалізувати низку основних функцій (рис. 1).



**Рис. 1.** Характеристика інформаційної системи управління простежуваністю сільськогосподарської продукції

**Fig. 1.** Description of the information system of agricultural products traceability management



Обробка інформації, необхідної для відстеження руху сільськогосподарської продукції ланцюгом постачання, може відбуватися на основі даних, отриманих із сучасних технологій безконтактного обміну даними та інструментів відстеження, наприклад таких, як RFID (Radio Frequency Identification). Ця технологія, заснована на використанні радіочастотного електромагнітного випромінювання, може використовуватися для обліку товарів і подій під час складського зберігання та транспортування, відстеження їх переміщень на виробництві, у логістиці та торгівлі [5]. Ця технологія може мати низку переваг перед традиційним маркуванням партій продукції за допомогою традиційних штрих-кодів, однак її впровадження потребує реалізації комплексного підходу, а саме підбору та використання RFID-зчитувачів, розгортання відповідної інфраструктури, застосування міток, налаштування RFID-принтерів. Ефективність провадження цієї технології залежатиме від її впровадження та використання всіма учасниками логістичного ланцюга, адже отримані дані будуть цінними для всіх учасників процесу, зокрема й для регуляторних і контролюючих органів або кінцевого споживача (рис. 2).

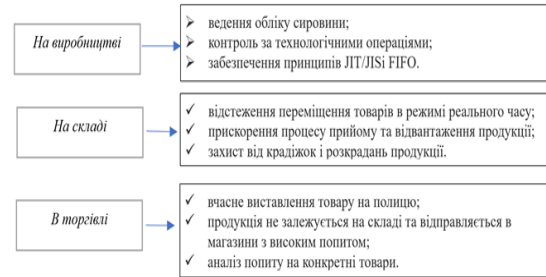


Рис. 2. Приклади застосування технології RFID у логістиці [5]

Fig. 2. Examples of the use of RFID technology in logistics [5]

Оскільки технологія RFID має перспективи використання для простежуваності сільськогосподарської продукції та продуктів харчування, було розглянуто етапи її впровадження на основі рекомендацій компаній [7]. На рис. 3 подано схему застосування електронних етикеток у формі RFID-міток, які фактично є мініатюрним запам'ятовуючим пристроєм, пам'ять якого містить унікальні інформаційні дані та номер [10]. Оскільки сільськогосподарська продукція має свої фізіологічні характеристики (наприклад, зерно, молоко тощо), RFID-мітки можуть використовуватися як безпосередньо на продукцію (що більш ефективно для продуктів харчування), так і на упаковку або тару.

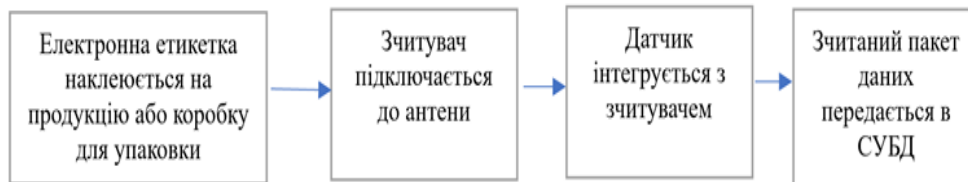


Рис. 3. Застосування технології RFID для простежуваності сільськогосподарської продукції  
 Fig. 3. Application of RFID technology for traceability of agricultural products

Завдяки використанню міток RFID інформаційна система управління простежуваністю сільськогосподарської продукції оперативно отримуватиме дані про походження продукції, умови та деталі виробництва, маршрут транспортування тощо. Отримана інформація реєструється в системі RFID та передається в базу даних управління безпекою харчових продуктів.

Оскільки з поширенням практики впровадження сучасних технологій та інструментів відстеження даних на основі маркування продукції, застосування традиційних підходів штрих-кодування або більш сучасної технології RFID в інформаційну систему управління простежуваністю продукції надходитиме все більше даних, на нашу думку, обробка цих даних дозволить не лише інтегрувати поширення інформації під час усього ланцюга постачання та надавати інформацію щодо якості,

безпеки та походження харчових продуктів, відстежуваності безпеки харчових продуктів, а й планувати та управляти потенційними ризиками у перспективі. Розв'язати ці задачі можливо на основі застосування інтелектуальних інформаційних систем управління відстежуваністю сільськогосподарської продукції.

Загалом інтелектуальна інформаційна система (IIS) є більш комплексним рішенням та структурою, оскільки, на відміну від традиційних інформаційних систем, поєднує різноманітні технології і методи збору, обробки та аналізу інформації, може передбачати використання методів машинного навчання, штучного інтелекту для обробки наборів великих даних з метою ухвалення управлінських рішень. Перспективою використання інтелектуальної інформаційної системи є те, що, окрім традиційних рішень та завдань, вона може генерувати нові

знання та дані у визначеній предметній сфері.

Проаналізувавши існуючі типи інтелектуальних інформаційних систем, було виділено перспективи їх використання для покращання процесів управління простежуваністю продукції в частині розпізнавання та обробки даних про продукцію, яка може надходити в систему з документів та реєстрів, заповнених вручну, із скан- або фотокопій документів. Це дасть змогу підвищити якість даних про походження сільськогосподарської продукції, яка надходить на переробне підприємство, дистриб'ютору або в ритейл від дрібних сільськогосподарських виробників (наприклад, особистих селянських господарств, що займаються вирощуванням малини), які часто не мають можливості використовувати сучасні технології маркування, штрих-кодування чи застосування міток RFID.

Розглянувши дослідження на цю тему [17] та проаналізувавши можливі випадки використання інтелектуальної інформаційної системи для простежуваності на етапі надходження продукції з поля або ферми, було обґрунтовано включення функціональної вимоги до системи на основі інтелектуального аналізу тексту (text mining), зокрема на основі штучного інтелекту та цифрових помічників. Це дасть змогу якісніше реалізовувати процеси з розпізнавання тексту на документах, сортувати та кластеризувати документи, формувати резюме і надавати рекомендації (добавити пропущені дані, дату або підпис), перевіряти текст на помилки.

На рис. 4 показано основні напрями застосування інтелектуального аналізу тексту, які можуть бути також корисні для виконання завдань, пов'язаних із простежуваністю продукції.



**Рис. 4.** Напрями застосування інтелектуального аналізу тексту  
**Fig. 4.** Uses of text mining in the field of text analysis

Згідно із загальноприйнятими правилами [4], розрізняють різні типи фіксації інформації в ланцюжку постачання: паперова форма, баркоди, комп'ютерні програми тощо. Оскільки в різних учасників логістичного ланцюга можуть бути представлені різноманітні форми подання інформації, застосування інтелектуальної техно-

логії видобування (вилучення) інформації [15] дасть змогу на практиці використати переваги цього процесу аналізу неструктурованих даних про походження продукції, вилучити цю інформацію в цифровому форматі даних, а пізніше її відредагувати та структурувати.

Покращання системи відстежуваності можливе і за рахунок використання можливостей та перспектив штучного інтелекту, зокрема й генеративного штучного інтелекту у формі цифрових помічників. Відповідно до Регламенту (ЄС) № 178/2002 щодо загальних рекомендацій простежуваність харчових продуктів та ст. 3 Регламенту (ЄС) № 931/2011 простежуваність продукції тваринного походження має містити низку додаткової інформації, зокрема дату відправлення продукції, точний опис продукту, його кількість, найменування і адресу отримувача та відправника, наявність позначення, яке ідентифікує партію. Застосування нового функціоналу інтелектуальної інформаційної системи простеження у формі ШІ-помічника може допомогти якісніше аналізувати супровідні документи партії на помилки, надавати пропозиції щодо редагування документів (наприклад, добавити дату або ідентифікатор), підтягувати шаблони документів тощо.

Практичне застосування інтелектуальних систем розпізнавання символів (Optical Character Recognition, OCR) [18] надає можливість користувачу інформаційної системи оцифрувати необхідні файли і документи, що позитивно впливає на якість автоматизації пошуку та збору даних із сканованих документів у форматі pdf-файлів або зображень. Одним із способів реалізувати таке завдання в інтелектуальній інформаційній системі може бути функціональний модуль з використанням безкоштовного рішення OCR з відкритим кодом Tesseract (Google Tesseract OCR), ефективність якого для аграрної сфери підтверджена в наукових дослідженнях [14]. Оскільки основною функцією Tesseract є витягування друкованого або ж написаного тексту із зображень, у системі простежування ця технологія може мати ефективне застосування для розпізнавання етикеток або інших паперових документів (накладних, договорів) у сканованій або сфотографованій форм.

### Висновки

1. У процесі дослідження було проаналізовано основні підходи та напрями застосування технологій щодо впровадження інтелектуальних інформаційних систем для простежуваності сільськогосподарської продукції відповідно до вимог законодавства та існуючих практик.

Визначені основні етапи процесів, пов'язаних з простежуваністю сільськогосподарської

продукції, до яких можна віднести ідентифікацію та маркування продукції та її партій, автоматизацію системи ведення записів, використання технологій та інструментів відстеження, дотримання стандартів безпеки та якості продукції, забезпечення можливостей відстежувати всі взаємозв'язки між різними етапами вирощування та переробки сільськогосподарської продукції для швидкого реагування в разі виникнення проблем із якістю або безпекою.

2. Проведене дослідження та огляд сучасних технологій та інструментів відстеження продукції і партій показали перспективи технологій, заснованих на використанні радіочастотного електромагнітного випромінювання, зокрема міток RFID, в управлінні логістичними ланцюжками та простежуваністю сільськогосподарської продукції.

3. Проаналізовано недоліки існуючих інформаційних систем простежуваності продукції, які передбачають комбінування паперової форми подання інформації про партії товару з даними, що надходять від міток RFID, сканерів, зчитування штрих-кодів тощо.

4. Визначено перспективи застосування таких компонентів інтелектуальних інформаційних систем управління простежуваністю продукції як технологій безконтактного обміну даними, інтелектуального аналізу тексту, зображень та етикеток, генеративного штучного інтелекту у формі цифрових помічників та асистентів. Використання цих компонентів інтелектуальної інформаційної системи простежуваності сільськогосподарської продукції дасть змогу учасникам ланцюга простежуваності мінімізувати ризики обробки даних, аналізувати етикетки та дані щодо якості отриманої інформації, генерувати підказки для користувачів інтелектуальної інформаційної системи, які відповідають за редагування та доповнення даних відповідно до стандартів та вимог з простежуваності.

#### Бібліографічний список

1. Бюлетень стану торговельних відносин між Україною та ЄС у 2022 році. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=5db05993-288d-4981-9f26-f0f6efe586e2&title=BiuletенStanuTorgovelnikhVіdnosinMizhUkrainoiuTasU2022-Rotsi> (дата звернення: 24.02.2024).

2. Жигайло О. Використання технології Data Mining в автоматизованій системі простежуваності виробництва сирової соняшникової олії. *Automation Technological and Business-Processes*. 2014. Вип. 3 (19). doi:10.15673/2312-3125.19/2014.27953.

3. Простежуваність, відповідність та відповідальність. URL: [https://export.gov.ua/216-prostezhuvanist\\_vidpovidnist\\_ta\\_vidpovidalnist](https://export.gov.ua/216-prostezhuvanist_vidpovidnist_ta_vidpovidalnist) (дата звернення: 13.03.2024).

4. Простежуваність харчових продуктів: основні питання. URL: <http://surl.li/socjr> (дата звернення: 24.02.2024).

5. RFID ідентифікація в логістиці. URL: <https://systemgroup.com.ua/uk/rfid-identyfikaciya-v-logistyci> (дата звернення: 15.03.2024).

6. Самойлюк М., Левченко Є. Економіка України у 2023 році: головне. URL: <https://ces.org.ua/ukrainian-economy-in-2023-tracker-overview/> (дата звернення: 13.03.2024).

7. Технологія RFID для управління відстеженням харчових продуктів. URL: <https://ua.syntekrfid.net/info/rfid-technology-for-food-traceability-manageme-87650547.html> (дата звернення: 15.03.2024).

8. Товарообіг України за 9 місяців 2023 року. URL: [https://export.gov.ua/news/5015-tovaroobig\\_ukraini\\_za\\_9\\_misiatsiv\\_2023\\_roku](https://export.gov.ua/news/5015-tovaroobig_ukraini_za_9_misiatsiv_2023_roku) (дата звернення: 14.03.2024).

9. Шлях України до вступу в ЄС. URL: [https://eu-solidarity-ukraine.ec.europa.eu/ukraines-path-towards-eu-accession\\_uk](https://eu-solidarity-ukraine.ec.europa.eu/ukraines-path-towards-eu-accession_uk) (дата звернення: 11.03.2024).

10. Що таке система RFID, в чому її особливості використання. URL: <https://idcard.com.ua/ua/blog/chto-takoe-sistema-rfid-v-chem-ee-osobennosti-ispolzovaniya/> (дата звернення: 18.03.2024).

11. Badia-Melis R., Mishra P., Ruiz-García L. Food traceability: New trends and recent advances. A review. *Food Control*. 2015. Vol. 57. P. 393-401. doi: 10.1016/j.foodcont.2015.05.005.

12. Bougdira A., Ahaitouf A., Akharraz I. Towards an intelligent traceability system. *International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD)*. Fez, Morocco, 2016. P. 1-7. doi: 10.1109/IT4OD.2016.7479280.

13. Chen R.-Y. Intelligent Predictive Food Traceability Cyber Physical System in Agriculture Food Supply Chain. *International Conference on Electronics, Communications and Control Engineering (ICECC)*, 6–8 March 2018. Avid College, 2018. Vol. 1026. doi: 10.1088/1742-6596/1026/1/012017.

14. Hua Leong F., Farn Haur C. Deep Learning-Based Text Recognition of Agricultural Regulatory Document. *Advances in Computational Collective Intelligence. ICCCI 2022. Communications in Computer and Information Science*. 2022. Vol. 1653. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-031-16210-7\_18.

15. Kurama V. Information Extraction. URL: <https://nanonets.com/blog/information-extraction/> (дата звернення: 24.03.2024).

16. Olsen P., Borit M. The components of a food traceability system. *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 77. P. 143-149. doi: 10.1016/j.tifs.2018.05.004.

17. Peddineni A. What can you do with text mining? URL: <https://www.quora.com/What-can-you-do-with-text-mining> (Last accessed: 20.03.2024)..

18. Prithiv S. Top 10 OCR Software in 2024. URL: <https://nanonets.com/blog/ocr->

[software-best-ocr-software/](#) (Last accessed: 24.03.2024).

19. Schuitemaker R., Xu X. Product traceability in manufacturing: A technical review. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 93. P. 700-705. doi: 10.1016/j.procir.2020.04.078.

*Стаття надійшла 17.08.2024*

УДК 631:004.8

## ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ

*Павло Луб, к. т. н., Олег Ковалишин, к. т. н., Любомир Чухрай, к. т. н.,  
Володимир Станько, к. т. н., Назар Заплатинський, ст. викладач  
Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: pollylub@ukr.net kovalyshynoleh@gmail.com l.chukhrai@gmail.com  
wlad.stanko@gmail.com hayk.ukr@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.173>

### **Луб П., Ковалишин О., Чухрай Л., Станько В., Заплатинський Н. Використання інтелектуалізованих інформаційних технологій для управління ресурсами сільськогосподарських підприємств**

Встановлено, що, хоча використання штучного інтелекту в сільському господарстві має свої недоліки та ризики, воно є перспективним напрямом для ефективного вирішення проблеми продовольчої безпеки. Визначено потребу в інноваційних технологіях сільського господарства та розуміння потреб в умовах глобалізації ринку. Доведено об'єктивну потребу агроформувань у розробці та вдосконаленні швидкого й ефективного моделювання сценаріїв прийняття управлінських рішень та інтегрування їх з метою оцінки майбутніх вигод, очікуваних прибутків та прогнозування термінів окупності. Наголошено, що в сучасних умовах впровадження інформаційних компаній щодо інноваційних процесів аграрної галузі як загалом, так і в окремих підгалузях та складових необхідно організувати на рівні державних програм, особливо щодо застосування в напрямі технічних та технологічних складових виробничих процесів підприємств аграрного сектору, сприяти розвитку видів діяльності з високою наукоємністю, перейти від технологічно низької ресурсної до високотехнологічної інноваційної економіки. Результати проведених досліджень дали змогу систематизувати знання про наявні технології штучного інтелекту (ШІ), які проявили себе як успішні методи вирішення проблем у сфері сільського господарства та агропромисловості і поширюватимуться в цьому напрямі протягом наступних п'яти – семи років. Подальшими етапами дослідження може стати докладне вивчення різних технологій та методів ШІ для пошуку їх найкращого використання у різних сферах людської життєдіяльності (зокрема в сільському господарстві та агропромисловості), визначення їх ефективного поєднання між собою та обґрунтування оптимальної внутрішньої структури (математизація та програмний код).

**Ключові слова:** цифрові технології, інформаційні технології, аграрні підприємства, сільське господарство, рослинництво, тваринництво, машинний інтелект, інноваційний розвиток, цифровізація.

### **Lub P., Kovalyshyn O., Chukhrai L., Stanko V., Zaplatynskyi N. Utilization of intelligent information technologies for resources management in agricultural enterprises**

The demand for innovative agricultural technologies and an understanding of the conditions of market globalization are increasingly critical. This article analyzes the role of artificial intelligence (AI) in optimizing resource management within agricultural enterprises through big data analysis. It demonstrates the essential need for agribusinesses to develop and enhance rapid and efficient scenario modeling for decision-making, integrating these models to assess future benefits, expected profits, and forecast payback periods. The importance of implementing information technologies aimed at innovative processes in the agricultural sector, both at a general level and within specific subsectors and components, is emphasized. This implementation should occur through state programs, particularly concerning the technical and technological aspects of agricultural production processes. Such measures promote the development of high-tech activities and facilitate the transition from a low-resource economy to a high-tech, innovative economy. The research results provide a comprehensive overview of existing AI technologies that have proven effective in solving problems within agriculture and agribusiness. These technologies are expected to advance significantly over the next five to seven years, allowing businesses to gain competitive advantages and achieve substantial economic benefits. The use of AI and robots in agriculture addresses several key challenges, including alleviating labor shortages, reducing the harmful impact of chemicals on humans and the environment, increasing crop yields, improving enterprise productivity, and lowering the costs of agricultural production. Future research may focus on a more detailed examination of various AI technologies and methods to identify their optimal applications across different areas of human activity, including agriculture and agribusiness. This will include exploring effective combinations of these technologies and establishing an optimal internal structure, encompassing both mathematical frameworks and software coding.

**Keywords:** digital technologies, information technologies, agrarian enterprises, agriculture, crop production, animal husbandry, artificial intelligence, innovative development, digitization.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах аграрний сектор економіки виявляє значний інтерес до використання новітніх інформаційних технологій. Швидкий розвиток науково-технічного прогресу збільшує потребу аграріїв у цифрових рішеннях для управління сільськогосподарським виробництвом. Підприємства аграрного сектору, щоб адаптуватися до змін в економіці, праві, технологіях, потребують стратегій розвитку інновацій, які базуються на цифровому розвитку. Це вимагає дослідження та впровадження цифрових технологій для підвищення конкурентоспроможності продукції та оптимізації управлінських рішень. Такий підхід до цифрової трансформації агробізнесу стає ключовим у поліпшенні управління бізнес-процесами агропідприємств і враховує актуальні потреби галузі. Представлене дослідження присвячене аналізу основних сфер застосування систем штучного інтелекту (ШІ) для оптимізації управління ресурсами в сільськогосподарських підприємствах на основі аналізу великих даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні, методологічні та загальні методичні питання щодо застосування сучасних інформаційних технологій для управління ресурсами сільськогосподарських підприємств знайшли відображення у наукових працях таких вчених, як Д. Бондаренко [2], О. Піжук [11], О. Домарацька [6], Т. С. Пісоченко [12], З. Я. Шацька [12]. Так, М. Г. Бортнікова займається використанням штучного інтелекту для розв'язання задач у галузі тваринництва, зокрема в галузі контролю якості молока [3]; Н. І. Болтянська досліджує використання штучного інтелекту в агроінженерії, зокрема в галузі автоматизації сільськогосподарських процесів [1]; Т. С. Кучмілова займається розробкою інтелектуальних систем управління сільськогосподарською технікою [8].

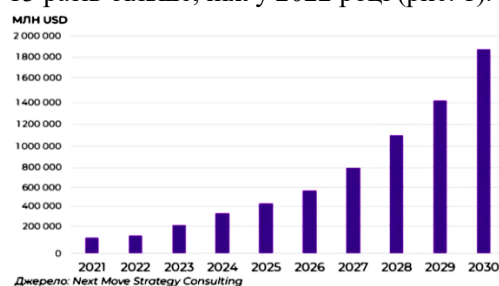
Однак з урахуванням швидкості, з якою науково-технічні нововведення впроваджуються в агробізнес, недостатнє розуміння процесу застосування інноваційних цифрових технологій у сільському господарстві під час економічних криз вимагає подальших досліджень, як теоретичних, так і практичних.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є систематизація інформації щодо сфер використання сучасних інформаційних технологій для управління ресурсами сільськогосподарських підприємств.

**Виклад основного матеріалу.** Впровадження цифрових технологій в аграрний сектор може забезпечити передбачуваність, високу продуктивність та гнучкість у відгуку на зміни, що сприятиме підвищенню безпеки продовольства та стійкості агропідприємств. Завдяки

підвищенню продуктивності, ефективному використанню ресурсів, ринковим можливостям та адаптації до змін клімату, цифрові технології можуть приносити економічні, соціокультурні та екологічні переваги. Проте для досягнення потенційних вигод потрібні значні перетворення в бізнес-процесах агропідприємств, а також у сільській економіці, соціальній сфері та управлінні природними ресурсами. Впровадження цифрових технологій вимагає системного підходу, який може бути реалізований як на рівні окремих підприємств, так і на рівні держави [4].

Дослідження консалтингової компанії Next Move Strategy Consulting показало, що до 2030 року ринок ШІ може сягнути 1,9 трлн дол – у 13 разів більше, ніж у 2022 році (рис. 1).



**Рис. 1.** Обсяг світового ринку штучного інтелекту з прогнозом до 2030 р. [21]

**Fig. 1.** Global artificial intelligence market volume forecasted until 2030 [21]

Застосування цифрових технологій у сільському господарстві надає дрібним фермерським господарствам значні переваги в плані розвитку зв'язків з постачальниками та споживачами, доступу до інформації, наймання талановитих працівників та формування стратегічних партнерських механізмів. Проте існують певні проблеми, такі як недостатність мережевого покриття, низький рівень комп'ютерної грамотності працівників, відсутність єдиної платформи для обміну даними та нездатність до сумісного використання техніки різних марок. Розв'язання цих проблем потребує впровадження агроконсалтингових онлайн-підтримок і проходження онлайн-курсів, таких як ті, що пропонуються на платформах як EdX, Coursera, Udemy, Factor Academy, Укрдержфондом та Українським проектом бізнес-розвитку плодівництва (UHBPD).

Досвід успішного застосування машинного інтелекту в аграрному секторі підтверджується практикою провідних компаній у цій галузі. Наприклад, у США та Японії вже використовується технологія «розумних» ферм та теплиць, які впроваджують автоматизацію та оптимізацію процесів вирощування [10].

Поєднання штучного інтелекту та точного землеробства може знизити операційні витрати на вирощування кукурудзи, сої та пшениці в

США відповідно на 26 %, 31 % та 31 % на гектар, як показано нижче (рис. 2).

Компанія Nature Sweet зі США використовує системи штучного інтелекту для аналізу плантацій помідорів з метою виявлення хвороб та шкідників на плодах. Завдяки цій технології, яка була надана компанії Prospera Technologies з Ізраїлю, збір даних про рослини став більш оптимізованим та ефективним. Японська компанія Toyota спільно з ізраїльською фірмою NRGene розробили технологію на основі машинного інтелекту для вирощування регіональних сортів суниці. Ця технологія дозволяє створювати сорти суниці, які ідеально відповідають умовам вирощування в Японії.

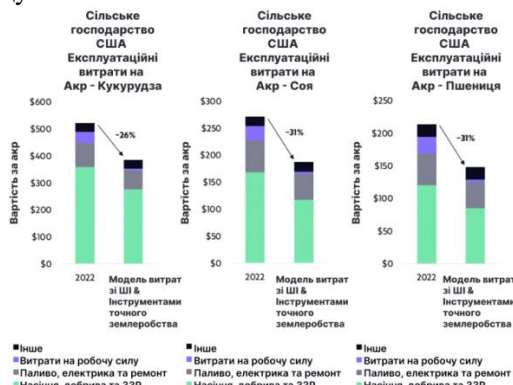


Рис. 2. Вплив застосування штучного інтелекту в точному землеробстві США на зниження питомих експлуатаційних витрат вирощування культур [16]

Fig. 2. Impact of artificial intelligence use in precision agriculture in the United States on reducing the specific operating costs of growing crops [16]

Крім того, сингапурська компанія ADDO AI проводить пілотний проєкт у Лахорі, Пакистан, спрямований на допомогу фермерам у плануванні, зборі та зберіганні врожаю, а також у виявленні культур, які можуть бути стійкими до гербіцидів [5].

Професор Суреш Нітіраджан з Вагенінгського університету розробив власну платформу для розпізнавання настрою тварин, WUR Wolf's Wageningen. Ця технологія дозволяє ана-

лізувати зображення тварин і відстежувати їх емоційні сигнали, такі як напруження тіла, положення вух, зморщення носа і форма очей. Вона допомагає фермерам розпізнавати емоційний стан тварин, який впливає на якість продуктів тваринного походження. Високий рівень гормонів, таких як дофамін, окситоцин, кортизол і адреналін, може погіршувати смакові якості м'яса.

За прогнозами ООН, до 2050 р. населення Землі має збільшитись до 9,7 млрд осіб. При цьому площа земель, що обробляються сільськогосподарським сектором, до цього моменту може бути збільшена лише на 4 %, а щоб прогодувати все населення планети, кількість продуктів харчування має збільшитися на 60 %. Це означає, що фермерам для досягнення цієї мети доведеться збільшити продуктивність і одночасно знизити витрати на виробництво [19].

Користь від впровадження цифрових технологій слід шукати не в миттєвому зниженні витрат та зростанні економічної ефективності сільськогосподарських підприємств, а в пошуку найбільш оптимальних інформаційних технологій щодо управління бізнес-процесами, які забезпечують координацію управлінської діяльності та ефективне досягнення стратегічних і оперативних цілей підприємства. Водночас А. Костюченко зауважує, що ефективність використання цифрових технологій залежить як від їх вмілого застосування, впливу на підвищення продуктивності та якості роботи керівників, так і від зменшення витрат на інформатизацію, що досягають оптимальною організацією проєктування, створення та функціонування інформаційних систем й інфраструктури інформатизації території в цілому [7]. З огляду на вищезазначене визначено, що підвищенню ефективності аграрного бізнесу сприяє використання низки технологій (рис. 3).



Рис. 3. Структура інформаційних технологій, що підвищують ефективність агробізнесу  
Fig. 3. Structure of information technologies that increase the efficiency of agribusiness

Штучний інтелект (англ. Artificial Intelligence, AI) – це галузь комп'ютерних наук, що вивчає розробку комп'ютерних систем, які здатні виконувати завдання, що вимагають людської інтелектуальної діяльності, такі як розпізнавання мови, розуміння природної мови, розпізнавання образів, прийняття рішень. Розвиток штучного інтелекту (нейромереж) відкрив дуже багато нових можливостей майже у всіх існуючих сферах людської діяльності, починаючи від побутових речей і закінчуючи важкою промисловістю [9]. Не стала винятком і аграрна сфера, а саме галузь апробації нових сортів рослин, діючих речовин, добрив та їхніх комбінацій. Саме ця сфера передбачає збір значної кількості інформації для формування рекомендацій виробництву [13]. Особливо важливим є збір, структурування та опрацювання інформації з подальшим формуванням висновків, що потребує значних затрат часу та ресурсів. Зважаючи на інтенсивність надходження у виробництво нових сортів закордонної та вітчизняної селекції, препаратів захисту рослин, регуляторів рослин, постає дуже важливе питання у пришвидшенні науково-дослідницького процесу, де саме застосування штучного інтелекту та інформаційних систем постає надзвичайно гостро [14].

Використання аналітики великих даних стало необхідним інструментом для сільськогосподарського сектору, дозволяючи збирати та аналізувати інформацію для обґрунтованих рішень. Завдяки аналізу різних джерел, таких як погодні умови, стан ґрунту, врожайність та ринкові тенденції, фермери та агробізнес можуть отримати глибоке розуміння своєї діяльності. Отже, найважливішим інструментом сучасних технологій у використанні будь-якої ІТ системи є використання «хмарних технологій», доступ до яких можна отримати з будь-якого стаціонарного комп'ютера, мобільного пристрою, незалежно від геолокації користувача, таким чином, якість та доступність роботи з клієнтами може бути налагоджена більш ефективно і швидко та в повному обсязі дозволяє контролювати управлінські рішення, підвищувати їх позитивний ефект та мінімізувати ризики господарювання, управління операційними процесами відповідає тактичним та стратегічним цілям. «Хмари» роблять автоматизацію бізнес-процесів та оптимізацію роботи з широким масивом даних доступними для господарств будь-яких масштабів, навіть невеликих. Це сприяє економічному зростанню, заощадженню фінансових вкладень в обладнання та масштабування підприємства. А збільшення ефективності виробництва й одночасне зменшення витрат формують конкурентні переваги бізнес-структур [15].

Крім того, зважаючи на сезонний характер агробізнесу, хмарні технології заощаджують витрати за рахунок використання лише необхідного ресурсу. Також слід наголосити на економії витрат та обслуговуванні серверів. Зберігати дані на віддалених серверах набагато надійніше, ніж локально, є можливість швидко і без втрат відновити всю інформацію навіть у разі форс-мажорних обставин, що в разі локального сховища набагато складніше, а часом – неможливо. Використання хмар дозволяє повною мірою користуватися сучасними технологіями в управлінні ресурсами компанії з використанням штучного інтелекту. Штучний інтелект є інструментом, що дозволяє використовувати великий спектр джерел інформації: зйомки зі супутників, різноцільових датчиків, дронів, метеостанцій, системи автоматичного поливу та контролю за станом ґрунту та інші системи моніторингу і контролю для аналізу та планування ефективної діяльності. Такі інновації значно спрощують усі механізми в агровиробництві та дозволяють зменшити виробничі витрати та витрати на обслуговування [23].

Технічні збої, кіберзагрози та залежність від інфраструктури є основними викликами для цифровізації аграрного сектору. Великі сільськогосподарські підприємства часто зіштовхуються з такими проблемами, як забезпечення конфіденційності даних та кібербезпека. Використання цифрових технологій збільшує ризик кібератак і втрати інформації. Ці занепокоєння обґрунтовані, оскільки цифрова трансформація вимагає переходу на хмарні сервіси та централізацію даних, що полегшує доступ до інформації. Через це безпека даних стає одним із найважливіших аспектів для підприємств, які йдуть шляхом цифрової трансформації. Оскільки обсяги даних у світі зростають, загроза кібератак стає дедалі актуальнішою. Всі програми повинні бути надійно захищені, адже вони є першою лінією оборони. Важливо забезпечити безпеку як локальних, так і хмарних систем. Розробка плану кіберзахисту має починатися задовго до того, як агропідприємство зіштовхнеться з першою кібератакою. Це одні з ключових викликів у процесі цифрової трансформації, і для їх подолання потрібно збудувати стійку модель трансформації.

Технологічні труднощі виникають через неправильне використання цифрових рішень, що може знижувати їх ефективність, а також через швидке старіння технологій, що потребує постійних інвестицій у нове обладнання та програмне забезпечення. Інтеграція нових технологій у вже наявні системи також може бути складною.



Висока вартість впровадження цифрових технологій, зокрема забезпечення безпеки, є додатковим викликом. Підприємства повинні ретельно оцінювати ці витрати та їхній вплив на бізнес і репутацію. У деяких випадках певні види діяльності можуть бути несприйнятливими до діджиталізації через необхідність фізичної присутності, тому важливо знайти баланс між традиційними та цифровими методами для досягнення максимальної ефективності.

Якщо сільськогосподарське підприємство не належить до ІТ-сфери, може виникнути проблема з інтеграцією складного програмного забезпечення. Щоб уникнути цього, підприємствам варто обирати інтуїтивно зрозумілі системи. Також важливо забезпечити належне навчання співробітників для ефективного використання нових технологій.

Для успішної цифрової трансформації необхідно змінити підхід до мислення всіх працівників, від керівників до нових співробітників. Людський чинник є вирішальним у цьому процесі, тому важливо пояснити зацікавленим сторонам, чому потрібні зміни, і дати їм час на адаптацію до нових інструментів та технологій.

Недостатність інтернет-покриття для цифровізації сільськогосподарських підприємств є вагомим гальмівним чинником подальшого розвитку. Вирішення таких проблем вбачаємо у використанні мобільного інтернету, що не залежить від обриву проводу та впливів природних катаклізмів.

Використання хмарних технологій є одним із найперспективніших та комфортних рішень для ефективного та перспективного будівництва бізнес-процесів, по-перше, через економію ресурсів на обладнанні, на програмному забезпеченні та технічному обслуговуванні, по-друге, це можливість для власників бізнесу знизити ризик помилок так званого «людського чинника» в систематизації та управлінні даними агропідприємства, по-третє, це можливість долучити до команди співробітників найкращих міжнародних фахівців на дистанційну роботу, незалежно від їх місцезнаходження. Також перевагою є можливість керувати обчислювальними потужностями, що є вагомим чинником для агропідприємств, в умовах сезонності можливо або збільшувати навантаження, або скоротити для оптимізації витрат [22].

Використання в сучасних умовах передових методів аналізу, таких як прогнозування та алгоритми машинного навчання, дозволяє прогнозувати ризики, оптимізувати використання ресурсів та підвищувати ефективність операцій. Наприклад, аналіз даних допомагає ферме-

рам визначити оптимальний час для посіву та збирання врожаю на основі історичних погодних умов і даних про ріст культур. Аналізуючи дані про врожайність разом з інформацією про ґрунт та поживні речовини, фермери можуть оптимізувати використання добрив та систем зрошення, що дозволяє знизити витрати і мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. Крім того, аналіз ринку дає змогу компаніям визначати споживчі вподобання та адаптувати своє виробництво, що забезпечує підвищення конкурентоспроможності на ринку.

Штучний інтелект доповнює аналітику даних, надаючи можливості інтелектуальної автоматизації та оптимізації. Алгоритми штучного інтелекту можуть аналізувати величезні обсяги даних у режимі реального часу, дозволяючи фермерам приймати проактивні рішення та швидко реагувати на змінні умови [18]. Основні переваги використання штучного інтелекту у сільському господарстві наведено в таблиці.

Крім того, штучний інтелект надає рекомендації для покращання умов утримання, що сприяє забезпеченню добробуту тварин. У птахівництві ШІ використовується для автоматизації процесів, контролю за виробництвом та діагностики хвороб. Він може аналізувати дані щодо поведінки птахів, виявляти ознаки хвороб або стресу, що дає змогу оперативно реагувати та запобігати виникненню проблем.

Управління ресурсами є одним із ключових аспектів сільського господарства, і ШІ допомагає удосконалити цей процес. За допомогою аналізу даних сільськогосподарських секторів, таких як ґрунт, погода, врожайність і використання води, ШІ може розробляти прогнози та рекомендації щодо оптимального розподілу ресурсів. Він допомагає фермерам визначити оптимальний час для посіву, поливу, застосування добрив і захисту рослин, забезпечуючи ефективне використання землі, води й робочої сили [20].

Завдяки своїй здатності обробляти великі обсяги даних і виявляти складні зв'язки, ШІ може допомогти фермерам зрозуміти причини втрат врожаю, прогнозувати ризики та вживати заходів для їх запобігання. Він також може аналізувати ринкові тенденції та споживчі попити, допомагаючи фермерам приймати рішення щодо вирощування та маркетингу продукції. Застосування штучного інтелекту в сільському господарстві може дійсно сприяти покращанню продуктивності та ефективності в рослинництві, тваринництві, аналітиці та управлінні ресурсами. ШІ може принести значну користь у цих галузях завдяки своїм здатностям

до оброблення великої кількості даних, аналізу та прийняття розумних рішень.

**Таблиця.** Переваги використання штучного інтелекту у сільському господарстві

**Table.** Advantages of using artificial intelligence in agriculture

Сфера використання	Опис позитивного впливу на галузь
Прогнозування урожайності	Методи машинного навчання, комп'ютерний зір дозволяють аналізувати великі обсяги даних, такі як погодні умови, тип ґрунту, сорт рослин тощо, щоб точно прогнозувати врожайність. Це допомагає оптимізувати структуру посівів для підвищення продовольчої безпеки та враховувати харчові потреби населення й попереджувати дефіцит вітамінів і мікроелементів.
Оптимізація ресурсів та прогнозування ризиків	Методи машинного навчання допомагають раціонально використовувати ресурси, такі як вода, добрива, пестициди, забезпечуючи максимальну продуктивність за мінімальних затрат. Вони також допомагають аналізувати ризики, пов'язані з погодними умовами та шкідниками, оптимізують розміщення посівів і сівбу культур.
Розпізнавання шкідників та хвороб	Штучний інтелект дозволяє своєчасно виявляти ознаки зараження чи пошкодження рослин і оперативно вживати заходів для їхнього захисту. Також можна прогнозувати розвиток хвороб і розмноження шкідників для ефективної профілактики.
Розпушування ґрунту та посів насіння	Роботи-копачі можуть автоматично розпушувати ґрунт та садити насіння на задану глибину та відстань. Це сприяє рівномірному розсіюванню насіння та оптимальному використанню площі. Видалення бур'янів: роботи-знищувачі бур'янів можуть виявляти та видаляти непотрібні рослини без необхідності вручну здійснювати цей процес. Це сприяє підтриманню чистоти вирощуваних культур та знижує вплив бур'янів на врожай.
Оптимізація ланцюжка поставок	Застосування алгоритмів штучного інтелекту дозволяє аналізувати різні чинники, такі як транспортні витрати, потужність сховищ і попит на ринку, з метою оптимізації ланцюжка поставок. Це сприяє мінімізації транспортних затримок, уникненню псування товарів та забезпеченню своєчасної доставки, що в результаті призводить до підвищення прибутковості.
Управління тваринництвом	Завдяки своїм потужним обчислювальним можливостям і здатності аналізувати великі обсяги даних, ШІ дозволяє тваринництву забезпечувати ефективніше розведення свійських тварин, птахівництво, кролівництво, рибицтво та інші сфери. Зокрема, системи моніторингу на базі штучного інтелекту можуть відстежувати поведінку тварин, параметри здоров'я та споживання кормів, що дозволяє виявляти захворювання на ранніх стадіях і забезпечувати оптимальний графік годування. Це забезпечує покращання добробуту тварин, зменшення рівня смертності та покращання управління фермою.
Управління фермами	Застосування штучного інтелекту дозволяє контролювати умови утримання тварин, включаючи температуру, вологість, освітлення та вентиляцію. Аналітичні моделі та алгоритми забезпечують оптимальні умови для тварин, зменшуючи ризик захворювань та стресу, що можуть вплинути на продуктивність і здоров'я.
Вибір оптимальних пар тварин для розведення	Дозволяє покращити генетичну якість поголів'я, отримати більш здорових та продуктивних нащадків. Такий підхід допомагає збільшити врожайність, забезпечувати потреби ринку та покращувати властивості тварин.

Зараз в Україні також існують технології, що використовують розумні машини та роботи. Наприклад, українська аграрна компанія Агроху спеціалізується на використанні точного землеробства та оптимізації процесу вибору насіння та добрив. Компанія Agrieue розробляє продукти дистанційного зондування на основі штучного інтелекту для кліматично оптимізованого сільського господарства. Фірма Sasagro надає програмні рішення на основі сучасних технологій для спостереження, контролю та планування аграрного підприємства. Проте, порівняно з іноземним досвідом, в Україні недостатньо активно впроваджують інноваційні технології в сільське господарство.

Однією із сучасних інноваційних систем в управлінні та оптимізації процесів на підприємствах є система ERP (Enterprise Resource Planning – планування та управління ресурсами під-

приємства). Перевагою системи є поєднання всіх управлінських функцій агропідприємства в єдиний логічний цикл згідно з потребами бізнес-цілей (рис. 4).



**Рис. 4.** Основні сфери застосування системи ERP [24]

**Fig. 4.** Main areas of the ERP system application [24]

Система передбачає безперервний збір даних та автоматизований первинний аналіз, що дає можливість управління виробничими процесами, зокрема й банком землі, контролювати постачання, склади та збут продукції, можливості крос-продажів / upsell-продажів – вихід на новий рівень обслуговування клієнтів і заохочення їх до придбання більшої кількості продуктів, логістику, доставку продукції, CRM-регуляцію взаємодії з клієнтами, кадровий облік, бухгалтерський та податковий облік, складання робочих графіків, управління фінансами.

Oracle E-Business Suite – це програмна система, яка дозволяє підвищити продуктивність діяльності та ефективно управляти підприємством. Рішення має такі функціональні можливості: управління виробничими процесами, контроль постачання, складу та збуту, доставка продукції, CRM-регуляція взаємодії з клієнтами, кадровий облік, виплата зарплат, складання робочого графіка тощо, управління фінансами. Перевагою цієї системи є те, що передбачено можливості проводити аналіз і планування діяльності, управління життєвим циклом продукції. Microsoft Dynamics AX. Програма дозволяє оптимізувати управління всіма сферами діяльності. Робота з клієнтами, продажі, контроль фінансів, аналітика тощо. Всі операції автоматизовано за допомогою цієї системи. Бюджетування та прогнозування, управлінський облік, аналіз часу та витрат, а також облік фондів – деякі з основних особливостей Dynamics 365. Ця платформа має багато мов і пропонує швидку передачу інформації, але її важко інтегрувати з іншими інструментами. Інтерфейс прикладного рішення інтуїтивно зрозумілий. Гнучкість програми дозволяє провести настроювання під будь-який вид комерційної діяльності. Передбачено обмеження прав доступу для співробітників, резервне копіювання даних.

Хоча використання аналітики даних і штучного інтелекту в управлінні сільськогосподарським бізнесом має безліч переваг, існують деякі виклики, які необхідно вирішити. Серед них є питання конфіденційності та безпеки даних, доступу до надійного зв'язку та інфраструктури, а також необхідність спеціальних навичок з обробки та інтерпретації сільськогосподарських даних.

Для подолання цих викликів необхідно, щоб уряди, зацікавлені сторони галузі та науково-дослідні установи співпрацювали для створення надійних систем управління даними, сприяли підвищенню цифрової грамотності та інвестували в розробку інструментів штучного інтелекту та аналізу даних, пристосованих до

конкретних потреб сільськогосподарського сектору. Крім того, необхідно проводити постійні дослідження і розробки для підвищення точності і масштабованості алгоритмів штучного інтелекту, щоб забезпечити їх широке впровадження і прийняття.

Таким чином, на сучасному ринку лише великі агрохолдинги, такі як IP АГРО, Агрохолдинг, КЕРНЕЛ, Укрлендфармінг можуть автоматизувати, інтегрувати та оцифрувати дані та показники всієї сфери діяльності аграрного підприємства, адже вартість системи коштує понад 20 тис. євро, впровадження та налагодження потребує часу від одного року до п'яти залежно від масштабу та складності виробничих процесів. Також треба додати й необхідність постійного супроводу програми відповідним фахівцем, вартість роботи якого коштує від 2 тисяч євро. Висока ціна та довготривалість налаштування призводять до ситуації, коли агропідприємства купують не цілісні системи ERP, а локальні. Наприклад, лише систему контролю руху продукції або систему управління елеватором, або лише систему логістики, систему CRM. Саме CRM-система є однією з найактуальніших для розробників ІТ програм, вона призначена для оптимізації бізнес-процесів із взаємодії з потенційними та наявними клієнтами. Прописаний у програмі чіткий алгоритм взаємодії з клієнтами, контрольоване виконання обов'язків працівниками, автоматизування одноманітних завдань, чітке відстеження кожного етапу продажу, легка можливість заміни співробітників без ризику втрачання контролю за виконанням контрактів, використання хмарних технологій – усе це є перевагами CRM та робить її найзатребуванішою не тільки в агросфері.

**Висновки.** 1. Встановлено, що, хоча використання сучасних інформаційних технологій для управління ресурсами сільськогосподарських підприємств має свої недоліки та ризики, воно є перспективним напрямом для ефективного вирішення проблеми продовольчої безпеки. Наразі дослідження в цій сфері не мають достатнього обсягу, особливо використання когнітивних технологій та застосування штучного інтелекту в малих аграрних підприємствах. Крім того, потребує більше уваги аналіз ризиків використання розумних машин у сільському господарстві.

2. Світовий досвід свідчить, що штучний інтелект та робототехніка можуть сприяти розвитку сільського господарства. Вони можуть покращити ефективність виробництва, зменшити втрати врожаю, підвищити якість продукції, оптимізувати використання ресурсів та

зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Одним із потенційних застосувань штучного інтелекту є аналіз даних із сільськогосподарських сенсорів, дронів та супутникового зондування для збору та обробки інформації про рослини, ґрунт, урожайність та інші чинники, які впливають на вирощування сільськогосподарських культур.

3. Подальшими етапами дослідження може стати докладне вивчення різних технологій та методів ШІ для пошуку їх найкращого використання у різних сферах людської життєдіяльності (зокрема в сільському господарстві та агропромисловості), визначення їх ефективного поєднання між собою та обґрунтування оптимальної внутрішньої структури (математизація та програмний код).

#### Бібліографічний список

1. 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.
2. Бондаренко Д. Застосування технологій інтернету речей в сільському господарстві. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2022. № 2 (75). С. 61-68.
3. Бортнікова М. Г., Черкова Ю. Л. Формування концептуальної моделі управління фінансовими ресурсами підприємства у здійсненні зовнішньоекономічної діяльності. *Економіка. Фінанси. Право*. 2021. № 10/1. С. 9-12.
4. Дем'яненко Н., Бардіна Т., Мосенцева В. Інноваційні технології в сільському господарстві. *Формування та перспективи розвитку підприємницьких структур в рамках інтеграції до європейського простору: Матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф. (заочна форма)*. 2021. С. 93-95.
5. Добровольська О. В., Штанько В. І. Філософський аналіз еволюції штучного інтелекту. *Дослідження з історії і філософії науки і техніки*. 2019. Т. 28, № 1. С. 10-19.
6. Домарацька О. Роль штучного інтелекту в розвитку аграрного сектору економіки. *СНВ МНАУ*, 2020. С. 48-51.
7. Костюченко А., Македон Г. Проблеми росту рівня безробіття в еру розвитку штучного інтелекту. *Соціально-економічні проблеми аграрного розвитку регіонів: Всеукр. наук.-практ. конф. Ніжин, 2018*. С. 24-27.
8. Кучмілова Т. С., Мороз Т. О., Шешунова А. В. Використання штучного інтелекту в сільському господарстві. *Modern Economics*. 2023. № 39. С. 69-74. doi: 10.31521/modecon.V39 (2023)–10.
9. Нестеренко В., Каук В. Використання штучного інтелекту в сільському господарстві. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління*. 2022. С. 120.
10. Пасічник Ю. Використання технологій штучного інтелекту в агропромисловому секторі економіки. *Сучасні тенденції розвитку фінансових та інноваційно-інвестиційних процесів в Україні: матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., м. Вінниця, 12 черв. 2021 р. Вінниця, 2021*. С. 880-882.
11. Піжук О. Штучний інтелект як один із ключових драйверів цифрової трансформації економіки. *Економіка управління та адміністрування*. 2019. № 3 (89). С. 41-46.
12. Пісоченко Т. С., Пятачук А. С. Економічні аспекти впровадження штучного інтелекту в бухгалтерії. *Сучасні тенденції розвитку фінансових та інноваційно-інвестиційних процесів в Україні: зб. тез доп. учасників V Міжнар. наук.-практ. конф., м. Вінниця, 25 лютого 2022 р. Вінниця, 2022*. С. 821-822.
13. Поляков О. Штучний інтелект в агровиробництві. Інноваційні розробки в аграрній сфері. *Молодь і технічний прогрес в АПВ: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Харків: ХНТУСГ, 2021. Т. 2. С. 408-409*.
14. Руденко М. В. Вплив цифрових технологій на аграрне виробництво: методичний аспект. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2019. Вип. 6, № 69, С. 30-36.
15. Руденко М. В. Технології цифрової трансформації сільськогосподарських підприємств. *Агросвіт*. 2019. № 23. С. 8-18.
16. Чи зменшать Штучний Інтелект та Точне Землеробство витрати на агровиробництво? URL: <https://www.agrilab.ua/chy-zmenshat-shtuchnyj-intelekt-ta-tochne-zemlerobstvo-vytraty-na-agrovyrobnytstvo>. (дата звернення: 4.04.2024).
17. Шацька З. Я., Прима В. І. Особливості впровадження інформаційних технологій в аграрному секторі України. *Агросвіт*. 2022. № 13–14, липень. С. 60-64.
18. Digitalization of the Economy as a Factor of Sustainable State Development Against the Background of Large-Scale Military Aggression (Ukrainian Experience) / T. Moroz, A. Spitsina, L. Plukar, O. Maslyhan, D. Kasmin, I. Nazarenko. *Financial and credit activity problems of theory and practice*. 2022. Vol. 6, No 47. doi: 10.55643/fcapt.6.47.2022.3938.
19. Establishing patterns of change in the indicators of using milk processing shops at a community territory / A. Tryhuba et al. Eastern-

*European Journal of Enterprise Technologies: Control processes.* 2019. 3/6. 102. P. 57-65.

20. Forecasting the Fund of Time for Performance of Works in Hybrid Projects Using Machine Training Technologies / N. Koval, I. Kondysiuk, I. Tryhuba, O. Boiarchuk, M. Rudynets. *MoMLeT+ DS*, 2021. P. 196-206.

21. Global Artificial Intelligence Market Volume Forecasted until 2030. URL: <https://www.nextmsc.com>. (дата звернення: 4.04.2024).

22. Justification of models of changing project environment for harvesting grain, oilseed and legume crops /A. Tryhuba, O. Bashynskyi, Y. Medvediev, S. Slobodian, D. Skorobogatov.

*Independent Journal of Management & Production.* 2019. 10 (7). P. 658-672.

23. Klerkx L., Jakku E., Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS–Wageningen Journal of Life Sciences.* 2019. Vol. 90–91. 16 p.

24. What is ERP? Enterprise Resource Planning Explained. URL: <https://www.projectline.ca/blog/what-is-erp-enterprise-resource-planning> (дата звернення: 04.04.2024).

*Стаття надійшла 12.08.2024*

УДК 004.85:004.056]:631.1

**APPROACH AND MODEL FOR FORECASTING WINTER WHEAT YIELD USING MACHINE LEARNING**

*Anatolii Tryhuba, Dr.Sci.(Engin.), Alla Zheliezniak, PhD, Inna Tryhuba, PhD,  
Andrii Tatomyr, PhD*

*Lviv National Environmental University*

*1, V.Velykoho str., Dubliany-Lviv, 80381, Ukraine*

*e-mail: [trianamik@gmail.com](mailto:trianamik@gmail.com), [azhelezniak@ukr.net](mailto:azhelezniak@ukr.net), [rlnle@ukr.net](mailto:rlnle@ukr.net), [andrew.tatomyr@gmail.com](mailto:andrew.tatomyr@gmail.com)*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.182>

**Tryhuba A., Zheliezniak A., Tryhuba I., Tatomyr A. Approach and model for forecasting winter wheat yield using machine learning**

An analysis of the relevant subject area and scientific literature on the use of intelligent approaches for forecasting and planning activities in agriculture has been conducted. This analysis highlights the feasibility of employing machine learning to predict processes in agriculture. The purpose of this article is to develop a model for predicting winter wheat yields using historical data and machine learning algorithms, while taking into account the specific characteristics of processes and resource use in agriculture. The proposed forecasting approach for winter wheat yields relies on historical data and machine learning algorithms that consider the unique aspects of agricultural processes and the resources involved. The selection of an effective model for predicting winter wheat yield is based on a developed algorithm, which involves a systematic implementation of seven stages.

To prepare the data, the authors utilized intelligent analysis algorithms that assess the relationships between various factors affecting winter wheat yield. With qualitatively prepared data, the research substantiates the model for predicting winter wheat yield by evaluating its accuracy indicators. Three algorithms were chosen for the study: least squares (OLS), gradient boosting (XGBoost), and linear regression with polynomial features. Separate models were created for each algorithm and compared based on quality indicators. The findings indicate that the best model is the gradient boosting (XGBoost) model, which demonstrated the lowest values across all quality metrics - MSE, RMSE, MAE, and R-squared. Future research should focus on the development of an intelligent information system for planning agricultural processes, which includes a module for forecasting winter wheat yields based on the validated model proposed in this study.

**Keywords:** forecasting, yield, winter wheat, XGBoost algorithm, model, machine learning.

**Тригуба А., Желєзняк А., Тригуба І., Татомир А. Підхід і модель прогнозування врожайності озимої пшениці на основі машинного навчання**

Проведено аналіз предметної галузі та наукової літератури щодо використання інтелектуальних підходів до прогнозування та планування діяльності в сільському господарстві. Обґрунтовано доцільність використання машинного навчання для прогнозування процесів у сільському господарстві. Обґрунтовано модель прогнозування врожайності озимої пшениці на основі використання історичних даних, алгоритмів машинного навчання та врахування особливостей процесів і використання ресурсів у сільському господарстві. Запропонований підхід до прогнозування врожайності озимої пшениці ґрунтується на використанні історичних даних та алгоритмів машинного навчання, які враховують особливості виконуваних процесів та ресурсів, задіяних у сільському господарстві. Вибір ефективної моделі прогнозу врожайності озимої пшениці базується на розробленому алгоритмі, який передбачає системне виконання семи етапів. Для підготовки даних використано інтелектуальні алгоритми аналізу, які забезпечують оцінку взаємозв'язків між факторами, що впливають на врожайність озимої пшениці.

На основі якісно підготовлених даних обґрунтовано модель прогнозу врожайності озимої пшениці, здійснивши оцінку точних показників. Для дослідження обрано три алгоритми (система найменших квадратів (OLS), посилення градієнта (XGBoost) і лінійна регресія з поліноміальними характеристиками. У результаті були створені окремі моделі, порівняні за показниками якості. На основі результатів виявлено, що найкращою моделлю є модель посилення градієнта (XGBoost). Він має найнижчі значення з усіх показників якості - MSE, RMSE, MAE і R-квадрат. Подальші дослідження необхідно проводити в напрямку створення інтелектуальної інформаційної системи планування процесів у сільському господарстві з модулем прогнозування врожайності озимої пшениці на основі обґрунтованої нами моделі.

**Ключові слова:** прогнозування, врожайність, озима пшениця, алгоритм XGBoost, модель, машинне навчання.

**Introduction.** In recent years, information technologies have fundamentally changed the concept of farming, making it more profitable, efficient, safe, and simple. Using smart technologies and precision farming systems. Farmers can build data-based knowledge in crop

and livestock production. Smart technologies provide tools (sensors, drones, satellite images, etc.) to collect and integrate a variety of data, the study of which can provide better results for making management decisions. In 2022, the market value of smart agriculture in the world was 15.6

billion U.S. dollars. The expected growth of the smart agriculture market value in the world in 2027 is 33 billion U.S. dollars, which is almost twice as much as last year's figures [1]. Smart farming technology market research presented by Market & Market's Precision Farming Market by Technology also shows an expected global growth forecast through 2031 at a CAGR of 10.7% [2]. One of the most important topics in agriculture is the assessment and forecasting of crop yield and productivity improvement. Since productivity in agriculture depends on many factors, the use of machine learning models can provide more accurate predictions, allowing farmers to avoid unnecessary losses of resources, harvest, and optimize the technological process.

The field of crop production is characterized by the fact that a farmer or agronomist is forced to make decisions in conditions of incomplete and inaccurate input information (for example, regarding feeding and fertilizing plants in different areas of the field). This difficult task can be solved based on intelligent data analysis using mathematical models and intelligent systems. In animal husbandry, intelligent process planning information systems can help farmers better monitor the needs of individual animals, adjust feeding rations, prevent disease, and improve herd health. Using wireless IoT applications, farmers can monitor the location, well-being, and health of animals. Using the results of data and image processing based on machine and deep learning methods, it is possible to identify sick animals and separate them from the herd to prevent the spread of the disease.

Intelligent systems and smart technologies help to improve the sustainability of the agricultural enterprise, increase productivity, and ensure a reduced impact on the educational environment. The application of an intelligent information system using machine learning models for agriculture can be based on a combination of technologies such as machine learning, artificial intelligence, the Internet of Things, technologies and devices for collecting, processing, analyzing, and using data, an automated control system for individual processes (for example irrigation management), etc. Machine learning models are capable of detecting complex relationships between input and output data, as well as making predictions based on these relationships [4-7]. The use of machine learning for processing big data in the agricultural sector can generally improve the effectiveness of process management and decision-making.

**Analysis of published data and problem setting.** Solving process management problems

with the use of intelligent information technologies is a fairly common solution in various applied fields [6; 9-11; 19], as it involves the search for new and improvement of existing approaches to the implementation of forecasting processes.

Many scientists in their research [8; 12; 13; 17] pay attention to intelligent data analysis, the application of machine learning methods, and the construction of predictive models, expert systems, and traditional models of statistical analysis for the search for dependencies and data processing. Many of these methods have their advantages and disadvantages, which primarily affect the choice of approach for building a predictive model.

Analysis of the latest research in the field of information technologies showed that some scientists [7; 14; 16; 20-23] were involved in the justification and development of intelligent information technologies for agriculture, including based on data processing based on machine learning models. Some authors in their works note that machine learning algorithms can be effectively used to study the relationships between production factors, which gives reason to consider the feasibility of their use for forecasting future values based on historical data [4-5; 18].

Therefore, the use of machine learning methods in the development of intelligent information systems for planning processes in agriculture will make it possible to increase the accuracy of forecasting the cultivation of crops (for example, winter wheat). At the same time, the solution of this scientific and applied problem depends on the need to collect high-quality and relevant data, their processing, and preparation for further training of the model. The implementation of the task is possible under the condition of the implementation of a smart approach and the principles of precision agriculture, the use of sensors, and other devices for collecting, accumulating, and transmitting data. The conducted research will make it possible to improve the quality of process management in agricultural enterprises and contribute to the achievement of expected productivity indicators in all branches of agriculture.

#### **The purpose and objectives of the study.**

The purpose of the article is to substantiate the approach and model for forecasting winter wheat yields based on the use of historical data, and machine learning algorithms, and taking into account the peculiarities of processes and resource use in agriculture. To achieve this goal, the following tasks need to be solved:

1. to propose an approach and prepare data for training the model for predicting winter wheat yield;

2. to substantiate the model for predicting winter wheat yield based on the evaluation of quality indicators.

**Research results.** Building a predictive model for agriculture based on machine learning methods opens up new perspectives for resource management, yield planning, overcoming production risks, etc. This approach will allow the farmer to more accurately forecast various factors and indicators for the future. To substantiate the method of machine learning of the intelligent planning information system in the course of fulfilling the set tasks of the research, the task of planning the cultivation of winter wheat was chosen based on the data of one of the agricultural enterprises of the region, taking into account the selection of specific parameters, based on which the model for the intelligent information system will be built.

To choose a machine learning algorithm to solve the given task, such factors as the size, quality, and nature of the data, the purpose, and set goals of the research were taken into account, and further use of predictive data. The choice of a machine learning algorithm for prediction depends on the characteristics of the data set. For example, for processing structured data and forecasting time series, it can be effective to use algorithms such as Random Forest or Long Short-Term Memory (LSTM).

When working with a large amount of data and extremely complex relationships, deep learning algorithms, in particular neural networks, can be a powerful tool for accurate forecasts. Data preparation, commonly known as data preprocessing, entails handling raw data that has been gathered and readying it for use in machine

learning algorithms. This process ensures that the input data for training the model is of high quality, thereby enhancing the effectiveness of the machine learning model in making accurate predictions.

To solve the task set during the research, namely the substantiation and construction of a machine learning model of an intelligent information system for planning processes in agriculture, an analysis and data collection was carried out on the example of winter wheat cultivation planning (Table). The data were taken from the Department of Agricultural Development of the Lviv Regional State Administration. In particular, data on nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), temperature, humidity, soil acidity, precipitation, and winter wheat yield were collected from a survey of agricultural enterprises in Lviv region in 2021. This made it possible to form a suitable dataset for machine learning.

The specified data set involves using seven input variables ( $X_1...X_7$ ) and, accordingly, one output variable ( $Y_1$ ). Based on data collection in specific farms, 1,516 instances of data on factors affecting the cultivation of winter wheat were obtained, which were distributed by attributes.

The interactive Jupyter Notebook environment was chosen to fulfill the research task, allowing to visualize data, conduct experiments, and debug machine learning models. The interactive Jupyter Notebook environment can be used for a wide range of machine learning tasks, including cleaning data and preparing it for machine learning; data analysis and understanding of their characteristics; development and training of machine learning models; evaluation of the quality of machine learning models; deployment of machine learning models in real systems.

**Table** Main characteristics of the dataset for building the model  
**Таблиця** Основні характеристики набору даних для побудови моделі

The name of the data	Marking	A description or rationale for the choice
Nitrogen	N	Nitrogen is largely responsible for the growth of leaves on the plant
Phosphorus	P	Phosphorus is largely responsible for the growth of roots and the development of flowers and fruits
Potassium	K	Potassium is a nutrient that contributes to the proper performance of general plant functions
Temperature	temperature	Temperature in degrees Celsius
Humidity	humidity	Relative humidity in percent
Acidity	ph	Soil ph value
Amount of precipitation	rainfall	Amount of precipitation in mm
Crop capacity	harvest	Wheat yield, t/ha

After importing the necessary libraries into the interactive Jupyter environment, the loading and output of the initial data array were implemented. The data was imported from a CSV file into a DataFrame and saved in tabular format. The reason for using

DataFrame is that it is the main data structure in the Pandas library that is used for convenient data processing and analysis. Figure 1 shows a fragment of imported data for further implementation of the given task.



	N	P	K	temperature	humidity	ph	rainfall	harvest
0	112.454037	42.213853	125.919733	20.3	82.0	6.8	673.3	51.6
1	96.527968	30.913770	124.239416	19.6	80.3	7.3	609.5	24.6
2	89.529466	43.770578	172.147264	20.0	82.3	6.5	663.8	43.2
3	86.088393	43.762988	135.907373	16.5	80.2	6.8	600.3	19.4
4	107.637741	41.808115	149.138370	17.5	83.4	7.2	414.3	27.5

**Fig. 1.** A fragment of the database on the cultivation of winter wheat

**Рис. 1.** Фрагмент бази даних щодо вирощування озимої пшениці

The next stage of working with the data loaded into the Jupyter environment involved the following three consecutive operations:

1) calculation of unique values by attributes and derivation of total number of them to obtain the distribution of values by this indicator and understand the characteristics of the data.

2) definition of the DataFrame dimension.

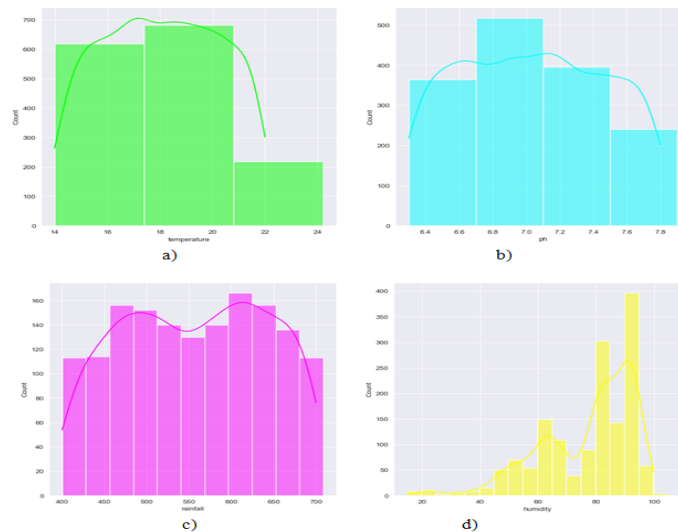
3) call the apply function for each column in the DataFrame (using an anonymous lambda function) to count the number of missing values in each column. This allowed to determine the number of missing values in each column.

	N	P	K	temperature	humidity	ph	rainfall	harvest
count	1516.000000	1516.000000	1516.000000	1516.000000	1516.000000	1516.000000	1516.000000	1516.000000
mean	110.994377	33.067944	174.229833	18.051385	77.085026	7.037797	556.217876	32.589842
std	16.431427	9.521133	31.317429	2.227738	16.243847	0.434551	84.583246	12.817795
min	80.105438	15.133802	120.026406	14.000000	14.700000	6.300000	400.100000	15.000000
25%	97.043035	25.342854	146.813145	16.200000	65.175000	6.700000	483.450000	22.300000
50%	111.133760	32.946560	173.921220	18.100000	82.100000	7.000000	560.250000	29.700000
75%	124.247634	41.059207	200.382101	19.900000	90.800000	7.400000	627.775000	40.800000
max	139.938526	49.989670	229.773893	22.000000	100.000000	7.800000	699.800000	64.700000

**Fig. 2.** Description of the study data

**Рис. 2.** Опис даних дослідження

The input data for training the model analyzed in this way (for example, for anomalies or missing data) can provide insight into how effective the machine learning model can be in further predictions.



**Fig. 3.** Distribution of data values by such attributes as temperature (a), soil acidity (b), rainfall (c), and humidity (d)

**Рис. 3.** Розподіл значень даних за такими атрибутами, як температура (а), кислотність ґрунту (б), кількість опадів (в), вологість (г)

Figure 3 shows how the distributions of the data for such attributes as temperature, soil acidity, precipitation, and humidity change. As for temperature, its values are described by a Weibull distribution. There is a distinct peak (mode) that indicates the most extended temperature during winter wheat cultivation. This is probably the optimal temperature for growth (17-21°C). The distribution shows the variability of the temperature. The highest peak may indicate optimal conditions for growth, while low or high temperatures hurt wheat yields, as evidenced by the falling tail on the graph. The distribution of soil

acidity values shows a concentration of data within neutral or slightly acidic values, which is optimal for growing winter wheat (approximately 6.0-7.5). The distribution has a pronounced peak in this part, indicating that most soils in the region are suitable for wheat cultivation. The pH values that deviate from the optimum values impair nutrient absorption, which negatively affects yields. The distribution of precipitation is normal, with two peaks corresponding to medium and high levels of precipitation. Optimal values for growing winter wheat are 300-500 mm. The presence of tails at both ends of the distribution indicates periods of

drought and high precipitation, which is also reflected in winter wheat yields. Moderate precipitation contributes to good wheat growth, while heavy or insufficient precipitation leads to a decrease in yield. The distribution of humidity values has a peak in the range of medium percentage humidity (60-70%), which is optimal for wheat growth, and high humidity (80-95%), which reduces winter wheat yields. Humidity is described by an adjusted polynomial distribution with larger deviations toward lower humidity. Relative humidity in the optimal zone promotes healthy plant development. Too low humidity leads to drying out of plants, and too high humidity leads to fungal diseases.

Each of the analyzed attributes (temperature, soil acidity, precipitation, humidity) affects the yield of winter wheat. The graphs of the

distribution of values make it possible to determine within which limits the values of these factors are and which are the most frequent and optimal for growing winter wheat. Deviations from the optimal conditions, which are reflected in the extreme values of the distributions, lead to a decrease in the yield of winter wheat.

At the next stage of working with the data, the following operations were performed: the average value of nitrogen, phosphorus, and potassium concentration in the soil was determined and derived; the average temperature in degrees Celsius; the average value of relative humidity in percent is derived; the average value of pH in the soil; average rainfall in millimeters.

Figure 4 presents the results of the evaluation of statistical characteristics based on DataFrame df.

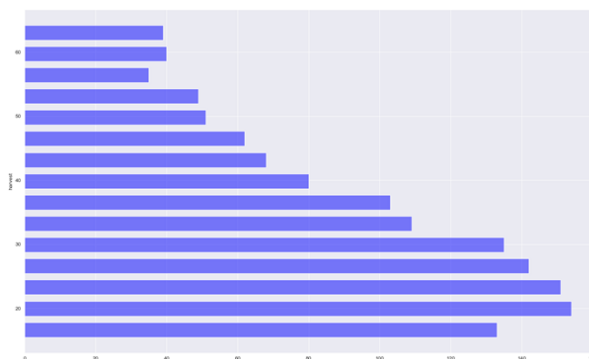
```
Average Ratio of nitrogen in the soil : 110.99
Average Ratio of Phosphorous in the soil : 33.07
Average Ratio of Potassium in the soil : 174.23
Average temperature in Celsius : 18.05
Average Relative Humidity in % is : 77.09
Average pH value of the soil : 7.04
Average Rain fall in mm : 556.22
```

**Fig. 4.** Estimation of statistical characteristics for dataset attributes

**Рис. 4.** Оцінка статистичних характеристик для набору атрибутів даних

Since the temperature regime in the summer period is of great importance for achieving wheat productivity, the analysis of the distribution of winter wheat productivity indicators was carried out on days when the temperature was in the regime from 15 to 28 degrees Celsius.

The results of the study are presented in Figure 5.



**Fig. 5.** Distribution of winter wheat yields by days with temperatures ranging from 15 to 28 degrees Celsius

**Рис. 5.** Розподіл врожайності озимої пшениці за днями з температурним режимом в діапазоні від 15 до 28 градусів Цельсія

The histogram (Fig. 5) shows the distribution of winter wheat cultivation when the temperature was in the range of 15 to 28°C, which is favorable for plant growth. The histogram has a pronounced peak in the range of 2.0-3.8 t/ha. This indicates that the largest number of days in the range of 15 to 28°C falls on this yield. The resulting histogram makes it possible to assess the efficiency of cultivation, identify optimal conditions for winter wheat and take measures to increase yields in future seasons.

The next step is to select the attributes having the highest correlation with the target feature "yield". This is done with the help of a correlation matrix, where their average value is determined for each input factor:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij}, j = 1, m, \quad (1)$$

The correlation matrix is determined by using the formula:

$$K_{ij} = \frac{\text{cor}(X_{ij}, Y_1)}{\sigma(X_{ij}), \sigma(Y_1)}, \quad (2)$$

where  $\text{cor}(X_{ij}, Y_1)$  – correlation between the input data and the target feature  $Y_1$ .

The correlation between the quantitative values of the input factors ( $X_1...X_7$ ) and the target feature "yield" ( $Y_1$ ) is determined by the formula:

$$\text{cor}(X_{ij}, Y_1) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_{i1} - \bar{X}_1)(X_{ij} - \bar{X}_j), i, j = 1, n, \quad (3)$$

At the next stage, the attributes that are most correlated with the resulting attribute "yield" are selected using the correlation matrix. The obtained research results indicate that the data set is qualitative and can be used to build a machine-learning model at the next stage of the research.

In the present research, it is accepted that the type and architecture of the model are chosen following the specific requirements for the task of forecasting the cultivation of an agricultural crop using the example of winter wheat.

Based on pre-loading into the interactive Jupyter Notebook environment, processed and analyzed data characteristics, key parameters can be determined and optimal learning algorithms can be selected to achieve the highest accuracy and efficiency of the model. Further selection and adjustment of hyperparameters will allow optimizing the model for the given task, providing the best forecasting results within the intelligent information system. During the research, it was established the feasibility of choosing the following algorithms for training the winter wheat yield forecasting model: least squares (OLS); gradient boosting (XGBoost); linear regression with polynomial features.

To begin with, a model based on the least squares algorithm was chosen. Building a model based on this algorithm is quite a popular approach in regression problems, as it allows finding a linear function that best reflects the relationship between independent and dependent variables, minimizing the sum of squared deviations.

After determining the coefficients of the model, it can be used to predict the values of the dependent variable based on new input data. Using the least squares algorithm provides an efficient and accurate way to build regression models (Figure 6).

The construction of a forecast model of winter wheat yield based on the gradient boosting algorithm, in particular XGBoost, included several stages. Based on the analysis and data preparation, the parameters of the model were determined.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	harvest	R-squared:	0.905			
Model:		Adj. R-squared:	0.904			
Method:	Least Squares	F-statistic:	160.0			
Date:	Fri, 05 Jun 2024	Prob (F-statistic):	0.00			
Time:	10:11:51	Log-Likelihood:	-1185.9			
No. Observations:	106	AIC:	-2358.			
Df Residuals:	105	BIC:	-2358.			
Df Model:	1					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	1.6650	0.023	79.315	0.000	-1.706	-1.624
h	0.0718	0.010	69.568	0.000	0.053	0.091
p	0.7083	0.010	71.759	0.000	0.689	0.728
Temperature	0.4807	0.009	45.954	0.000	0.389	0.424
humidity	0.5614	0.009	59.696	0.000	0.543	0.580
rainfall	0.0719	0.014	51.752	0.000	0.044	0.090
rainfall	0.3492	0.009	39.057	0.000	0.332	0.367
Omnibus:	46.067	Durbin-Watson:	2.067			
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	103.425			
Skew:	0.239	Prob(CP):	3.48e-23			
Kurtosis:	4.453	Cond. No.	18.2			

Fig. 6. Model based on ordinary least squares (OLS) algorithm

Рис. 6. Модель на основі звичайного алгоритму найменших квадратів (OLS)

After that, the model training process was implemented using gradient descent to improve the quality of forecasts (Figure 7). Using an ensemble of decision trees, XGBoost improves over multiple iterations, weighting errors and correcting them at each step. The final step involves tuning the hyperparameters to ensure optimal model performance.

```
import xgboost as xgb

# Fit XGBoost model
model_xgboost = xgb.XGBRegressor()
model_xgboost.fit(X_train_rfe, y_train)

# Зберегти навчену модель у файл
model_path = r'...\trained_xgboost_model.model'
model_xgboost.save_model(model_path)

# Make predictions
y_pred_xgboost = model_xgboost.predict(X_train_rfe)

# Plot and print results
plot_results(y_train, y_pred_xgboost, title='XGBoost Training Performance')
```

Fig. 7. Code for creating a gradient boosting model (XGBoost)

Рис. 7. Код для створення моделі посилення градієнта (XGBoost)

Construction and training of a predictive model using a linear regression algorithm with polynomial features was also carried out.

```
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.pipeline import make_pipeline

# Create polynomial features
degree = 2 # You can adjust the degree as needed
polyreg = make_pipeline(PolynomialFeatures(degree), LinearRegression())

# Fit the model
polyreg.fit(X_train_rfe, y_train)

# Make predictions
y_pred_polyreg = polyreg.predict(X_train_rfe)

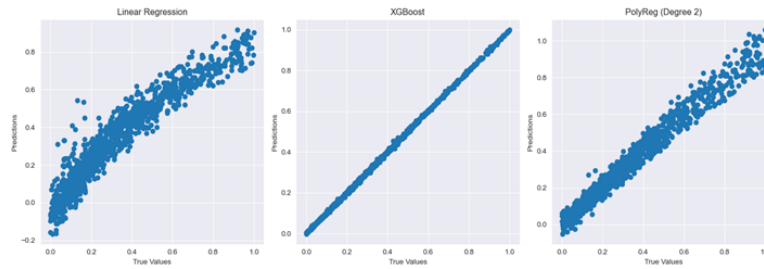
# Plot and print results
plot_results(y_train, y_pred_polyreg, title=f'PolyReg Training Performance (Degree {degree})')
```

Fig. 8. Building a model using a linear regression algorithm with polynomial features

Рис. 8. Побудова моделі на основі алгоритму лінійної регресії з поліноміальними ознаками

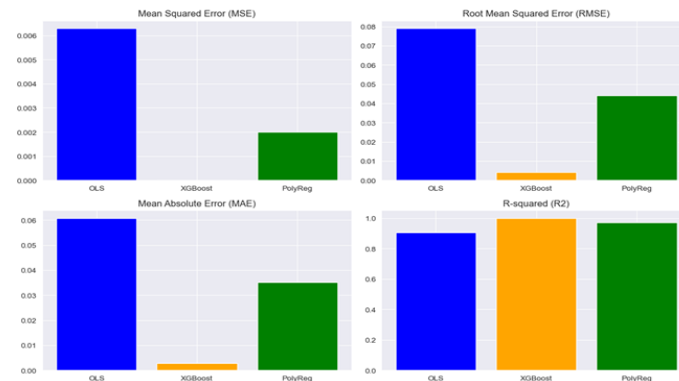
In the beginning, the original features of the data are considered, and then polynomial features are generated and raised to powers to obtain non-linear dependencies. This model is trained using a training set, which decides the optimal weight values for each feature, minimizing the loss function.

A predictive model based on a linear regression algorithm with polynomial features is evaluated on the test set to evaluate its predictive ability and avoid overtraining. This approach allows linear regression to adapt to non-linear patterns in the data, making it effective for modeling complex relationships.



**Fig. 9.** Comparative visual representation of learning results of three types of predictive models  
**Рис. 9.** Порівняльне візуальне представлення результатів навчання трьох типів прогностичних моделей

To choose the optimal model for building forecasts, the quality of the models was evaluated based on the metrics discussed in the previous sections of the qualification work.



**Fig. 10.** Results of evaluation of accuracy indicators of the obtained forecast models of winter wheat yield  
**Рис. 10.** Результати оцінювання показників точності отриманих прогностичних моделей урожайності озимої пшениці

The MSE metric measures the mean of the squared differences between observed and predicted values. RMSE is the square root of MSE and measures the root mean square error. MAE measures the average absolute value of the differences between observed and predicted values. R-squared indicates how much of the variability in the explained variable is explained by the model.

Based on the histograms presented in Fig. 10, it can be concluded that the XGBoost model showed the best results for all evaluated indicators - MSE = 0.0001, RMSE = 0.003, MAE = 0.003, and R<sup>2</sup> = 0.99. This indicates its good ability to provide accurate winter wheat yield forecasts. PolyReg also demonstrates good results (MSE=0.002, RMSE=0.043, MAE=0.035, and R<sup>2</sup>=0.96), although less accurate than XGBoost. OLS, although a basic model, performed the worst. This analysis emphasizes the importance of model selection to ensure forecast accuracy, especially in complex systems such as agriculture.

Based on the obtained data, the authors can conclude that the best model is the model of gradient boosting (XGBoost). It has the lowest values of all quality metrics, including MSE, RMSE, MAE, and R-squared. This means that it makes the most accurate forecasts of the values of the dependent variable, namely the yield index of

winter wheat. This is because the XGBoost model is good at processing different types of data, such as numerical indicators (nitrogen, phosphorus, potassium) and meteorological conditions (temperature, humidity, precipitation). This allows the model to learn to find relationships between these indicators for accurate forecasting. In particular, the XGBoost model builds an ensemble of decision trees that allow it to identify complex nonlinear interactions between given parameters and their impact on winter wheat yield. In addition, XGBoost has built-in regularization methods that prevent overfitting.

Different climatic, soil, and agro-climatic conditions in other regions vary significantly and affect the relationship between yield and temperature, humidity, precipitation and soil composition. Due to the difficulty of collecting similar data, which was collected for the study from only one region (Lviv region), there are limited opportunities to use the model in other regions of Ukraine. The data cover only one growing season (2021), which limits the ability to use the model for long-term yield forecasts. Different climatic conditions can vary significantly over the years, so research based on long-term

observations is needed to improve the model's accuracy.

While XGBoost performed well on the data in this study, the model can be sensitive to the choice of characteristics, such as data size and the presence of outliers. In cases of significant changes in the data or increasing persistence, other machine learning methods may provide better results.

The results were obtained and the approach was used to predict winter wheat yields. They can be adapted for other crops, allowing for the expansion of the use of crop yield prediction models based on machine learning methods.

Based on the selected predictive model, it is possible to create an intelligent information system for planning processes in agriculture with a module for planning the harvest of winter wheat with a known predicted yield, which includes:

1. Determination of the expected volume of the gross collection of crops by using the forecasted yield and planned sown areas.
2. Plan the need for agricultural machinery and workers involved in technological processes in crop production.
3. Planning routes and harvest schedules. This will make it possible to ensure efficient and timely harvesting and reduce its losses.
4. Planning of crop storage, and cleaning of harvested wheat. This is necessary to keep the harvest in good condition before its sale on the agricultural market.

### CONCLUSIONS

1. The proposed approach to forecasting winter wheat yields is based on the use of historical data and machine learning algorithms that take into account the specifics of the processes performed and the resources involved in agriculture. The choice of an effective model for predicting winter wheat yields is based on the developed algorithm, which involves the systematic implementation of seven stages. The peculiarity of this approach is that the formation of historical data for model training is based on attributes that reflect the peculiarities of agricultural processes and characterize the state of natural resources. To prepare the data, the authors of the study used intelligent analysis algorithms that provide an assessment of the relationships between the factors that affect the yield of winter wheat.

2. Based on the qualitatively prepared data, the researchers substantiated the model for predicting winter wheat yields by evaluating the accuracy indicators. Three algorithms (least squares (OLS), gradient boosting (XGBoost), and linear regression with polynomial features) were chosen for the study. As a result, separate models were created and subsequently compared by quality indicators. Based on the results, it was found that

the best model is the gradient boosting model (XGBoost). It has the lowest values of all quality metrics - MSE, RMSE, MAE, and R-squared. This means that it provides the most accurate predictions of the dependent variable, namely the winter wheat yield index. Further research should be carried out in the direction of creating an intelligent information system for planning processes in agriculture with a module for forecasting winter wheat yield based on the model the authors have substantiated.

### REFERENCES

1. Shahbandeh M. Global market size of smart farming 2021-2027. Statista, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/720062/market-value-smart-agriculture-worldwide/>.
2. Precision Farming Market. Market & Market's, 2023. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/precision-farming-market-1243.html>.
3. Hrynevych O., Blanco Canto M., Jiménez García M. Tendencies of Precision Agriculture in Ukraine. *Disruptive Smart Farming Tools as Cooperation Drivers. Agriculture*. 2022. No 12(5). P. 698.
4. Zahmatkesh Z., Goharian E. Comparing Machine Learning and Decision Making Approaches to Forecast Long Lead Monthly Rainfall. *The City of Vancouver, Canada. Hydrology*. 2018. No 5(1). P. 10.
5. Yurynets R., Yurynets Z., Grzebyk M., Kokhan M., Kunanets N., Shevchenko M. Neural Network Modeling of the Social and Economic. *Investment and Innovation Policy of the State, Proceedings of the 4th International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science Workshop MoMLet&DS 2022*. Leiden, The Netherlands, November 25-26, 2022. Pp. 252-262.
6. Gilliland M. The value added by machine learning approaches in forecasting. *International Journal of Forecasting*. 2020. Volume 36, Issue 1, Pp. 161-166.
7. Liakos K.G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. Machine Learning in Agriculture. *A Review. Sensors*. 2018. No18. P. 26-74.
8. Kunanets N., Vasiuta O., Boiko N. Advanced technologies of big data research in distributed information systems. *14th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, vol. 3, 71–76, September 2019.
9. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I., Ftoma O., Padyuka R., Rudynets M. Forecasting the Risk of the Resource Demand for Dairy Farms

Basing on Machine Learning. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science (MoMLeT+DS 2020)*. Volume I: Main Conference. Lviv-Shatsk, Ukraine, June 2-3, 2020. Pp. 327-340.

10. Tryhuba A., Kondysiuk I., Tryhuba I., Boiarchuk O., Tatomyr A. Intellectual information system for formation of portfolio projects of motor transport enterprises. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022, 3109. Pp. 44–52.

11. Koval N., Tryhuba A., Kondysiuk I., Tryhuba I., Boiarchuk O., Rudynets M., Grabovets V., Onyshchuk V. Forecasting the Fund of Time for Performance of Works in Hybrid Projects Using Machine Training Technologies. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science Workshop. Proc. 3rd International Workshop (MoMLeT+DS 2021)*. Volume I: Main Conference. Lviv-Shatsk, Ukraine, June 5-6, 2021. pp. 196-206.

12. Lycett M., Marcos E., Storey V. Model-driven systems development: An introduction. *European Journal of Information Systems*. 2007. 16. 10.1057/palgrave.ejis.3000684.

13. Shiqiang Zh, Ting Y., Tao X., Hongyang Ch., Schahram D., Sylvain G., Deniz G., Ekram H., Yaochu J., Feng L. et al. Intelligent Computing: The Latest Advances, Challenges, and Future. *Intell Comput*. 2023. No 2:0006.

14. Kamilaris A., Prenafeta-Boldú F. Deep learning in agriculture. *A survey. Computers and Electronics in Agriculture*, 2018. Vol. 147. Pp. 70-90.

15. Nawarecki E., Kluska-Nawarecka S., Wilk-Kołodziejczyk D., Śnieżyński B., Legień G. Integrated Multi-functional LPR Intelligent Information System, 2018.

16. Zhelyeznyak A., Ptashnyk V. Modelling the architecture of a planning system for agricultural enterprises. Selected Papers from the Xth International Conference “Information technologies in energy and agro-industrial complex”, ITEA 2021, October 6-8, 2021, 2022. Pp. 32-37.

17. Hua Leong F., Farn Haur C. Deep Learning-Based Text Recognition of Agricultural Regulatory Document. In: Bădică, C., Treur, J., Benslimane, D., Hnatkowska, B., Krótkiewicz, M. (eds) *Advances in Computational Collective Intelligence. ICCCI 2022. Communications in Computer and Information Science*, vol. 1653. Springer, Cham.

18. Vykylyuk Y., Radovanovic M., Pasichnyk V., Kunanets N., Sydor P. Forecasting of forest fires in portugal using parallel calculations and machine learning. *Proceedings of the XVIII International Conference on Data Science and Intelligent Analysis of Information*, June 4–7, 2018, Kyiv, Ukraine, pp. 39-49.

19. Yan-e D. Design of Intelligent Agriculture Management Information System Based on IoT, Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Shenzhen, China, 2011. Pp. 1045-1049.

20. Mohd J., Abid H., Pratap Singh R., Rajiv S. Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*. 2022. Volume 3, pp. 150-164.

21. Yaganteeswarudu A., Saroj Kumar B., Aruna V. Smart farming using artificial intelligence: A review Engineering Applications of Artificial Intelligence. Volume 120, April 2023, 105899.

22. Benos L., Tagarakis A., Dolias G., Berruto R., Kateris D., Bochtis D. Machine Learning in Agriculture. *A Comprehensive Updated Review. Sensors*. 2021. No 21(11). P. 37-58.

23. Elbasi E., Zaki C., Topcu AE., Abdelbaki W., Zreikat AI., Cina E., Shdefat A., Saker L. Crop Prediction Model Using Machine Learning Algorithms. *Applied Sciences*. 2023. No 13(16). P. 9288.

*Стаття надійшла 21.08.2024*

УДК 004.85:519.8

## ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ

*Павло Луб, к.т.н., Валентин Смолінський, к.е.н., Роман Падюка, к.т.н.,  
Олег Боярчук, к.т.н., Володимир Станько, к.е.н.*

*Львівський національний університет природокористування*

*вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: pollylub@ukr.net, smolwalent@gmail.com, padyukaroman@gmail.com, boyarchuko@ukr.net,  
wlad.stanko@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.191>

### **Луб П., Смолінський В., Падюка Р., Боярчук О., Станько В. Використання імітаційного моделювання в інформаційних системах підтримки ухвалення рішень**

Означено передумови застосування ІТ для розробки інформаційно-аналітичних інструментів підтримки ухвалення рішень у проєктах розвитку агропромислового комплексу. Проаналізовано чинні підходи до дослідження технологічних систем із мінливим зовнішнім середовищем за допомогою методів моделювання та зокрема ІТ. Розкрито складові проєктів технологічних систем та дію проєктного середовища. Означено причини мінливості зовнішніх умов виконання технологічних процесів збирання врожаю культур та підстави застосування методів статистичного імітаційного моделювання. Акцентовано на доцільності створення сукупності моделей, що відображатимуть складові технологічної системи збирання врожаю культур рослин. Виокремлено складові зовнішнього проєктного середовища, що формують імовірнісне формування тривалості фонду часу на виконання робіт у технологічній системі. Наведено елементи методики врахування статистичною імітаційною моделлю впливу агрометеорологічних умов на фонд часу для виконання робіт в осінній період у проєктах технологічних систем збирання врожаю цукрових буряків. Виконано моделювання та узагальнено їхні результати. Наведено використання методів кореляційно-регресійного аналізу для встановлення закономірностей зміни тривалості природно дозволеного фонду часу відносно планового часу початку збирання врожаю культури та обґрунтування кореляційної залежності. Встановлено закономірність зміни тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт та статистичні характеристики цього показника для різних календарних термінів початку виконання робіт. Встановлено диференціальні функції розподілу тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт в осінній період.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, інформаційна система, збирання врожаю, фонд часу, технологічні системи, управління проєктами, ефективність.

### **Lub P., Smolinskyi V., Padiuka R., Boiarchuk O., Stanko V. Use of simulation modelling in decision support information systems**

The prerequisites for utilizing information technology (IT) in developing information and analytical tools to support decision-making in agro-industrial complex development projects are outlined. An analysis of current approaches to studying technological systems in a changing external environment, particularly through modeling methods and IT, has been conducted. The components of technological system projects and the impact of the project environment are identified. The factors contributing to the variability of external conditions affecting the technological processes of crop harvesting are discussed, along with the rationale for employing statistical simulation modeling methods. The importance of creating a set of models that accurately represent the components of the technological system for harvesting cultivated plants is emphasized. Key components of the external project environment that contribute to the probabilistic nature of the time frame required for task execution within the technological system are highlighted. Additionally, elements of the methodology for accounting for the influence of agrometeorological conditions on the time frame for work execution during the autumn months in sugar beet harvesting projects are illustrated through a statistical simulation model. Simulations have been performed, and their results are summarized. The application of correlation-regression analysis methods reveals patterns in the variations of the naturally allowed time frame compared to the planned start time for crop harvesting and establishes correlation dependencies. The relationship between the duration of the naturally allowed time frame for beet-harvesting tasks and the statistical characteristics of this duration for various calendar start dates has been determined. Furthermore, the differential functions of the distribution of the naturally allowed time frame for beet-harvesting work during the autumn season have been established.

**Keywords:** simulation modeling, information system, harvesting, time fund, technological system, project management, efficiency.

**Постановка проблеми.** Своєчасність польових робіт у рільництві значною мірою впливає на урожайність вирощуваних культур та на прибутковість галузі загалом [2]. Водночас річ-

ний обсяг виробленої продукції залежить від сукупної дії чинників, значна частина із яких природного походження і некерована, або частково керована [1–4; 6–8]. Стохастична дія агро-

метеорологічних умов призводить до зміни часу та змісту робіт, потреби у ресурсах, моніторингу та доступу до оперативної інформації щодо доцільності тих чи інших корегуючих дій у технологічному процесі вирощування [1; 3; 4; 6–8]. Такий підхід до управління проєктами технологічних систем та сезонними польовими роботами у сучасних сільськогосподарських підприємствах потребує застосування інформаційно-аналітичних систем та інформаційних технологій (ІТ) для супроводу управлінських рішень, а відтак забезпечення планових обсягів виробленої продукції.

Для виконання такого завдання необхідно володіти методами та моделями, які враховують особливості галузі рільництва й некерований вплив природних умов (зовнішнього проєктного середовища) на перебіг польових робіт, своєчасне їх виконання та оцінення ефективності від застосування тих чи інших управлінських дій загалом. Застосування ІТ для таких прикладних завдань дає змогу спростити процеси управління, моніторингу та ухвалення рішень із використанням як персональних смартфонів, так і складних структурованих інформаційних ресурсів та веб-інструментів загалом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** свідчить про те, що ІТ використовують у різних сферах сільськогосподарського виробництва, зокрема для реклами, просування продукції на ринки збуту, пропозицій партнерам та дилерам, віддаленого моніторингу використання ресурсів під час польових робіт, планування й корегування їх перебігу тощо [12; 16]. Водночас ІТ дають змогу створювати інформаційно-аналітичні системи, які охоплюють сукупність взаємопов'язаних імітаційних моделей, кожна із яких відтворює ту чи іншу особливість виробничої системи [11; 15] – агрометеорологічні умови, технологічні процеси, логістику, рух матеріальних ресурсів, управлінську складову тощо. Аналіз положень наукових праць, що виконують завдання в АПК, свідчить про вагомість створення та розвитку таких методів, моделей та інформаційних систем. Це значно спростить процеси управління проєктами, підтримки ухвалення рішень як на стратегічному, так і на тактичному рівнях виробництва, а також сформує достатнє інформаційне наповнення такої складової агробізнесу як ф'ючерсні угоди, залучення низьковідсоткових кредитів, державні інвестиції у капіталізацію галузі тощо.

**Постановка завдання.** Мета статі – розкрити роль та навести практичне застосування ІТ для оцінення ризику фонду часу на виконання технологічних процесів збирання врожаю сільськогосподарських культур; показати можливість створення інформаційно-аналітичних сис-

тем для підтримки ухвалення техніко-технологічних рішень у проєктах відповідних технологічних систем.

**Виклад основного матеріалу.** Особливістю прикладної сфери галузі вирощування сільськогосподарських рослин є те, що роботи, які виконуються в польових умовах, слід узгоджувати із природними процесами – ростом та розвитком культурних рослин, сезонною мінливістю агрометеорологічних умов, формуванням стану агрофону поля, родючістю ґрунту тощо. Водночас, згідно із теорією систем та положеннями технології моделювання, будь-які фізичні процеси можна замінити на модель, а відтак виконати моделювання цих процесів для різних умов їх виконання. Такий підхід дає змогу різносторонньо «розглядати» реалізацію проєктів в АПК та розробляти рекомендації щодо підтримки ухвалення рішень під час їхніх планування та виконання.

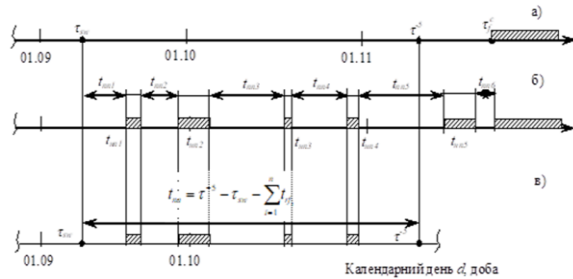
Першим етапом створення моделей технологічної системи вирощування сільськогосподарських культур є аналіз взаємозв'язків та математичний опис усіх вагомих складових, що впливають на показники ефективності її функціонування [9; 13; 17]. Отож, тривалість технологічних процесів збирання врожаю культур формується сукупністю чинників, окремі з яких некеровані та зумовлені впливом агрометеорологічних та біологічно-предметних складових [4; 7]. Встановлення статистичних закономірностей тривалості ( $t_{na}$ ) природно дозволеного фонду часу на виконання відповідних робіт дає змогу врахувати вплив агрометеорологічних умов на темпи їх виконання із використаннями тих чи інших технічних засобів (збиральних комбайнів).

Для визначення статистичних закономірностей зміни  $t_{na}$  розроблено методику, котра ґрунтується на використанні загальновідомої інформації, проведенні виробничих спостережень (для умов Вол.-Волинського району, Волинської області) та комп'ютерних експериментів із статистичною імітаційною моделлю як складовою ІТ для підтримки ухвалення рішень. Відображення у статистичній імітаційній моделі технологічної системи цих об'єктивно зумовлених подій впродовж збирання врожаю, дає змогу на підставі багаторазових ітерацій моделі відтворити стохастичний вплив агрометеорологічних умов на  $t_{na}$ , а відтак і на продуктивність збиральних комбайнів.

Виконання таких комп'ютерних експериментів та опрацювання їхніх результатів дає змогу встановити статистичні закономірності зміни  $t_{na}$  впродовж відповідного календарного періоду, а також оцінити ризик мінливості  $t_{na}$ .



Відомо, що  $t_{na}$  відображає проміжок часу між днем початку ( $\tau_{sw}$ ) збиральних робіт та календарними термінами виникнення події, за яких ці роботи виконувати не доцільно. Зокрема для збирання врожаю цукрових буряків такими подіями є час виникнення заморозку ( $\tau^5$ ) нижче ніж  $-5^\circ\text{C}$ , або час завершення ( $\tau_f^3$ ) фізичної стиглості ґрунту, за якого робота техніки в полях зупиняється [5; 7] (рис. 1). З огляду на те, що час їх настання є ймовірнісним, то тривалість  $t_{na}$  також буде стохастичною. Упродовж виконання збиральних робіт можливе виникнення непогожих проміжків, тривалість яких є теж ймовірною. Це впливає на скорочення  $t_{na}$ , зумовлює його ризик, об'єктивно впливає на ризик ефективності робіт у проектах, а відтак є причиною застосування ІТ та створення інформаційно-аналітичних систем для підтримки ухвалення рішень.



**Рис. 1.** Формування природно зумовленого фонду часу на виконання робіт у проектах збирання врожаю цукрових буряків:

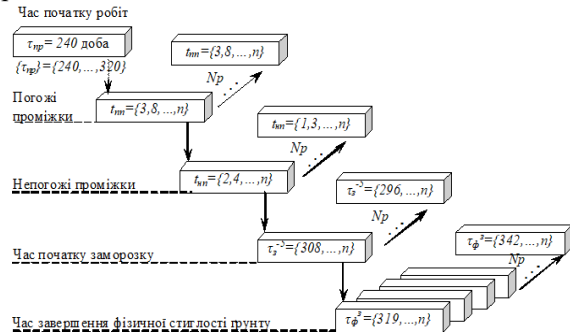
- а) календарні терміни початку та завершення робіт; б) тривалість погожих та непогожих проміжків;
- в) природно зумовлений фонд часу;  $t_{nn}$ ,  $t_{nn}$  – тривалість погожих та непогожих проміжків часу, діб

**Fig. 1.** Formation of a naturally determined fund of time for the work completion in sugar beet harvesting projects:

- a) calendar dates for the start and completion of works;
- b) duration of good and bad intervals; c) a naturally determined fund of time;  $t_{nn}$ ,  $t_{nn}$  – duration of good and bad periods of time, days

Методика визначення ризику  $t_{na}$  на підставі інструментів ІТ зводиться до виконання мінімально потрібної кількості ( $Np = 25$ ) реалізацій статистичної імітаційної моделі агрометеорологічних умов для осіннього періоду (1 вересня – 30 листопада) та встановлення кількості днів, за яких ґрунт поля був придатний до виконання бурякозбиральних робіт. Оскільки дослідження  $t_{na}$  виконується із врахуванням чотирьох ймовірнісних показників –  $t_{nn}$ ,  $t_{nn}$ ,  $\tau^5$ ,  $\tau_f^3$ , то для об'єктивного відображення їх системного поєднання необхідно виконати  $Np = 25^4$  реалізацій імітаційної моделі з використанням методу «вкладених циклів» (рис. 2). Це дасть

зможу отримати репрезентативні вибірки емпіричних даних.



**Рис. 2.** Структура циклів імітаційної моделі для врахування мінливості природно зумовленого фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт

**Fig. 2.** Structure of simulation model cycles to consider the variability of the naturally determined time fund for beet harvesting

Реалізація вкладених циклів у кодї програми імітаційної моделі агрометеорологічної складової технологічної системи передбачає використання генератора псевдовипадкових величин  $rand(x)$  із стандартної бібліотеки C# [14], що, власне, і дає змогу відтворити закон розподілу [4; 10; 17] кожного із ймовірнісних показників  $t_{nn}$ ,  $t_{nn}$ ,  $\tau^5$ ,  $\tau_f^3$ , а також їхній сукупний вплив на фонд часу  $t_{na}$ :

$$temp = (c + a * \text{Math.Exp}((1 / b) * (\text{Math.Log}(-(\text{Math.Log}(\text{rd.NextDouble()})))))),$$

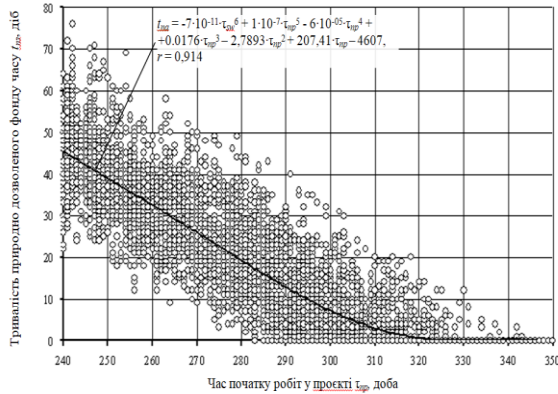
де  $temp$  – змінна, що декларує ймовірнісний показник ( $t_{nn}$ ,  $t_{nn}$ ,  $\tau^5$  або  $\tau_f^3$ );  $rd.NextDouble()$  – функція, що генерує псевдовипадкову величину для прикладу мови програмування C# [14];  $a$ ,  $c$ ,  $b$  – відповідно коефіцієнти рівняння оберненої функції розподілу, що описує розподіл випадкової величини  $t_{nn}$ ,  $t_{nn}$ ,  $\tau^5$  та  $\tau_f^3$ .

Використання такого підходу для відображення ймовірнісного впливу зовнішніх умов у моделі технологічної системи збирання врожаю дає змогу виконати багаторазову реалізацію моделі й отримати показники  $t_{na}$ , побудувати закономірність їхньої зміни та встановити розподіл цієї ймовірнісної величини. Наступне використання методів кореляційно-регресійного аналізу для встановлення закономірностей зміни  $t_{na}$  відносно планового  $\tau_{sw}$  дало змогу обґрунтувати кореляційну залежність (рис. 3).

Використання методів математичної статистики для аналізу варіаційних рядів емпіричних даних  $t_{na}$  для окремих термінів планового початку бурякозбиральних робіт у проектах ЗЦБ дало змогу на підставі критерію  $\chi^2$  Пірсона встановити теоретичний закон розподілу  $t_{na}$  (табл.).

Зокрема встановлено, що для різних  $\tau_{sw}$  розподіл  $t_{na}$  узгоджується з різними теорети-

чними законами розподілу. За умови початку робіт 1 вересня розподіл емпіричних даних  $t_{na}$  узгоджується з нормальним розподілом, за 20 вересня та 10 жовтня відповідно з трипараметричним законом Вейбулла. Диференціальні функції розподілів  $t_{na}$  для різних  $\tau_{sw}$  наведені у табл.



**Таблиця.** Диференціальні функції розподілу та оцінки статистичних характеристик тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт в осінній період (Вол.-Волинський р-н)

**Table.** Differential functions of the distribution and assessment of statistical characteristics of the duration of the naturally allowed fund of time for the performance of beet-harvesting work in the autumn period (Volodymyr-Volynskyi district)

Час початку робіт	Диференціальна функція розподілу	Оцінки стат. характеристик	
		$\bar{M}[t_{na}]$	$\bar{V}[t_{na}]$
1 вересня (243 доба) (нормальний)	$f(t_{na}^{243}) = 0,037 \cdot \exp\left[-\frac{(t_{na} - 42,09)^2}{159,189}\right]$	42,09	0,404
20 вересня (262 доба) (Вейбулла)	$f(t_{na}^{262}) = 0,088 \cdot \left(\frac{t_{na} - 10}{25,215}\right)^{1,213} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t_{na} - 10}{25,215}\right)^{2,213}\right]$	32,33	0,477
10 жовтня (282 доба) (Вейбулла)	$f(t_{na}^{282}) = 0,114 \cdot \left(\frac{t_{na} - 1}{18,922}\right)^{1,16} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t_{na} - 1}{18,922}\right)^{2,16}\right]$	17,76	0,487

**Висновки.** Застосування ІТ та методів статистичного імітаційного моделювання для врахування впливу агрометеорологічної складової на перебіг робіт у проєктах технологічних систем галузі рослинництва дає змогу отримати об'єктивні результати комп'ютерних експериментів, встановити закономірності зміни показників ефективності за використання відповідного оснащення проєктів, а відтак розвинути інформаційно-аналітичний супровід управлінських рішень. Застосування розробленої статистичної імітаційної моделі агрометеорологічної та біологічної складових проєктного середовища для дослідження закономірностей ризику їхніх показників дало змогу на підставі комп'ютерних експериментів і методів кореляційно-регресійного аналізу обґрунтувати залежність тривалості природно зумовленого фонду часу від термінів початку бурякозбиральних робіт у проєктах.

**Рис. 3.** Закономірність зміни тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт впродовж осіннього періоду (Вол.-Волинський р-н)

**Fig. 3.** Regularity of changes in the duration of the naturally allowed time fund for beet harvesting during the autumn period (Volodymyr-Volynskyi district)

Урахування цих особливостей проєктного середовища у статистичній імітаційній моделі дає змогу відобразити агрометеорологічну та предметну складові, відтворити їх вплив на перебіг та своєчасність бурякозбиральних робіт, а відтак розвинути інформаційно-аналітичний супровід управлінських рішень, що ґрунтується на ІТ інструментах системного відображення робіт у проєктах із некерованим проєктним середовищем.

Використання методів математичної статистики для опрацювання результатів комп'ютерних експериментів щодо дослідження ризику тривалості ( $t_{na}$ ) природно дозволеного фонду часу на виконання робіт у цих проєктах дало змогу на підставі критерію  $\chi^2$  Пірсона обґрунтувати теоретичний закон розподілу цієї ймовірнісної величини. Встановлено, що розподіл  $t_{na}$  для різних планових термінів початку робіт у проєктах є змінним (див. рис. 3). Зокрема емпіричний розподіл  $t_{na}$  для 1 вересня узгоджується із нормальним законом розподілу та оцінками математичного сподівання –  $\bar{M}[t_{na}^{243}] = 42$  доби для умов Вол.-Волинського району, Волинської області. Аналогічно, емпіричний розподіл  $t_{na}$  для 20 вересня та 10 жовтня – узгоджується із теоретичним законом Вейбулла (див. табл.), а оцінки математичного сподівання становлять –  $\bar{M}[t_{na}^{262}] = 32$  доби й  $\bar{M}[t_{na}^{282}] = 18$  діб відповідно. Розроблена методика відображення впли-

ву агрометеорологічної складової технологічних процесів збирання врожаю дає змогу створити інформаційну систему підтримки ухвалення рішень, а відтак досліджувати вплив змісту робіт та структури цих проектів на показники ефективності і на цій підставі обґрунтовувати управлінські рішення.

#### Бібліографічний список

1. Березовецький С. А. Обґрунтування параметрів технічного оснащення технологічних систем збирання озимого ріпаку: автореф. дис. ... к-та техн. наук: спец. 05.05.11. Львів, 2017. 21 с.
2. Бюджет 2024 – яку державну підтримку заклали для агросектору? Гаряча агрополітика. 2023. URL: <https://agropolit.com/spetsproekty/1025-byudjet-2024--yaku-derjavnu-pidtrimku-zaklali-dlya-agrosektoru> (дата звернення: 10.06.2024)
3. Днесь В. І. Обґрунтування параметрів зернозбирально-транспортних комплексів для сільськогосподарських товаровиробників : автореф. дис. к-та техн. наук: спец. 05.05.11. Глеваха, 2015. 20 с.
4. Луб П. М. Обґрунтування параметрів комплексу ґрунтообробних машин сільськогосподарського підприємства : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.11. Львів, 2006. 23 с.
5. Основи агрометеорології: підручник / Польовий А.М., Божко Л.Ю., Вольвач О.В. ; Одеський державний екологічний університет. Одеса: Видавництво ТЕС, 2012. 250 с.
6. Пукас В.Л. Обґрунтування параметрів технічного забезпечення технологічного процесу збирання цукрових буряків: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Львів, 2020. 22 с.
7. Спічак В. С. Управління виробничо-технологічним ризиком у проектах збирання цукрових буряків : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.22. Львів, 2010. 23 с.
8. Шарибура А. О. Управління змістом та часом у проектах з технологічним ризиком (стосовно збирання льону-довгунця) : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.22. Львів, 2010. 20 с.
9. Bertalanffy L., Hofkirchner W., Rousseau D. General system theory. Foundations, development, applications, 1st. ed., George Braziller Inc, New York, NY, 2015.
10. Dooley K. Simulation research methods, Companion to Organizations, Joel Baum (ed.), London: Blackwell (2002) P. 829–848.
11. Lub P., Berezovetsky S., Chubyk R., Ptashnyk V. The research of technological risk of the harvesting projects on the basis of simulation modelling. *Proceedings of 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT2021*, IEEE, Lviv, 2021, P. 359–363. doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648701.
12. Lub P., Berezovetsky S., Padyuka R., Chubyk R. Information-analytical support of project management processes with the use of simulation modeling methods. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022. No.3109. Pp. 53–57.
13. Rubinstein R. Y., Kroese D. P. Simulation and the Monte Carlo method, 3-nd ed., Wiley, New Jersey, 2016. doi: 10.1002/9781118631980.
14. Schildt H. C#: The Complete Reference, Osborne: The McGraw-Hill Companies, 2003.
15. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I., et al. Method and Software of Planning of the Substantial Risks in the Projects of Production of raw Material for Biofuel, in: *CEUR Workshop Proceedings*. Published in ITPM, 2020.
16. Tryhuba A., Boyarchuk V., Tryhuba I., et al. Study of the impact of the volume of investments in agrarian projects on the risk of their value (ITPM-2021). *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 2851.
17. Tryhuba A., Padyuka R., Tymochko V., Lub P. Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. No. 3109, P. 25–31.

Стаття надійшла 10.08.2024

УДК 004.8

## ВПЛИВ ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ РОЗРОБНИКІВ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ

*Олег Ковалишин, к. т. н., Любомир Чухрай, к. т. н., Назар Заплатинський  
Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: kovalyshynoleh@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.196>

### **Ковалишин О., Чухрай Л., Заплатинський Н. Вплив використання генеративного штучного інтелекту на продуктивність розробників програмних продуктів**

Означено, що створення та швидке впровадження генеративного штучного інтелекту стає рушійним фактором подальшого розвитку технологічного прогресу. Аналізуючи розвиток більшості галузей, можна стверджувати, що його використання дає змогу отримати додану вартість, оскільки він допомагає частково або повністю автоматизувати низку функцій, які до цього здійснювали наймані працівники. Найбільше застосування штучного інтелекту спостерігається у виробництві, медицині, безпеці, енергетиці. Це свідчить про те, що проходить перерозподіл професій. Тобто виокремлюються окремі з них, які потрібні для роботи зі штучним інтелектом. Насамперед це ті, хто розробляє рішення з його використанням, передусім ІТ-фахівці, розробники програмних продуктів. Вони застосовують різні інструменти ШІ – від ChatGPT і Einstein GPT до H2O.ai і далі.

Досліджено, як ШІ може підвищити продуктивність розробки програмного забезпечення групами розробників – осіб із різними ролями, які виконують різноманітні завдання, результатом яких є спільний результат. Дослідження проводили з використанням результатів роботи фахівців із розробки програмного забезпечення компанії SoftServe. Для цього було залучено понад 1000 її співробітників-програмістів, які працювали у відділеннях компанії, розташованих у семи різних країнах, та виконували різні проекти на окремих рівнях. Встановлено, що використання розробниками в компанії SoftServe генеративного ШІ дозволяє майже на третину скоротити загальний час на створення програмного продукту порівняно з тими, які його не застосовували. Результативність виконання та отримання запланованого результату тестовою групою у проєкті SDLC є на 45% вища, ніж контрольної.

Запровадження ШІ у робочі процеси розробки програмного забезпечення дозволяє підвищити продуктивність його виконавців. Підтвердженням цього є результати його використання інженерами C#/.NET Back-End, завдяки чому вона зростає в середньому на 49 %, а час на отримання кінцевого результату зменшується на 33% порівняно з тими, хто його не застосовує. Ці дані засвідчують, що генеративний штучний інтелект відіграє значну роль у галузі ІТ під час розробки програмного забезпечення.

Виявлено, що ефективне використання генеративного ШІ не тільки зменшує час на розробку та підвищує продуктивність, а й сприяє зменшенню технічного боргу на етапі впровадження проєкту. Команди, які інтегрували генеративний ШІ в робочі процеси, знижують кількість помилок у коді на 25 %, що водночас сприяє підвищенню загальної якості продукту та зменшенню витрат на подальше технічне обслуговування. Отже, ШІ не тільки покращує процеси розробки, але й позитивно впливає на повний життєвий цикл програмного забезпечення.

**Ключові слова:** генеративний штучний інтелект, програмне забезпечення, розробники програмних продуктів, продуктивність.

### **Kovalyshyn O., Chukhrai L., Zaplatynskyi N. Impact of using generative artificial intelligence on the productivity of software developers**

The paper highlights that the creation and rapid implementation of generative artificial intelligence (AI) is becoming a driving force in the further development of technological progress. Analyzing the development of most industries, it can be asserted that its use helps many of them gain added value, as it helps to partially or fully automate a number of functions previously performed by hired employees. The most widespread use of artificial intelligence is observed in manufacturing, healthcare, security, and energy sectors. This indicates a redistribution of professions, where new roles emerge that are necessary for working with AI. These primarily include those who develop solutions using AI, particularly IT specialists and software developers. They use various AI tools - ranging from ChatGPT and Einstein GPT to H2O.ai and beyond.

The study examined how AI can enhance the productivity of software development teams, consisting of individuals with different roles performing various tasks that result in a collective outcome. The research was conducted using the results of software development specialists from SoftServe. Over 1,000 of its employees - programmers working in the company's branches located in seven different countries - participated in projects at various levels. After conducting the planned research, it was established that developers at SoftServe use generative AI to reduce the overall time for software product creation by nearly a third compared to those who did not use AI. The performance and achievement of planned results by the test group in the SDLC project were 45% higher than that of the control group.

Introducing AI into software development workflows improves the productivity of its executors. This is confirmed by the results of its use by C#/.NET Back-End engineers, where productivity increased by an average of 49 %, and the time to achieve the final result decreased by 33 % compared to those who did not use AI. These data demonstrate that generative artificial intelligence is beginning to play a significant role in the IT sector, particularly in software development.

Moreover, it was found that the effective use of generative AI reduces development time and increases productivity and helps reduce technical debt at the project implementation stage. Teams that integrated generative AI into their workflows reduced the number of code errors by 25%, which, in turn, contributed to improving overall product quality and reducing future maintenance costs. Thus, AI improves development processes and positively impacts the entire software lifecycle.

**Keywords:** generative artificial intelligence, software, software developers, productivity.

**Постановка проблеми.** Створення та швидке впровадження генеративного штучного інтелекту стає рушійним фактором подальшого розвитку технологічного прогресу. Особливе значення йому відводиться сьогодні, в епоху цифрових технологій. Зараз він відіграватиме активну роль у розвитку суспільства, співмірну із запуском банкоматів, Інтернету, смартфонів чи електромобілів [1].

Аналізуючи розвиток більшості галузей, можна стверджувати, що використання генеративного штучного інтелекту дає змогу отримати додану вартість, оскільки з його допомогою можна виконувати низку функцій, які до цього здійснювали наймані працівники. Наприклад, у банківській справі можна проводити консультації з управління особистими фінансами та складання бюджету, допомагати клієнтам із банківськими запитами/операціями, керувати обліковими записами, виявляти шахрайство. У промисловості він може здійснювати профілактичне обслуговування промислового обладнання, контроль якості для виявлення браку промислової продукції, оптимізацію промислових ланцюгів поставок шляхом прогнозування попиту і виявлення вузьких місць. Під час наукових досліджень за допомогою штучного інтелекту можна автоматизувати процедуру огляду літератури та аналізу даних у дослідженнях, отримати рекомендації щодо відповідності нормативним вимогам і контролю якості. У сфері продажу йому належить роль проведення індивідуальних рекомендацій щодо продуктів і послуг, чат-ботів та віртуальних помічників, які можуть допомогти клієнтам із загальними запитаннями та створити персоналізовані повідомлення. Також генеративний штучний інтелект можуть широко використовувати страхові компанії, медіа, торговельні організації, заклади охорони здоров'я, туристична галузь, IT компанії тощо [6–9].

Отже, можна стверджувати, що генеративний штучний інтелект стає невід'ємною частиною у діяльності багатьох галузей, сприяючи підвищенню їхньої ефективності завдяки можливості автоматизації та виконанню низки операцій та функцій, які до цього часу здійснювали наймані працівники.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Генеративний вплив штучного інтелекту очевидний, стимулюючи ефективність, сприяючи інноваціям і перевершуючи межі можливого [2]. Підтвердженням цього є низка прикладів, де його використання становить значну частку затрат на виробництво певних продуктів [3; 4]. Зокрема під час виробництва удосконалених перегородок для літака Airbus, 45 % з них проєктуються за допомогою генеративної версії програмного забезпечення Autodesk 7. Використання компанією Siemens штучного інтелекту дозволило на 75 % скоротити час обробки знімків МРТ. До 2030 планується випускати блокбастери, створення яких (від тексту до відео) на 90 % передбачає застосування штучного інтелекту. За прогнозами до 2025 року 30 % вихідних маркетингових повідомлень створюватиме саме ШІ.

ШІ займає певну частку у процесі створення програмних продуктів [10; 11]. За даними [5; 12; 13] для цього застосовують чат-боти з метою отримання персоналізованих рішень, генерують код на основі описів природної мови, підвищують ефективність вибору завдання.

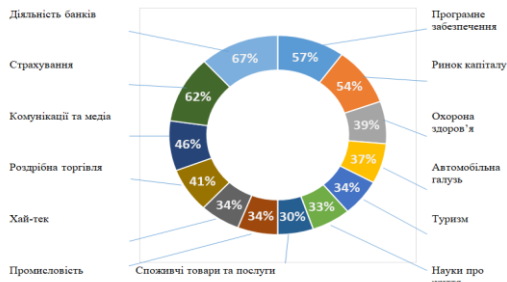
Проте зараз ШІ є одним із засобів зі створення робочих місць. Згідно зі звітом Всесвітнього економічного форуму про майбутнє робочих місць, вони очікують, що штучний інтелект замінить 85 мільйонів робочих місць до 2025 року, водночас створивши 97 мільйонів нових ролей [14]. В основі таких змін – численні інструменти ШІ – від ChatGPT і Einstein GPT до H2O тощо. ChatGPT – це програмне забезпечення для написання на основі штучного інтелекту, яке може генерувати текст майже для будь-чого, наприклад, для публікацій у соціальних мережах, сторінок продажів, блогів і оголошень про роботу.

Опитування Resumebuilder.com показало, що 46 % шукачів роботи використовували ChatGPT для написання своїх резюме та/або супровідних листів, тоді як 78 % цих заявників пройшли співбесіду [15].

Einstein GPT – це платформа AI, розроблена Salesforce. Він створений для покращання взаємодії з користувачем і покращання процесу

ухвалення рішень за допомогою прогнозної аналітики, обробки природної мови (NLP) і можливостей машинного навчання.

Компанії можуть використовувати Einstein GPT для різноманітних цілей, наприклад, підрахунок потенційних клієнтів і можливостей, прогнозування, автоматизація обслуговування клієнтів і персоналізовані маркетингові кампанії [16]. Понад 150 000 компаній використовують Salesforce, частка ринку CRM становить 19,8%, тому не дивно, що впровадження Einstein GPT сильно вплинуло на ринок праці [11] (рис. 1).



**Рис. 1.** Генеративні інновації в галузях на основі штучного інтелекту

**Fig.1.** Generative innovation in industries based on artificial intelligence

H2O.ai – це хмарна платформа штучного інтелекту, яка дозволяє користувачам різного рівня кваліфікації створювати прогнозні моделі [17]. Він допомагає виконувати складні бізнес-завдання за допомогою ШІ та автоматизованого машинного навчання. Запровадження H2O.ai вплинуло на ринок праці, зробивши ШІ та науку про дані доступнішими для широкої громадськості.

Зараз у світі майже не залишилося галузей, де ще не використовують штучний інтелект. Найбільше застосовують у виробництві, медицині, безпеці, енергетиці. Це свідчить про те, що проходить перерозподіл професій. Тобто виокремлюються ті, які потрібні для роботи зі штучним інтелектом. Насамперед це ті, хто розробляє рішення зі штучним інтелектом, передусім IT-фахівці, розробники програмних продуктів [18].

Коли йдеться про розробку програмного забезпечення, то ШІ розглядається не просто як засіб економії часу, а як каталізатор високої продуктивності команди та кращих результатів проектів. Щоб зрозуміти його значення та потенціал, необхідно спочатку заглибитися в його складові механізми, основні моделі та принципи, які керують його роботою.

Під час розробки програмного забезпечення важливим є час, а також величина додаткової роботи, яку можна відповідно заощадити та виконати за допомогою ШІ. З іншого боку, ці показники характеризують ефекти-

вність використання ресурсів та швидкість поступлення програмного забезпечення на ринок. З огляду на це є важливими дослідження, спрямовані на розуміння, як інтеграція ШІ в процес створення програмного продукту впливає на ефективність роботи його розробників.

**Постановка завдання.** Метою дослідження було порівняти, як ШІ може підвищити продуктивність програмного забезпечення групи розробників – осіб з різними ролями, які виконують різноманітні завдання, результатом яких є спільний результат. Дослідження проводили з використанням результатів роботи фахівців з розробки програмного забезпечення компанії SoftServe. Для цього було залучено понад 1000 її співробітників-програмістів, які працювали у відділеннях компанії, розташованих у семи різних країнах, та виконували різні проекти на окремих рівнях. Реалізація підходу «людина в циклі» під час процесу ухвалення рішень ШІ додає додатковий рівень нагляду та контролю, сприяючи довірі до рішень ШІ. Поєднуючи людський інтелект з можливостями ШІ, цей підхід виявляється цінним, особливо в складних або чутливих сценаріях прийняття рішень.

Типовий проєкт розробки програмного забезпечення передбачав багатофункціональну команду, яка виконувала різні завдання на кожному етапі SDLC, який у сукупності визначав результат проєкту. Частково посадові обов'язки членів команди покладали на виконання Generative ШІ. Оскільки продуктивність SDLC є функцією багатьох факторів і взаємодії між ними, було прийнято стратегію сегментації. Використовувались учасники з різних напрямків, яких згрупували у різні кагорти на основі спеціалізацій, ролей, технологій та рівнів. Для кожної кагорти визначили набір найпоширеніших і повторюваних завдань проєкту. Потім цих учасників попросили виконати ці завдання з генеративним ШІ (дослідна група) і без нього (контрольна група).

Порівняння обсягів часу, які були затрачені учасниками дослідження на виконання поставлених завдань з використанням генеративного ШІ і без нього, дозволить визначити частку роботи, яка може бути замінена ШІ.

**Виклад основного матеріалу.** Генеративні системи ШІ для виконання певного виду робіт використовують створені підказки. Залежно від рівня їхнього застосування можна отримати різні результати. Для вирішення поставленої в роботі мети учасників дослідження було навчено ефективно використовувати зазначені підказки.

Як джерело підказок використали найновішу версію ChatGPT – GPT-4. Серед безлічі

доступних на ринку комерційних, відкритих і вузькоспеціалізованих інструментів генеративного ШІ він є одним з найдосконаліших LLM, доступним на ринку, простим у використанні, швидким для вивчення та застосовується для багатьох напрямків і ролей у SDLC.

Оскільки тестова група виконувала проєктні завдання з генеративним ШІ, а контрольна група – без, це дозволило порівнювати рівні продуктивності кожної з досліджуваних когорт.

Для оцінки кожного конкретного проєктного завдання залучався експерт, який мав глибокі знання та великий досвід роботи в сфері програмування. Відповідальність експертів полягала в тому, щоби переконатися, що завдання проєкту виконуються за допомогою того самого методу. Пізніше вони оцінювали рівень виконання кожною групою – з генеративним ШІ і без нього завдань та якість отриманих результатів.

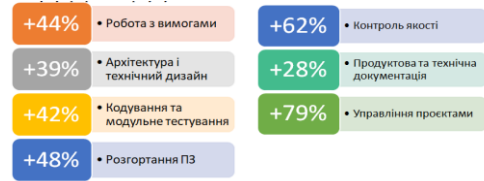
Дотримуючись такого підходу, досягли послідовності у виконанні завдань і уникли впливу зовнішніх факторів, оскільки різні люди можуть по-різному підходити до ідентичних завдань. Якщо якість була недостатньою, такі результати виключаються з розрахунку кінцевих результатів.

На основі результатів дослідження можна стверджувати, що інтеграція генеративного ШІ серед усіх членів команди SDLC сприяла збільшенню продуктивності на окремих етапах створення програмного продукту. Її обсяг варіює: деякі домени мали суттєве її зростання, а інші – дещо менше. Найбільший вплив на зменшення часових рамок реалізації програмного продукту завдяки використанню ШІ, що свідчить про підвищення продуктивності роботи виконавців, спостерігається на етапі управління цим проєктом (+79% до аналогічного без використання ШІ), а найменший – на етапі створення програмної і технічної документації (+29%) (рис. 2). Зростання продуктивності членів команди SDLC завдяки інтеграції генеративного ШІ спостерігається під час реалізації ними інших етапів, зокрема написання кодів та їх тестування, технологічного проєктування, проведення контролю якості, розгортання та випуску програмного продукту.

Отже, можна вважати, що ці результати є достатньо узагальненими та можуть застосовуватись до більшості проєктів з розробки програмного забезпечення.

Водночас вони засвідчують, що найістотніші відмінності спостерігаються у скороченні часу, і, як наслідок, збільшенні результативності дослідної команди, яка використовувала

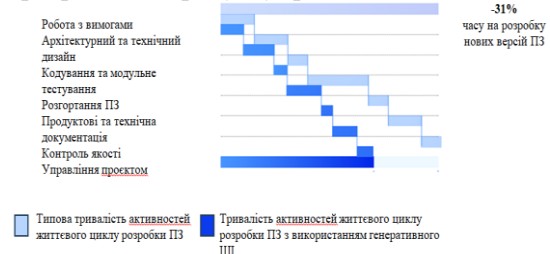
генеративний ШІ в ході виконання проєктних завдань.



**Рис. 2.** Результати впливу генеративного ШІ на продуктивність реалізації окремих етапів створення програмного продукту

Зазначені показники були детально проаналізовані, врахувавши середню вагу проєктних завдань у типовій моделі проєкту SDLC.

Завдяки використанню технологій штучного інтелекту вдалося значно скоротити час, необхідний для виконання етапів створення програмного продукту (рис. 3).



**Рис. 3.** Порівняння затрат часу на виконання етапів створення розробниками програмного продукту з використанням ШІ і без нього

Отже, можна стверджувати, що використання розробниками програмного продукту ШІ дозволяє майже на третину скоротити загальний час на його створення порівняно з тими, які його не застосовували.

Аналіз наведеної номограми свідчить, що використання розробниками програмного продукту ШІ дозволяє майже на третину скоротити загальний час на його створення порівняно з тими, які його не застосовували.

Водночас результативність виконання та отримання запланованого результату тестовою групою у проєкті SDLC є на 45% вищою, ніж контрольної (рис. 4).

Отже, можна стверджувати, що використання генеративного ШІ у процесі створення програмних продуктів є надзвичайно корисним і перспективним. Запровадження ШІ у робочі процеси розробки програмного забезпечення суттєво підвищує продуктивність його виконавців. Підтвердженням цього є дані, наведені в табл.

Завдяки використанню інженерами C#/.NET Back-End генеративного ШІ їхня продуктивність зростає в середньому на 49 %, а час на отримання кінцевого результату зменшується на 33 % порівняно з тими, хто його не застосовує. Ці дані вкотре засвідчують доцільність інтеграції ШІ у процес розробки програмного забезпечення.



**Рис. 4.** Результативність виконання та отримання запланованого результату розробниками програмного продукту з використанням ШІ і без нього

**Fig. 4.** Effectiveness of implementation and obtaining the planned result by software product developers with and without the use of AI

**Таблиця 1.** Вплив використання генеративного ШІ на продуктивність інженерів з розробки програмного забезпечення

**Table 1.** The impact of using generative AI on the productivity of software engineers

Дисципліна	Спеціалізація	Приріст продуктивності з використанням генеративного ШІ
Робота з вимогами	Databases	+44%
Архітектурний та технічний дизайн	Front-End	+39%
Кодування та модульне тестування	Mobile	<b>+42%</b>
Розгортання програмного забезпечення	<b>Back-End</b>	+48%
Контроль якості	Big Data	+62%
Продуктова та технічна документація	DW and BI	+28%
Управління проектом	API Integration	+79%

#### Висновки.

1. Сьогодні, в епоху цифрових технологій, генеративний штучний інтелект починає відігравати значну роль у розвитку суспільства. Його дедалі більше використовують у різних сферах, особливо в галузі ІТ під час розробки програмного забезпечення.

2. Інтеграція генеративного ШІ у процес розробки програмного забезпечення сприяє скороченню часу на отримання продукту програмування та є каталізатором високої продуктивності команди й досягнення кращих результатів проектів.

3. Використання розробниками в компанії SoftServe генеративного ШІ дозволяє майже на третину скоротити загальний час на створення програмного продукту порівняно з тими, які його не застосовували. Результативність виконання та отримання запланованого результату тестовою групою у проєкті SDLC на 45% вища, ніж контрольної.

4. Запровадження ШІ у робочі процеси розробки програмного забезпечення дозволяє підвищити продуктивність його виконавців. Підтвердженням цього є результати його використання інженерами C#/.NET Back-End, завдяки чому вона зростає в середньому на 49%, а час на отримання кінцевого результату зменшується на 33% порівняно з тими, хто його не застосовує.

#### Бібліографічний список

1. Briggs J., Hatzius J., Kodnanin D., Pierdomenico G. The potentially large effects of

artificial intelligence on economic growth. Goldman Sachs Economic Research. 2023. 65.

2. CBInsights. Research Brief: 6 applications of generative AI in industrials. 2023. March 22. <https://www.cbinsights.com/research/generative-ai-industrials/>.

3. Eloundou T., Manning S., Miskin P., Rock D. GPTs are GPTs: An early look at the labor market impact potential of large language models. University of Pennsylvania. 2023. 36.

4. Frey C. B., Osborne M. The Future of employment. The Oxford martin programme on technology and employment. 2013. 179.

5. Hu K. ChatGPT sets record for fastest-growing user base – analyst note. Reuters. 2023. URL: <https://www.reuters.com/technology/chatgpt-sets-record-fastest-growing-user-base-analyst-note-2023-02-01>.

6. Moore G. A. Crossing the chasm: Marketing and selling disruptive products to mainstream customers. Harper Collins. 2014. 234.

7. Research: Quantifying GitHub Copilot's impact on developer productivity and happiness. GitHub Blog. 2022. September 7. URL: <https://github.blog/2022-09-07-research-quantifying-github-copilots-impact-on-developer-productivity-and-happiness/>.

8. Wiles J. Beyond ChatGPT: The future of generative AI for enterprises. Gartner. Contributor. 2023. URL: <https://www.gartner.com/en/articles/beyond-chatgpt-the-futureof-generative-ai-for-enterprises>.

9. 7 applications of generative AI in healthcare. CBInsights. Research Brief. 2023,



May 9. URL: <https://www.cbinsights.com/research/generative-ai-healthcare/>.

10. URL: <https://info.softserveinc.com/hubfs/files/redefining-the-economics-of-software-development-gen-ai.pdf?hsCtaTracking=a98fe7d6-41f3-4fee-823c-bc39accfbca6%7Cbd879abb-eb87-481d-84c2-f0feabd3cc3a>.

11. URL: <https://www.epam.com/insights/eblook/a-call-to-action-for-generative-ai>.

12. URL: <https://github.blog/2022-09-07-research-quantifying-github-copilots-impact-on-developer-productivity-and-happiness/>.

13. URL: [file:///C:/Users/Stepan/Downloads/A\\_Call\\_to\\_Action\\_for\\_Generative\\_AI%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Stepan/Downloads/A_Call_to_Action_for_Generative_AI%20(1).pdf).

14. URL: <https://www.ere.net/articles/the-impact-of-ai-on-job-skills>.

15. URL: <https://www.resumebuilder.com/3-in-4-job-seekers-who-used-chatgpt-to-write-their-resume-got-an-interview/>.

16. URL: <https://backlinko.com/salesforce-stats>.

17. URL: <https://h2o.ai/>.

18. URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/suspilstvo/20230523-yak-shtuchnyj-intelekt-vplyne-na-rynok-praczi-v-ukrayini-ta-v-chomu-ryzyky/>.

*Стаття надійшла 12.06.2024*

УДК 629.114.45

**ОЦІНКА ПРИСТОСОВАНOSTІ АВТОМОБІЛІВ-РЕФРИЖЕРАТОРІВ ДО  
ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ, ЩО ШВИДКО ПСУЮТЬСЯ**

*Олег Миронюк<sup>1</sup>, к. т. н., Ростислав Паславський<sup>1</sup>, к. т. н.,  
Олег Сукач<sup>1</sup>, к. т. н., Віктор Шевчук<sup>2</sup>, к. т. н.*

*<sup>1</sup>Львівський національний університет природокористування  
вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: myronyukos@lnur.edu.ua, rostilavpaslavskij@gmail.com, 19oleg85@ukr.net*

*<sup>2</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності  
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна,  
e-mail: shevtyk@meta.ua*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.202>

**Миронюк О., Паславський Р., Сукач О., Шевчук В. Оцінка пристосованості автомобілів-рефрижераторів до перевезення вантажів, що швидко псуються**

Розкрито чинники, що впливають на вибір рухомого складу автотранспортних засобів для перевезення різного типу вантажів. Акцентовано на сучасних логістичних підходах у доставці продуктів у роздрібну торговельну мережу за допомогою спеціалізованого рухомого складу. Встановлено, що під час роботи автомобілів-рефрижераторів на розвізних маршрутах температурного режиму перевезення часто не дотримується через часті відкривання дверей фургона, що призводить під час перевезення до втрати якості вантажів, що швидко псуються. Основним параметром, що чинить такий негативний вплив, є температура навколишнього повітря. Представлено вираз теплового балансу всередині вантажного відсіку автомобіля-рефрижератора, розкрито складові втрат тепла. З'ясовано основні резерви у зменшенні втрат тепла автомобіля-рефрижератора, за яких забезпечується збереження якості вантажу.

Висвітлено конструктивні особливості та технічні характеристики спеціалізованих транспортних засобів для перевезення вантажів, що швидко псуються, а також їхніх холодильних установок. Експериментально досліджений вплив температури навколишнього повітря та часу розвантаження на температуру повітря у вантажному відсіку автомобілів-рефрижераторів із холодильними установками компресорного та евтектичного типу. Підтверджена гіпотеза про лінійний характер впливу температури навколишнього повітря на температуру повітря у вантажному відсіку автомобіля-рефрижератора. Отримано аналітичні залежності температури повітря в вантажному відсіку різних типів автомобілів-рефрижераторів від температури навколишнього повітря, часу розвантаження та часу руху з вантажем. Подано рекомендації стосовно вибору раціонального рухомого складу для перевезення дрібних партій морозива на розвізних маршрутах у торговельній мережі м. Львова. Встановлено, що для перевезення дрібних партій вантажів, що швидко псуються, на розвізних маршрутах з частими зупинками для вивантаження вантажу при високих температурах навколишнього повітря доцільніше застосовувати автомобілі марки IVECO. Це дозволить забезпечити збереження якісних показників вантажу та підвищити ефективність використання спеціалізованого рухомого складу транспортних засобів.

**Ключові слова:** автомобіль-рефрижератор, температурний режим, розвізний маршрут, вантажний відсік, дрібна партія вантажу.

**Myroniuk O., Paslavskiy R., Sukach O., Shevchuk V. Assessment of refrigerator vehicles suitability for the transportation of perishable goods**

The factors influencing the selection of motor vehicle rolling stock for transporting various types of cargo are examined. The focus is on modern logistics approaches for delivering products to the retail trade network using specialized rolling stock. It was found that the temperature conditions during the operation of refrigerated vehicles on delivery routes are often not maintained due to the frequent opening of the van doors. This can result in a loss of quality for perishable goods during transit. The primary factor negatively impacting this is the temperature of the surrounding air. An expression of the heat balance inside the cargo compartment of a refrigerated vehicle is presented, revealing the components of heat loss. Key opportunities to reduce heat loss in refrigerated vehicles, which ensure the preservation of cargo quality, have been identified.

The design features and technical specifications of specialized vehicles for transporting perishable goods, along with their refrigeration units, have been clarified. An experimental investigation was conducted to study the effect of ambient air temperature and unloading time on the air temperature inside the cargo compartment of refrigerated vehicles equipped with compressor and eutectic refrigerating units. The hypothesis that ambient air temperature has a linear effect on the air temperature in the cargo compartment was confirmed. Analytical relations were established for

the air temperature in the cargo compartment of various types of refrigerated vehicles, based on ambient air temperature, unloading time, and transit duration with cargo. Recommendations have been made to select the most suitable rolling stock for transporting small batches of ice cream on delivery routes in the trade network of Lviv. It was determined that IVECO vehicles are more appropriate for transporting small batches of perishable goods on delivery routes that involve frequent stops and high ambient air temperatures. This choice will help preserve the quality of the cargo and increase the operational efficiency of the specialized rolling stock.

**Keywords:** refrigerated truck, temperature regime, delivery route, cargo compartment, small consignment of cargo.

**Постановка проблеми.** В умовах ринкової економіки найважливішим елементом в організації перевезень стає збереження якості вантажу, що перевозиться, що особливо актуально під час перевезення продуктів харчування [1].

Більшість таких продуктів становлять вантажі, що швидко псуються, і вимагають під час транспортування захисту від негативного впливу навколишнього середовища.

Характерною особливістю перевезення вантажів, що швидко псуються (ВП), є дотримання певного температурного режиму вантажного відсіку (ВВ) автомобіля-рефрижератора, який істотно залежить від температури навколишнього повітря.

Сучасні логістичні підходи в доставці продуктів у роздрібну торговельну мережу викликають потребу в перевезеннях дрібних партій вантажів, що швидко псуються. Підвищити ефективність використання автомобілів, зменшити величину порожніх пробігів транспортних засобів під час перевезень дрібних партій вантажів можливо за рахунок збільшення кількості вантажоодержувачів та організації розвізних маршрутів перевезення ВП [9; 10; 15].

Збільшення числа одержувачів на розвізному маршруті веде до збільшення часу розвантаження та зміни температури повітря у ВВ автомобіля-рефрижератора. Зазначені чинники мають змінний характер, що визначає необхідність оцінки пристосованості автомобілів-рефрижераторів до умов експлуатації.

Проте визначення рівня пристосованості автомобілів для перевезення вантажів, що швидко псуються, з урахуванням змінних факторів умов експлуатації до теперішнього часу вивчено недостатньо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання забезпечення збереження під час перевезень ВП розглядали у працях Докуніхіна В. З., Михайловича Я. М., Кунди Н. Т., Олещука Н. В., Маяка М. М., Антонюка М. Я., Ширяєва С. В., Бен Тахера М. А., Езана М.А., Куліга Л., Терешкевича К., Каянсаяна Н. та інших авторів. Дослідженнями встановлено, що на температуру повітря у ВВ автомобіля-рефрижератора впливає температура навколишнього повітря, як основного чинника умов експлуатації [2; 4; 8; 13; 17; 19]. Вплив часу відкривання дверей ВВ

під час роботи автомобіля-рефрижератора на розвізних маршрутах практично не досліджувався. Проте деякі автори зауважують, що у разі зростання часу навантажувально-розвантажувальних робіт температура повітря у ВВ автомобіля-рефрижератора істотно змінюється [6; 12; 18].

Зазначено [7; 12; 13], що вибір вантажного рухомого складу (РС) – одне з основних завдань, яке вирішується під час обґрунтування транспортно-технологічних схем переміщення вантажів. Під час вибору рухомого складу керуються значенням обсягу та відстані перевезення, умовами та методами їх організації, розмірами відправок, родом вантажів та їх ціною, засобами та способами здійснення вантажно-розвантажувальних робіт, дорожніми та кліматичними умовами [11].

На думку автора [3] на збереження вантажів, що швидко псуються, визначальний вплив мають фактори навколишнього середовища і режими зберігання.

Згідно з проведеними дослідженнями [4] загальне надходження тепла (холоду) у вантажний відсік автомобіля складається з теплопритоків (Дж):

$$Q_o = Q_n + Q_n + Q_p, \quad (1)$$

де  $Q_n$ ,  $Q_n$ ,  $Q_p$  – відповідно безперервні, періодичні та разові теплопритоки.

Безперервні теплопритоки складаються з:

$$Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (2)$$

де  $Q_1$  – теплопритік через стінки кузова;  $Q_2$  – тепло від проникнення зовнішнього повітря через щілини у дверях, люках фургонів;  $Q_3$  – тепло (холод), що витрачається на охолодження вантажу і тари, враховується тільки для вантажів, що охолоджуються в дорозі, і діє протягом періоду охолодження вантажу до заданої температури;  $Q_4$  – фізіологічне тепло, що виділяється плодами та овочами у процесі життєдіяльності, враховується лише під час перевезення охолоджених рослинних вантажів.

До періодично діючих належать теплопритоки:

$$Q_n = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8, \quad (3)$$

де  $Q_5$  – тепло через додаткове нагрівання кузова від сонячної радіації, враховується тільки в денний час доби у всіх розрахунках;  $Q_6$  – тепло від зовнішнього повітря, що надходить у вантажний відсік при вентиляванні, враховується для вантажів, що вимагають вентиляції;  $Q_7$  – тепло, що виділяється електродвигунами вентиляторів і циркуляторів через нагрівання обмоток;  $Q_8$  – тепло, що надходить під час відтавання снігової шуби через подачу тепла на випарник.

Разові теплопритоки:

$$Q_p = Q_9 + Q_{10}, \quad (4)$$

де  $Q_9$  – тепло через відчинені двері під час завантаження та розвантаження;  $Q_{10}$  – тепло під час первинного, попереднього охолодження кузова та внутрішнього обладнання.

**Постановка завдання.** Отже, робота присвячена оцінці пристосованості автомобілів на основі встановлення закономірностей впливу погодних і транспортних умов експлуатації на температурний режим вантажного відсіку. Метою нашого дослідження є підвищення ефективності використання автомобілів-рефрижераторів шляхом встановлення та практичного використання закономірностей впливу умов експлуатації на температурний режим вантажного відсіку автомобіля.

**Виклад основного матеріалу.** Автомобілі-рефрижератори, що використовуються для перевезення морозива та заморожених продуктів [8], можна розділити на два типи: автомобілі-рефрижератори з холодильними установками евтектичного типу та автомобілі-рефрижератори з холодильними установками компресорного типу. Експлуатаційні випробування проводились на автомобілях IVECO 59-12 і АФ-37170А. Вони мають рівні об'єми ВВ, а також по троє дверей з кожного боку фургона розмірами 90 × 60 см. Порівняльна характеристика автомобілів наведена в табл. 1.

**Таблиця 1.** Порівняльна характеристика автомобілів-рефрижераторів IVECO 59-12 та АФ-37170А  
**Table 1.** Comparative characteristics of IVECO 59-12 and AF-37170A refrigerated trucks

Показник	АФ-37170А	IVECO 59-12
Тип холодильної установки	компресорна	евтектична
Холодопродуктивність холодильної установки, Вт за зовнішньої температури +30 °С	2300 за 0 °С 1350 при -20 °С	4000
Внутрішній об'єм ВВ, м <sup>3</sup>	11,18	10,6
Зовнішня площа ВВ, м <sup>2</sup>	35,0	35,3
Площа бічних стін, м <sup>2</sup>	22,0	18,5
Кількість бічних дверей фургона, шт.	3	3
Площа дверного отвору, м <sup>2</sup>	0,54	0,54
Зовнішній об'єм ВВ, м <sup>3</sup>	13,8	13,7
Вантажність, кг	1200	2200
Тип двигуна	бензиновий	дизельний
Вартість, тис. грн	860	1250

Автомобіль IVECO 59-12 оснащений холодильною установкою евтектичного типу «Carrier Vatna-200» і забезпечує температурний режим від -18 °С до -35 °С при трьох, чотирьох відкриваннях дверей за годину за температури навколишнього повітря +30°С. Автомобіль АФ-37170А оснащений холодильною установкою компресорного типу «Термо King V-200 max» і забезпечує температурний режим -18..-20° С при двох, трьох відкриваннях дверей на годину за температури навколишнього повітря + 30 °С. У табл. 2 наведено характеристики деяких холодильних установок.

Випробування проводилися у міських умовах на розв'язних маршрутах під час пере-

знення морозива у торговельній мережі м. Львова при температурі навколишнього повітря від 0 °С до плюс 30 °С та атмосферному тиску 740...775 мм. рт. ст., при повному завантаженні автомобілів. Оподи були відсутні. Під час проведення експерименту замірялися: температура навколишнього повітря  $t_{нов}$  на початку і в кінці зміни, час розвантаження  $\tau_p$ , час руху з вантажем  $\tau_{рхв}$ , пробіг автомобіля, а також температура вантажного відсіку  $t_{ВВ}$  перед кожним відкриттям вантажного відсіку для розвантаження і через хвилину після завершення розвантаження. Температура повітря у вантажному відсіку  $t_{ВВ}$  вимірювалася у середній його частині на відстані 10 см від стелі фургона.

Температура повітря вимірювалася цифровим багатофункціональним термометром визначення та контролю температури HYELEC MS6501. Межі допустимої похибки становлять 0,5 °C в діапазоні вимірювання: -50 °C до +750 °C. Усі результати випробувань занесли до протоколу випробувань. Час фіксувався електронним хронометром.

Результати експериментальних досліджень стосовно впливу температури навколишнього повітря та сумарного часу розвантаження на температурний режим вантажного відсіку автомобілів різних марок представлені в таблиці 3.

**Таблиця 2.** Характеристика деяких холодильних установок  
**Table 2.** Characteristics of some refrigeration units

Параметри холодильної установки	Termoking V-200max	Carrier Vatna-200	Termoking V-250	Termoking V-400-10/20 max
Об'єм вантажного відсіку (ВВ) автомобіля рефрижератора, м <sup>3</sup> при К=0,4 Вт/м <sup>2</sup> °C	9-11	9-12	9-11	12-16
Холодопродуктивність, Вт	2300	4000	2750	4000
Характеристика ХОУ за температури навк. серед. +25 °C при 2-3х відчиненнях дверей на годину	-18...-20	-30...-35	-18...-20	-18...-22
Вартість холодильної установки у доларах США	4520	9120	4920	6520

**Таблиця 3.** Температурний режим вантажного відсіку автомобілів для перевезення вантажів, які швидко псуються

**Table 3.** Temperature regime of the cargo compartment of trucks for transportation of perishable goods

Температура повітря, °C	Температура повітря у вантажному відсіку, °C, досліджуваних автомобілів-рефрижераторів					
	сумарний час розвантаження $\tau_p = 7$ хвилин		сумарний час розвантаження $\tau_p = 105$ хвилин		сумарний час розвантаження $\tau_p = 196$ хвилин	
	IVECO 59-12	АФ-37170А	IVECO 59-12	АФ-37170А	IVECO 5912	АФ-37170А
0-5	-25	-18	-22	-14	-18	-10
5-10	-24	-17	-20	-12	-17	-8
10-15	-24	-16	-19	-10	-15	-6
15-20	-23	-16	-18	-10	-14	-4
20-25	-23	-14	-17	-9	-12	-3
25-30	-22	-12	-15	-8	-10	+3
30-35	-21	-10	-14	-7	-8	+5

Графічне зображення результатів експериментальних досліджень стосовно впливу температури навколишнього повітря та сумарного часу розвантаження на температурний режим вантажного відсіку автомобілів-рефрижераторів різних марок та моделей представлені на рис. 1.

Аналіз результатів дослідження підтверджує гіпотезу про лінійний характер впливу температури навколишнього повітря на температуру повітря у ВВ автомобіля-рефрижератора.

Аналітичний вид залежності  $t_{BB} = f(t_{нов})$  для автомобіля АФ-37170А з холодильною установкою компресорного типу під час перевезення партії морозива:

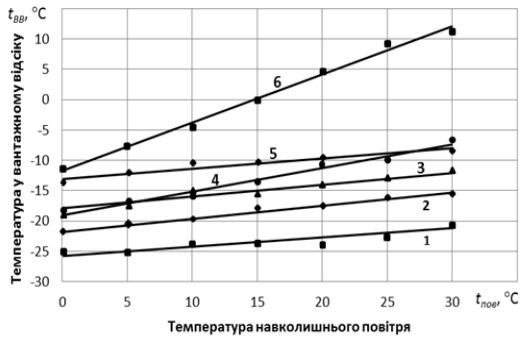
$$t_{BB} = -23,25 + 0,32(t_{нов} - (-18)). \quad (5)$$

Аналітичний вид залежності  $t_{BB} = f(t_{нов})$  для автомобілів IVECO 59-12 з холодильною установкою евтектичного типу набуде вигляду:

$$t_{BB} = -25,82 + 0,21(t_{нов} - (-25)). \quad (6)$$

Залежність температури повітря у вантажному відсіку від часу розвантаження при різних температурах навколишнього повітря для автомобіля-рефрижератора IVECO 59-12 із бічними дверима представлена на рис. 2.

Як видно з графіків зі збільшенням кількості зупинок для розвантаження, отже, і сумарного часу розвантаження, температурний режим вантажного відсіку підвищується. Особливо інтенсивно це підвищення відбувається за високих температур навколишнього повітря. Так, наприклад, при температурі навколишнього повітря +30 °C зі збільшенням часу розвантаження від 7 хвилин до 196 хвилин температурний режим підвищиться на 12 °C, а при температурі навколишнього повітря 0 °C – всього на 7 °C.

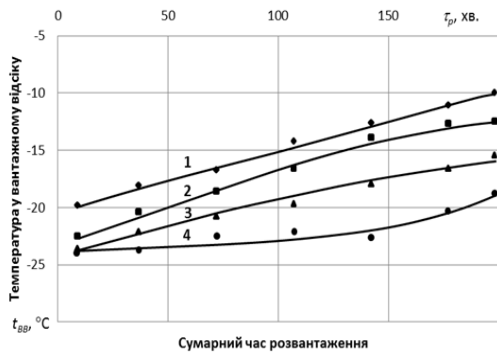


**Рис. 1.** Вплив температури навколишнього повітря на температуру повітря у вантажному відсіку автомобіля-рефрижератора:

1 – IVECO 59-12 ( $\tau_p = 7$  хв); 2 – IVECO 59-12 ( $\tau_p = 105$  хв); 3 – АФ-37170А із боковими дверима ( $\tau_p = 7$  хв);

4 – АФ-37170А із задніми дверима ( $\tau_p = 7$  хв); 5 – АФ-37170А із боковими дверима ( $\tau_p = 105$  хв); 6 – АФ-37170А із задніми дверима ( $\tau_p = 105$  хв)

**Fig. 1.** Influence of the ambient air temperature on the air temperature in the cargo compartment of the refrigerated truck: 1 – IVECO 59-12 ( $\tau_r = 7$  min); 2 – IVECO 59-12 ( $\tau_r = 105$  min); 3 – AF-37170A with side doors ( $\tau_r = 7$  min); 4 – AF-37170A with a rear door ( $\tau_r = 7$  min); 5 – AF-37170A with side doors ( $\tau_r = 105$  min); 6 – AF-37170A with rear door ( $\tau_r = 105$  min)



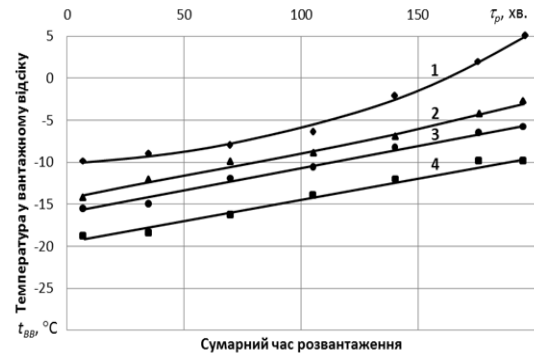
**Рис. 2.** Вплив часу розвантаження на температуру повітря у ВВ автомобіля IVECO 59-12:

1 –  $t_{нов} = 30$  °C; 2 –  $t_{нов} = 20$  °C; 3 –  $t_{нов} = 10$  °C; 4 –  $t_{нов} = 0$  °C

**Fig. 2.** Influence of the unloading time on the air temperature in the IVECO 59-12 car's internal combustion engine:

1 –  $t_{пов} = 30$  °C; 2 –  $t_{пов} = 20$  °C; 3 –  $t_{пов} = 10$  °C; 4 –  $t_{пов} = 0$  °C

Залежність температури повітря у ВВ від часу розвантаження за різних температур навколишнього повітря для автомобіля-рефрижератора АФ-37170А з бічними дверима представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Вплив часу розвантаження на температуру повітря у ВВ автомобіля АФ-37170А із бічними дверима:

1 –  $t_{нов} = 30$  °C; 2 –  $t_{нов} = 20$  °C; 3 –  $t_{нов} = 10$  °C; 4 –  $t_{нов} = 0$  °C

**Fig. 3.** Influence of the unloading time on the air temperature in the interior of the AF-37170A car with side doors:

1 –  $t_{пов} = 30$  °C; 2 –  $t_{пов} = 20$  °C; 3 –  $t_{пов} = 10$  °C; 4 –  $t_{пов} = 0$  °C

Із графіків бачимо, що для будь-якого поєднання факторів температури навколишнього повітря і часу розвантаження на розвізному маршруті доставки ВП можна визначити відповідне значення температури повітря у ВВ автомобіля-рефрижератора. Необхідно зазначити, що температура повітря у ВВ досягне критичної температури (для морозива мінус 14 °C [5; 14]) у автомобіля-рефрижератора АФ-37170А вже за час розвантаження 35 хв, а у автомобіля-рефрижератора IVECO 59-12 за час розвантаження 185 хв в умовах того самого розвізного маршруту при температурі навколишнього повітря +15 °C.

Аналіз результатів дослідження показав, що за умови підвищення температури повітря і сумарного часу розвантаження підвищується температура повітря у ВВ автомобіля-рефрижератора. Встановлено, що найменший вплив високих температур навколишнього повітря та час розвантаження на температурний режим вантажного відсіку характерні для автомобілів IVECO 59-12 з холодильною установкою евтектичного типу.

Аналітичний вигляд багатфакторних моделей для автомобілів IVECO 59-12 з холодильною установкою евтектичного типу, для автомобіля АФ-37170А з холодильною установкою компресорного типу:

$$t_{BB}^{IVECO} = -30,05 + 0,15(t_{нов} + 25) + 1,48\tau_p - 5,63\tau_{pxe}\tau_p + 0,04(t_{нов} + 25)\tau_p + 1,48(t_{нов} + 25)\tau_{pxe}; \quad (7)$$

$$t_{BB}^{AF} = -18,84 + 8,92(t_{нов} + 18) + 3,15\tau_p - 3,07\tau_{pxe}\tau_p + 7,09(t_{нов} + 18)\tau_p + 0,12(t_{нов} + 18)\tau_{pxe}. \quad (8)$$

Значення статистичних характеристик багатфакторних математичних моделей представлені в табл. 4.

**Таблиця 4.** Статистичні характеристики математичних моделей впливу температури навколишнього повітря і часу розвантаження на температуру повітря у вантажному відсіку

**Table 4.** Statistical characteristics of mathematical models of ambient air temperature and unloading time influence on the air temperature in the cargo compartment

Назва характеристики	Чисельні значення для автомобілів-рефрижераторів	
	IVECO 59-12	АФ-37170А
Коефіцієнт множинної кореляції $R$	0,99	0,98
Коефіцієнт множинної детермінації $D$	0,98	0,96
t-статистика коефіцієнта кореляції	52,15	32,2
Рівень значимості коефіцієнта кореляції	0,93	0,99
Середня похибка апроксимації $S$ , %	2,25	8,52
Середнє квадратичне відхилення $S_y$	4,32	5,29
Дисперсійне відношення Фішера $F$	62,47	23,73
Критерій Фішера $F_{0,99}$	2,11	2,11
Рівень адекватності $P(F)$	0,99	0,99

Дисперсійне відношення Фішера більше за табличне значення з ймовірністю 0,99, що свідчить про адекватність математичних моделей експериментальним даним і підтверджує висунуту раніше гіпотезу. Чисельні значення коефіцієнта детермінації вказують на повноту врахування факторів у моделі. Значимість параметра чутливості до зміни температури навколишнього повітря і сумарного часу розвантаження перевірені за критерієм Стюдента. Розрахункові значення t-статистики більші табличних з ймовірністю 0,95.

Аналіз результатів досліджень показав, що найменший вплив високих температур навколишнього повітря та часу розвантаження на температурний режим вантажного відсіку, з числа досліджених, характерний для автомобілів IVECO 59-12 з холодильною установкою з евтектичних пластин. Такі автомобілі найбільше пристосовані до високотемпературних умов перевезення вантажів, що швидко псуються, на розвізних маршрутах із частими зупинками. Найбільший вплив високі температури навколишнього повітря та час розвантаження на температурний режим вантажного відсіку відповідає автомобілю АФ-37170А із задніми дверима у фургоні з холодильною установкою «Thermo king V-190». Тому для перевезення вантажів, що швидко псуються, на розвізних маршрутах із частими зупинками для вивантаження вантажу при високих температурах навколишнього повітря доцільніше застосовувати автомобілі IVECO. Це дозволить забезпечити збереження вантажу та підвищити ефективність використання рухомого складу.

**Висновки.** Виконане науково-практичне завдання, спрямоване на підвищення ефективності експлуатації автомобілів-рефрижераторів на розвізних маршрутах перевезення швидкопсувального вантажу в літній період на основі встановлення та практичного використання законо-

мірностей зміни температури повітря у вантажному відсіку за різних умов експлуатації.

Встановлено закономірності зміни температури повітря у вантажному відсіку від температури навколишнього повітря, часу розвантаження, часу руху. Зазначені закономірності описуються математичними моделями лінійного типу. Проведені дослідження підтверджують, що за умови підвищення температури повітря і сумарного часу розвантаження підвищується температура повітря у ВВ автомобіля-рефрижератора. Зокрема, при температурі навколишнього повітря +30 °С зі збільшенням часу розвантаження від 7 хв до 196 хв температурний режим у ВВ підвищиться на 12 °С, а при температурі навколишнього повітря 0 °С – всього на 7 °С. Температура повітря у ВВ досягне критичної температури для морозива (мінус 14 °С) у автомобіля-рефрижератора АФ-37170А вже за час розвантаження 35 хв, а у автомобіля-рефрижератора IVECO 59-12 за час розвантаження 185 хв в умовах того самого розвізного маршруту при температурі навколишнього повітря +15 °С.

Аналіз результатів дослідження показує, що найменший вплив високих температур навколишнього повітря та часу розвантаження на температурний режим вантажного відсіку характерний для автомобілів IVECO 59-12 з холодильною установкою евтектичного типу. Ці автомобілі є найбільш пристосованими до високотемпературних умов перевезення вантажів, що швидко псуються, на розвізних маршрутах з частими зупинками.

Найбільший вплив високі температури навколишнього повітря та час розвантаження на температурний режим вантажного відсіку відповідає автомобілю АФ-37170А із задніми дверима у фургоні з холодильною установкою «Thermo king V-200». Тому для перевезення вантажів, що швидко псуються, на розвізних

маршрутах з частими зупинками для вивантаження вантажу при високих температурах навколишнього повітря доцільніше застосовувати автомобілі IVECO 59-12 або виконувати часткове завантаження автомобіля-рефрижератора. Це дозволить забезпечити збереження вантажу та підвищити ефективність використання рухомого складу.

#### Бібліографічний список

1. Бондарев С. І. Управління якістю автомобільних перевезень. Київ: ФОП Ямчинський О. В., 2019. 233 с.
2. Босняк М. Г. Вантажні автомобільні перевезення. Київ: Видавничий Дім «Слово», 2010. 408 с.
3. Григорак М. Ю., Карпунь О. В. Логістичне обслуговування. Київ: НАУ-друк, 2010. 152 с.
4. Докуніхін В. З., Михайлович Я. М. Перевезення швидкопсувних вантажів в АПК. Київ: Нац. наук. центр «Ін-т аграр. Економіки», 2014. 354 с.
5. ДСТУ 4733:2007 Морозиво молочне, вершкове, пломбір. Загальні технічні умови. [Чинний від 01.01.2008]. Вид. офіц. Київ, 2008. 14 с.
6. Дьомін О. А., Загурський О.М. Вантажні перевезення. Київ: ФОП Ямчинський О. В., 2020. 608 с.
7. Калініченко О. П. Рішення задач оперативного планування вантажних перевезень на автомобільному транспорті. Харків: ХНАДУ, 2015. 139 с.
8. Краснокутський В. М., Самородов В. Б., Селевич С.Г. Спеціалізований рухомий склад на автомобільному транспорті. Харків: Друкарня Мадрид, 2020. 240 с.
9. Кунда Н. Т., Олещук Н. В. Оптимізація схеми доставки дрібнопартійних вантажів автомобільним транспортом. *Вісник Національного транспортного університету*. 2018. № 1. С. 178–187.
10. Маяк М. М., Антонюк М. Я. Логістичний підхід до організації перевезень швидкопсувних вантажів. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції (25-27 жовтня 2021 року)*. Вінниця: ВНТУ, 2021. С. 148–151.
11. Москвітін Т. Логістичні рішення на ринку швидкопсувних товарів. *Товари і ринки*. 2012. №1. С. 15-23.
12. Поляков А. П., Галушак О. О., Галушак Д. О. Методика вибору рухомого складу, маршруту і графіка перевезення вантажів. *Наук. Праці ВНТУ*, 2011. Вип. 3. С. 112–118.
13. Процик О. П. Вибір спеціалізованого рухомого складу при заданих умовах експлуатації. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2010. №79. С. 70–73.
14. Сопочко О. Ю. Аналіз нормативно-правових актів, що визначають роботу зі швидкопсувними вантажами на різних видах транспорту. *Вісник Національного транспортного університету*. 2014. №29 (2). С. 100–105.
15. Сумець О. М., Войтов В. А. Логістичні системи і ланцюги постачань. Харків: КП «Міська друкарня», 2013. 194 с.
16. Ширяєва С. В., Ануфрієва Т. Г. Аналіз процесу перевезень швидкопсувних вантажів різними видами транспорту. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2010. Технічна серія 7. С. 324–327.
17. Kulig Ł., Tereszkievicz K., Kagan W. An assessment of the efficiency of selected refrigeration units of vehicles for food transport depending on the operating conditions. *Transport Problems*. T. 16. 2021. P. 71–82.
18. Ben Taher M.A., Kousksou T., Zeraouli Y., Ahachad M. Thermal performance investigation of door opening and closing processes in a refrigerated truck equipped with different phase change materials. *Journal of Energy Storage*. Vol. 42. 2021. 103097.
19. Kayansayan N., Alptekin E., Ezan M. A. Thermal analysis of airflow inside a refrigerated container. *International Journal of Refrigeration*. Vol. 84. 2017. P. 76–91.

Стаття надійшла 19.05.2024



## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДИК АГРОЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ МАШИННО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТИВ В УКРАЇНІ ТА КРАЇНАХ ЄС

*Петро Сивулька, аспірант*

*Львівський національний університет природокористування  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна  
e-mail: petr1111@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.209>

### **Сивулька П. Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів в Україні та країнах ЄС**

У статті наведено порівняльний аналіз підходів, методик та нормативних баз агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів (МТА) в Україні (Східна школа) та країнах ЄС (Західна школа, на прикладі ФРН). Суттєві відмінності під час використання важких тракторів класів 3–6 і проблеми ущільнення та деградації аграрних угідь зумовлюють актуальність розвитку вітчизняної школи та нормативної бази в аспекті гармонізації з ЄС. Зокрема щодо неоднозначності використання питомого тиску в контактні колеса з ґрунтом як єдиного нормативного показника агроекологічної оцінки МТА, відсутності вітчизняної нормативної бази щодо оперативної оцінки фізико-механічних характеристик конкретних земель (пенетрометри – за практикою ЄС) та врахування коліс різних типорозмірів передньої та задньої осей і додаткове ущільнення ґрунту колесами задньої осі під час руху однією колією.

Опрацьовано пропозиції з гармонізації вітчизняної нормативної бази з практикою ЄС щодо оперативної оцінки характеристик ґрунту за допомогою прийняття відповідного стандарту ISO як ДСТУ та розвиток агроекологічної оцінки МТА з урахуванням послідовності проходження коліс передньої і задньої осей, різних типорозмірів передніх і задніх шин, впливу навісних та причіпних знарядь.

Встановлено потребу подальшого розвитку та вдосконалення методик дослідження й оцінки ефекту ущільнення ґрунту за умови послідовного проходження коліс передньої і задньої осей, впливу навісного й причіпного обладнання на динаміку перерозподілу навантажень по осях та відповідного ущільнення, аналітичної оцінки впливу коліс різних типорозмірів на передній та задній осях та кратності проїзду.

**Ключові слова:** агроекологія, трактори, оброботок землі, ущільнення ґрунту, вміст вологи і повітря.

### **Syvulka P. Comparative analysis of the methods of agro-ecological assessment of machine-tractor units in Ukraine and EU countries**

The article focuses on a comparative analysis of the approaches, methods, and regulatory frameworks for agro-ecological assessment of machine-tractor units (MTU) in Ukraine (the Eastern School) and EU countries (the Western School, specifically using Germany as an example). There are significant differences related to the increasing use of heavy tractors classified between 3 and 6, which raises urgent concerns about soil compaction and degradation in agricultural lands. This situation highlights the necessity for the development of a national framework in Ukraine that aligns with EU standards. One major issue identified is the ambiguity surrounding the use of specific wheel pressure as the sole regulatory indicator for the agro-ecological assessment of MTUs. Additionally, there is a lack of a national regulatory framework for the rapid assessment of the physical and mechanical properties of various soils, such as the use of penetrometers that align with EU practices. Other factors that need consideration include the varying sizes of front and rear axle wheels and the compaction caused by the rear axle during travel on a single track.

The article proposes harmonizing the national regulatory framework with EU practices through the adoption of relevant ISO standards as the national standard (DSTU). Furthermore, it offers suggestions for improving the agro-ecological assessment of MTUs by considering the sequence of wheel passage for front and rear axles, the different sizes of front and rear tires, and the effects of mounted and trailed implements.

The need for ongoing development and enhancement of methods for studying and evaluating soil compaction is emphasized, particularly during the sequential passage of wheels from the front and rear axles. This includes assessing the impact of mounted and trailed implements on load redistribution along the axles, analyzing how wheel size variations affect compaction, and monitoring the frequency of wheel passage.

**Keywords:** agro-ecology, tractors, tillage, soil compaction, moisture and air content.

**Постановка проблеми.** Вплив МТА на фізико-механічні характеристики сільськогосподарських угідь – тільки один із аспектів агро-екології загалом, що став, однак, особливо відчутним упродовж останніх 30–35 років, з розвитком і масовим упровадженням значно потужніших і важчих МТА та інтенсифікацією процесів оброботку ґрунту [1–2]. Агро-екологічні дос-

лідження впливу нового покоління МТА, значно продуктивніших, але і у 2–3 рази важчих тракторів, що домінували до того, розгорнулись практично з початком використання тракторів Т-150К та К-700 у СРСР [3] та на одне-два десятиліття раніше з появи аналогічних тракторів класу 3–6 у Західній Європі і США [4]. Природно, що інформаційна замкнутість і політичні

протистояння зумовили суттєві відмінності в методиках агроекологічної оцінки МТА у Східній (срер, згодом Україна) та Західній (країни ЄС) наукових школах.

**Постановка завдання.** Тренд України до євроінтеграції зумовлює доцільність порівняльного аналізу та гармонізації вітчизняної методології та нормативної бази з країнами ЄС.

**Виклад основного матеріалу.** Інтенсивність машинного обробітку сільськогосподарських угідь (і втрати, зменшення урожайності від ущільнення ґрунту) взаємопов'язана з дотриманням сприятливих агротермінів/тривалості тих чи інших видів обробітку ґрунту, недотримання яких теж спричиняє зменшення – недобір урожаю. Очевидно, що використання більш потужних МТА з більшою шириною обробітку угідь дозволяє відчутно скоротити терміни, вкластись у найбільш сприятливі і зменшити відповідний потенційний недобір урожаю. З іншого боку, збільшення потужності і ваги МТА неминуче збільшує тиск від коліс чи гусениць на землю, спричинює її ущільнення і, відповідно, теж спричинює недобір урожаю (та повільну деградацію орних земель [1-5]). Поточна економічна вигода мінімізації втрат від недотримання агротермінів стимулює зростаюче розповсюдження більш потужних і важчих МТА (наразі класів 3-5т порівняно з ще донедавнім у часи срер домінуванням класів 0,8–1,4 т – МТЗ/ЛТЗ та гусеничних, з меншим питомим тиском на ґрунт – ДТ 75/Т 74 класу 3). Тенденція зростання потужностей і маси МТА в аграрному секторі очевидна [6] і з певним запізненням щодо США та Західної Європи вона ставала реальністю ще у 1980-х рр. і в Україні/СРСР.

Загалом необхідно зазначити, що дослідження впливу ущільнення сільськогосподарських земель тракторами розпочалися ще перед Другою світовою війною, фактично на початках масового розповсюдження МТА в аграрному секторі, однак основи сучасної методології цих досліджень у Західній Європі заклав проф. В. Зьене (W. Soehne) уже на початку 1950-х років [7-9]. Зрештою і в колишньому срер у той же період розпочалися дослідження руху колісних та гусеничних машин бездоріжжям та ґрунтовими дорогами, а також будівництва автодоріг, зокрема і ґрунтових, що утворювали значну частку від загальної мережі автодоріг. Фактично проф. Біруля А. К. та проф. Сіденко В. М. (ХАДІ, зараз ХНАДУ), не без впливу наявного у тому ж місті тракторного заводу ХТЗ, розгорнули дослідження і щодо ущільнення сільськогосподарських угідь МТА [10], що базувались на теоретичних засадах механіки

ґрунтів, найбільш ґрунтовно опрацьованих у срер проф. Цитовичем А. М. [11].

Необхідно зауважити, що наукові школи дослідження прохідності та ущільнення ґрунтів колісними і гусеничними машинами щодо військової автотехніки (ВАТ) та тракторів і автомобілів в аграрному секторі як в срер, так і зрештою за кордоном, розвивались паралельно, зокрема, очевидно, через певну інформаційну закритість військової тематики та різних цільових пріоритетів.

У срер у 1980 р. було створено координативну раду при Всесоюзній академії сільськогосподарства (ВАСХНИЛ) з проблеми ущільнення технікою аграрних угідь і визначено головні наукові організації з цієї проблеми. Необхідно зазначити, що за результатами цих робіт у 1986 р. були опрацьовані та прийняті (серед перших у міжнародній практиці) законодавчі нормативні акти – три державні стандарти ГОСТ, що визначали методи оцінки впливу МТА на ущільнення ґрунтів, та допустимі, порогові значення питомого тиску колісних і гусеничних рушіїв МТА на сільськогосподарські угіддя (серед ініціаторів і співавторів цих стандартів були і українські науковці, насамперед академік НААН України, проф. Медведєв В. В. [2]). Однією з рекомендацій розробників цих ГОСТів було обмеження використання тракторів К 700, менше – і Т 150К, на низці операцій обробітку ґрунтів [3]. У 2006-2008 рр. основні положення даних ГОСТ із певними доопрацюваннями були покладені і в основу відповідних національних стандартів України [12-14]. Однак оцінка відповідності цій нормативній базі, принаймні поки що, не входить до переліку обов'язкових при сертифікації/ допуску до експлуатації нових на ринку України вітчизняної та зарубіжної техніки. Водночас, як свідчать сучасні дослідження [15-16], абсолютна більшість нових потужних колісних тракторів класів 3 і 5, (зокрема і Т 150К / Т170К), що використовуються крупними агрохолдингами в Україні, не відповідають вимогам вищевказаних ДСТУ на переважаючій частині сільськогосподарських угідь.

Загалом допустимі максимальні тиски на ґрунт коліс МТА, визначені з диференціацією від пір року (весна і літо/осінь), а також залежно ще від двох чинників – вологості ґрунту у верхньому шарі 0-30 см (в долях від найменшої об'ємної вологомисткості НВ) – 5 рівнів та питомої ваги (щільності) ґрунту у верхньому шарі 0-10см – 2 різні рівні для сезонів весна і літо/осінь [12]. Залежно від різновиду ґрунту за гранулометричним складом задано значення НВ (у %) – від 14 до 40 %. Середній тиск коліс на

грунт (площа контакту навантаження на колесо) корегується коефіцієнтом нерівномірності розподілення тиску за площею контакту колеса з ґрунтом, що визначається за довідковими таблицями. Другим аспектом певної невизначеності є метод оцінки вмісту вологи у верхньому шарі ґрунту глибиною від 0 до 30 см, що є одним з визначальних показників родючості ґрунту [17] та звично може бути різною на поверхні та на глибині 30 см, а також щодо єдиної методики оцінки, де прийняті три стандарти ДСТУ ISO 10573, 11461, 16586 з різними методами й інструментарієм, однак практично не придатні для польових умов і оперативної оцінки на місці. Оперативним вирішенням проблеми є непряма оцінка вмісту вологи в ґрунті за допомогою супутників чи дронів, що базується на відбитті електромагнітного випромінювання в певному діапазоні – зокрема в системі EOSDA Crop Monitoring [17].

Іншим аспектом практичної роботи з ДСТУ [12] є оперативна оцінка щільності ґрунту, що звично донедавна оцінювалась лабораторно шляхом відбирання проб (метод ріжучого кільця Н. А. Качинського). Вітчизняна нормативна база в плані визначення і контролю щільності ґрунту – ДСТУ 4745 неповна, більш деталізована щодо процедури оцінки щільності ґрунту у будівництві – ДСТУ Б В 2.1-21; 2007. Безперечно, у цьому плані актуальним є нові, оперативні методи оцінки [18]. Зі щільністю взаємопов'язана інша механічна характеристика – твердість, і впродовж останніх двох десятиліть в аграрній сфері активні пенетрометри (твердоміри), що оперативно, на місці, дозволяють визначити твердість ґрунту в кількісному вимірі за рахунок вбудованого електронного блоку з показом значення [19]. Необхідно зазначити, що практика використання пенетрометрів, ще чисто механічних, для оцінки твердості ґрунту, як опорної поверхні для військової автотехніки (ВАТ), відома ще з часів Другої світової війни і була впроваджена інженерним корпусом армії США й досі збереглась із часів «ленд-лізу» у інженерних частинах ЗСУ [20; 21]. Звично, що це значно оперативніший метод порівняно з нормативним (за ДСТУ 5096 – твердоміром Ревякіна, відповідні прилади уже виробляються і в Україні). Відомі й перші наукові дослідження ґрунтів в Україні з використанням сучасного пенетрометра [22].

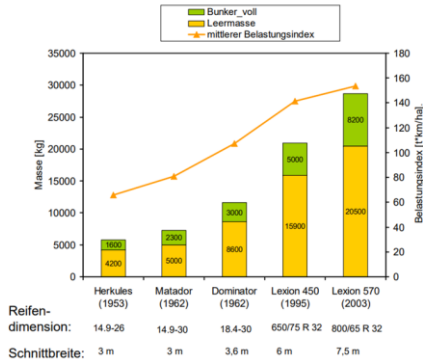
Детальні дослідження у сфері агроecологічної оцінки ущільнення і деградації ґрунтів МТА проводяться і у країнах ЄС, що теж констатують переущільнення сільськогосподарських ґрунтів, тим паче, що інтенсивне використання важких тракторів нового покоління почалось там раніше. Враховуючи лідируючу

роль у ЄС власне ФРН у плані обсягів виробництва МТА (зрештою і ВАТ) та проблему скорочення площ сільськогосподарських угідь у зв'язку з будівництвом та розвитком інших об'єктів інфраструктури, що обумовлює обережне та акуратне ставлення до використання аграрного потенціалу і його розвитку, доцільно розглянути розвиток досліджень щодо ущільнення і деградації угідь з-за МТА на прикладі цієї країни.

Насамперед необхідно зазначити, що у 1998 р. прийнято федеральний закон щодо охорони власне сільськогосподарських земель та у період 1998-2001 рр. – блок державних стандартів ФРН – DIN. Визначені всі польові (DIN 19682 – у 10 частинах) та лабораторні (DIN 19683 – у 9 частинах) методи оцінки фізико-механічних характеристик ґрунтів, окремо виділені оцінка щільності та твердості ґрунтів (DIN 11272, DIN 19688), однак прямий аналог ДСТУ щодо порогових параметрів ущільнення сільськогосподарських угідь фактично відсутній. У цьому плані, однак, опрацьовані нормативи німецького об'єднання інженерів (VDI) [23], як галузевий стандарт, та відповідні дослідження і публікації на цю тему [24]. Звично, що підходи і агроecологічна оцінка МТА суттєво відрізняються і не акцентують увагу на питомому тиску на ґрунт, приділяючи увагу зміні щільності та пористості (з розмежуванням вмісту вологи та повітря) ґрунту, як базових чинників урожайності. Але загалом проблема переущільнення аграрних ґрунтів є предметом ретельних досліджень та опрацювання відповідних рекомендацій державними установами, починаючи від Міністерства сільського господарства та наукових установ. На рис. 2 представлено еволюцію зміни навантажень на ґрунт зернозбиральними комбайнами за період з 1960-х рр. (але і вказано зміну ширини захвату та продуктивності) [25]. Практично констатовано більш ніж дворазове збільшення індекса інтенсивності навантаження на ґрунт (у тонно-кілометрах на 1 гектар) при майже чотириразовому збільшенні повної маси типових зернозбиральних комбайнів та одночасному збільшенні ширини захвату жатки з 3 до 7,5 м. Збільшення розмірності шин на відповідних моделях (див. рис.1), однак, не компенсує зростання тиску на ґрунт, що й обумовлює відповідно збільшення ущільнення та деградацію ґрунту.

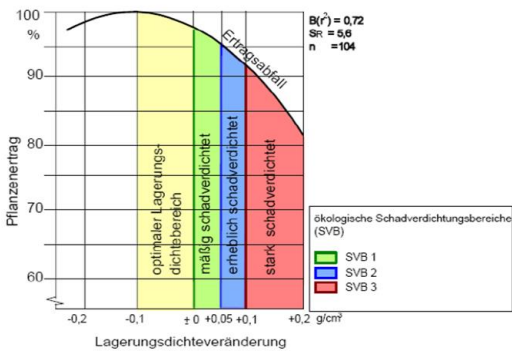
Вплив останнього (щодо оптимальної щільності з умов агрономії) на зменшення урожайності, згідно з даними [25], представлено на рис. 2. Як впливає з результатів польових досліджень [38], збільшення щільності ґрунту на 0,05 г/см куб. зумовлює падіння врожайності на незначних 3 %, однак на 0,1 г/см куб. уже на

8%, а при зростанні щільності ґрунту уже на 0,2 г/см куб. (що характерно для сучасних важких МТА) – уже на значні, недопустимі втрати – 18 %. Загалом подібні результати констатують і у вітчизняних дослідженнях та публікаціях [2-3; 16].



**Рис. 1.** Еволюція навантаження на ґрунт зернозбиральними комбайнами [25]. Індекс навантаження (т\*км/га) – права ордината; розмірність шин – 14.9-26 – до 800/65R32; ширина захвату – від 3 до 7,5 м; маса комбайна – споряджена/жовта; маса завантаженого бункера із зерном – зелена (кг)

**Fig. 1.** Evolution of soil load by combine harvesters [25]. Load index (t\*km/ha) - right ordinate; tyre size - 14.9-26 - up to 800/65R32; working width - from 3 to 7.5 m; combine weight - equipped/yellow; weight of loaded grain bin - green (kg)

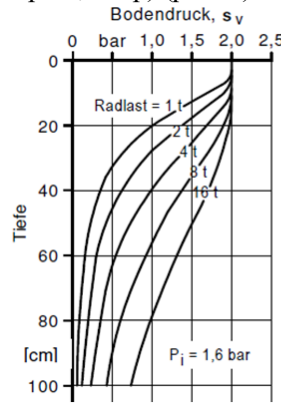


**Рис. 2.** Вплив ущільнення ґрунту на зменшення урожайності (згідно з дослідженням [25], де: по осі ординат – зміна врожайності, %; по осі абсцис – зміна щільності ґрунту, г/см<sup>3</sup>)

**Fig. 2.** The effect of soil compaction on yield reduction (according to the study of [25], where: on the ordinate axis - change in yield, in %; on the abscissa axis - change in soil density, in g/cm<sup>3</sup>)

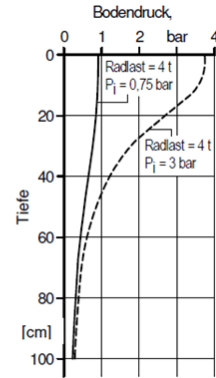
Ущільнення ґрунту має й довгострокові наслідки – так званих підорних шарів (підшви) ґрунту, що практично не піддаються механічній обробці (оранці, культивації), але мають вплив на розвиток кореневих систем сільськогосподарських культур, а, відповідно, і на урожайність наступних сезонів. На рис. 3, як приклад, представлено результати відповідного дослідження [26] щодо зміни тиску в ґрунті/ущільнення на глибину залежно від навантаження

на колесо при незмінному тиску повітря в шині 1,6 бар (тут Radlast – навантаження на колесо, Tiefe – глибина, Bodendruck – тиск в ґрунті). Вплив тиску повітря в шині надзвичайно суттєвий (насамперед зміна площі контакту шини з опорною поверхнею) [27], при незмінному навантаженні на колесо 4 т (при тиску в шині 0,75 бар і 3,0 бар) (рис. 4).



**Рис. 3.** Вплив навантаження на колесо на глибину ущільнення [26]

**Fig. 3.** Effect of wheel load on compaction depth [26]



**Рис. 4.** Вплив тиску в шині на розподіл навантаження в ґрунті за глибиною [27]

**Fig. 4.** Influence of tire pressure on soil load distribution by depth [27]

Спільною рисою досліджень ущільнення сільськогосподарських ґрунтів, як в ЄС, так і в США, є використання пенетрометрів для оперативної оцінки твердості ґрунту і власне з конусним наконечником щодо міцності – твердості ґрунту як опорної поверхні коліс, що давно є стандартизованою процедурою для військової автотехніки НАТО [20; 21]. Власне конусний наконечник дозволяє враховувати не тільки опір вертикальному навантаженню, що є базовим для статичної механіки ґрунтів (очевидною у сфері будівництва) – модуль деформації E – (модуль Юнга), що вимірюється циліндричним наконечником з плоскою основою, але й за рахунок кута конуса також і опір зсуву ґрунту у горизонтальній площині, що є неминучим елементом взаємодії колеса з опорною поверхнею, що деформується. Звично, що отримані значення опору ґрунту продавлюванню конусного наконечника уже не є показником, що характеризує тільки твердість у вертикальному напрямі, а уже комбінованим значенням з опором зсуву у горизонтальній площині – у військовій террамеханіці це так званий конусний індекс CI (cone index) [20; 21], на базі значення якого для конкретного бездоріжжя і визначається прохідність та потенційна мобільність руху ВАТ. Необхідно зазначити, що ця методологія (так зв. WES – методика Інженерного корпусу

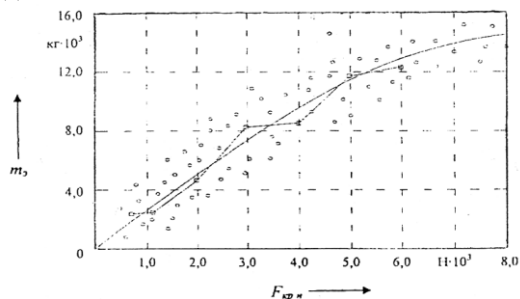
армії США) є значно простішою і ефективнішою порівняно з методикою, що була прийнята для ВАР у СРСР та досі є нормативною у пострадянських державах з використанням модуля Е, опору горизонтальному зсуву, коефіцієнту внутрішнього тертя і тощо [10; 11; 28]. Оцінка фізико-механічних характеристик ґрунтової чи піщаної поверхні пенетрометрами є стандартизована у міжнародному (добровільному) стандарті ISO [19] і прийнята як національна нормативна база у країнах ЄС, США тощо, зокрема з 2019 р. і у РФ, однак, на жаль, поки що не в Україні.

WES – методика віднедавна почала успішно використовуватись у лісгосподарській сфері в Європі, зокрема у Фінляндії [28; 29], Чехії [30] та згодом у розташованій неподалік Фінляндії [31]. Необхідно зауважити, що як у військовій, так і в лісгосподарській сферах представлення характеристик ґрунту, як опорної поверхні, є простішим і обмежується питанням прохідності та мобільності руху, визначальними для чого є взаємопов'язані твердість та вологість. З умов агротехнологій швидкісні режими руху МТА є обмеженими в діапазоні доволі низьких швидкостей, питання прохідності теж не актуальні – акцент на зміну пористості ґрунту, вмісту води і повітря внаслідок переущільнення в колії коліс. Водночас необхідно констатувати, що методи дослідження взаємодії шин/коліс машин з ґрунтом у аграрній сфері менш розвинуті порівняно з військовими, а, віднедавна і з лісгосподарськими сферами. В Україні, як і в країнах СНД, фактично відсутня сучасна нормативно опрацьована методика оперативної оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту аграрних угідь та відповідності технічних характеристик конкретних моделей МТА. Актуальність проблеми переущільнення аграрних земель сучасними МТА, втім, як підтверджують результати сучасних нещодавніх досліджень в Україні, тільки посилюється [15-16; 32]. Детальне дослідження можливостей зменшення питомого тиску в контактї шин з опорною поверхнею, проведене нещодавно д. т. н. Ребровим О. Ю., засвідчує можливості відчутного розширення ареалу угідь з умов агроecології і нормативних обмежень, однак загалом не знімає проблеми переущільнення земель для наявного парку МТА класів 3-5 т [15]. Результати дослідження засвідчили, що тільки 10 % з типуажу тракторів цього класу відповідають вимогам агроecології на 60 % території України, 75 % типуажу – тільки на 25 % території, а весь наявний типаж 15 основних виробників у ЄС та США (понад 600 моделей і модифікацій) – тільки на 3 % території [32]. З проведеного аналізу можливостей використання сис-

тем централізованого регулювання тиску в шинах – зміна площі контакту з опорною поверхнею (ОП) (типу Fendt VarioGrip чи Mitas AitCell [34]), а також систем регулювання розподілу зчіпної ваги трактора між переднім та заднім ведучими мостами (типу Fendt VarioPull) чи регульованого баласту (типу EZ Ballast – John Deere) можна досягнути для сучасних енергонасичених універсально-просапних тракторів класу 3 т зниження максимального тиску на ґрунт на 8-40 кПа, що дозволяє розширити на 14 % ареал використання площ в Україні без порушення агроecологічних вимог [12] щодо допустимого максимального тиску МТА на ґрунт [33].

Звісно, підбір шин, їхнє баластування та регулювання тиску повітря, системи регулювання розподілу навантажень на осі фактично є заходами вдосконалення уже сформованих конструкцій тракторів. Однак і питання конструктивного синтезу, компоновання трактора тягового класу 3т з умов власне агроecології є вкрай проблемним з умов забезпечення відповідного значення сили зчеплення коліс з ОП, що при відомих фізико-механічних характеристиках ґрунтів визначальним чином забезпечується насамперед за рахунок відповідної ваги самого трактора. Очевидно, що перехід на нове покоління колісних тракторів з більш ніж удвічі збільшенням класу тяги (із звичних 1,4 т колісних МТЗ, ПМЗ до 3,0 т – ХТЗ Т150К тощо) зумовив і відповідне зростання спорядженої, власної маси трактора, як умови забезпечення відповідного запасу сили зчеплення коліс з типовими ґрунтами, достатніми для реалізації проектного класу тяги з врахуванням сумарної сили опору рухові на регламентованих швидкостях руху з умов агротехнологій.

На рис. 5 за результатами аналізу [34] представлено статистичний аналіз залежності експлуатаційної маси колісних тракторів різних класів тяги виробництва країн ЄС, СНД та США, де ломаною лінією виділено конкретні моделі МТЗ.



**Рис. 5.** Узагальнена залежність експлуатаційної маси колісних тракторів ( $m$ ) від класу тяги ( $F$ ) [34]

**Fig. 5.** Generalised dependence of the operating weight of wheeled tractors ( $m$ ) on the traction class ( $F$ ) [34]

Західноєвропейська та північно-американська школи агроекології МТА з проведеного огляду і аналізу відрізняються від вітчизняної/СНД насамперед через:

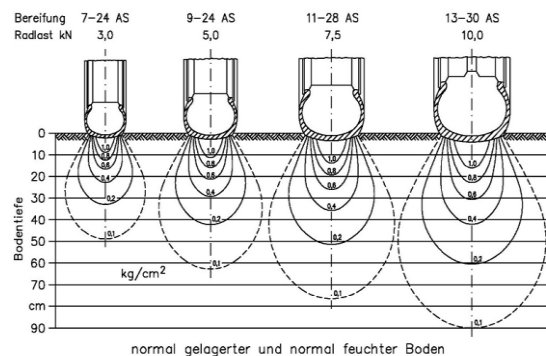
- відсутність однозначного домінування тиску в контактній шини з ґрунтом як визначального показника МТА з умов агроекології;
- акцент в агроекологічній оцінці МТА на зміни щільності ґрунту, пористість та, відповідно, вміст вологи і повітря як визначальних показників змін урожайності ґрунту;
- оперативна оцінка реальних фізико-механічних характеристик конкретного поля, як правило, пенетрометрами з конусним наконечником, що надає комплексну оцінку опору ґрунту вертикальній деформації та деформації зсуву, що більш наближене до реалій взаємодії колеса з опорною поверхнею, що деформується;
- дослідження проводяться на більшу глибину, як правило, до 1 м, і більше уваги надається проблемі утворення підорного шару ґрунту – незворотного ущільнення нижче звичної глибини механообробки (40-50 см), та його рекультивації;
- практично всі дослідження проводяться стосовно комплексів МТА – з навісним або причіпним обладнанням, що суттєво впливає на зміну навантажень на ґрунт ходовою системою та пробуксовування ведучих коліс через додатковий опір руху в результаті взаємодії робочих органів обладнання з ґрунтом.

Відсутність акценту на питомий тиск у контактній шини з ґрунтом, як це зроблено з часів срср і в Україні [12-14], обумовлено фактом різних глибин та периметру ущільнень ґрунту за однакового значення тиску в контактній шини для різних типорозмірів шин та відповідних навантажень, що опубліковано ще одним з основоположників західної школи агроекології МТА – W. Soehne [17] (рис. 6).

Визначальною відмінністю Західної наукової школи у сфері оцінки техногенного

впливу МТА на ущільнення і родючість сільськогосподарських угідь є акцент на зміни щільності ґрунту та його пористість, включно вміст повітря та вологи, як визначальні чинники родючості [1-3; 36-38]. Порогові значення щільності/пористості ґрунту (зокрема об'ємний вміст повітря, вологи) були визначені ще у 1970 – на початку 1980-х рр. – дослідження W. Czeratzki [37] та H. Petelkau [37]. Відповідне значення вологості різних видів ґрунту з умов агротехнологій Західної і Східної наукових шкіл практично ідентичні. Однак емпіричні залежності щодо оцінки впливу коліс МТА на ущільнення ґрунту відчутно відрізняються, зрештою, як і оцінки ґрунту як опорної поверхні для МТА.

**Висновки.** Очевидна необхідність гармонізації агроекологічної оцінки МТА з практикою країн ЄС, що дає повнішу характеристику впливу МТА на зміну характеристик ґрунту, що формують урожайність. Фактично відсутня і нормативна база оперативної оцінки твердості ґрунту, як опорної поверхні для колісних та гусеничних машин, що обумовлює прийняття міжнародного добровільного стандарту ISO 22476-1 в якості ДСТУ. Вітчизняні ДСТУ 4498, 4521 та 4977 доцільно доповнити нормами щодо щільності та пористості (вмісту вологи та повітря) з диференціацією для трьох основних базових ґрунтово-кліматичних зон, адже агроекологічна оцінка МТА тільки за значеннями питомого тиску на ґрунт далеко неповна. Потребують розвитку й методи дослідження та оцінки в аспекті врахування різного ефекту ущільнення ґрунту при послідовному проходженні коліс передньої й задньої осей, вплив навісного, причіпного устаткування на динаміку перерозподілу навантажень на осі та відповідного ущільнення, аналітичної оцінки впливу коліс різних типорозмірів на передній та задній осях та кратності проїзду.



**Рис. 6.** Залежність навантаження на ґрунт ( $\text{kg/cm}^2$ ) при однаковому тиску в контактній шини з ОП від розмірності шин (7-24S...13-30S) та відповідного навантаження на шину (3,0...10,0 kN) згідно з [17]. (Bodentiefe – глибина ґрунту)

**Fig. 6.** Dependence of the soil load ( $\text{kg/cm}^2$ ) at the same pressure in the tyre contact with the soil on the tyre size (7-24S...13-30S) and the corresponding tyre load (3.0...10.0 kN) according to [17]. (Ground Depth)

**Бібліографічний список**

1. Куценко О. М., Писаренко В. М. Агроекологія. Київ: Урожай, 1995. 254 с.
2. Медведєв В. В. Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-тракторних агрегатів. *Вісник аграрної науки*. 2012. № 10. С. 39-45.
3. Кашбулганов Р. А., Панасюк А. Н., Липкань А. В. Методика вибору енергетических средств в технологиях растениеводства по экологическим, энергетическим и экономическим критериям. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019. № 2(99). С. 139-148.
4. Надикто В. Т., Величко О. В. Прогноз розвитку енергонасиченості сільськогосподарських тракторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2015. Вип.1. С. 146-151.
5. Ксєневич И. П., Скотников В. А., Ляско М. И. Ходовая часть – почва – урожай. Москва: Агропромиздат, 1985. 304 с.
6. Froehlich O. K. Druckverteilung im Baugrunde. *Springer Verlag*. Wien, 1934. 178 p.
7. Soehne W. Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Raedern sowie bei der Bodenbearbeitung. *Grundlagen der Landtechnik*. 1951. No 1 (1). Pp. 87-94.
8. Soehne W. Die Verformbarkeit des Ackerbodens. *Grundlagen der Landtechnik*, 1952. No 2 (3). P. 51-59.
9. Soehne W. Druckverteilung im Boden und Bodenveformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik*. 1953. No 2 (5). Pp. 44-52.
10. Бабков В. Ф., Бируля А. К., Сиденко В. М. Проходимость колесных машин по грунтам. Москва: Автотрансиздат 1959. 326 с.
11. Цытович Н. А. Механика грунтов. Изд. 4. Москва: Госстройиздат, 1963. 311 с.
12. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт. Київ: Держспоживстандарт, 2006. 8с.
13. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем. Київ: Держспоживстандарт, 2008. 10 с.
14. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення дії ходових систем на ґрунт. Київ: Держспоживстандарт, 2005. 10 с.
15. Ребров О. Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях». 2018. № 27. Харків: НТУ «ХПІ». С. 110-116.
16. Білецький В. Р. Переуцілювання ґрунту рушіями мобільної сільськогосподарської техніки. Житомир: ДААУ, 2000. 43 с.
17. EOSDA Crop Monitoring. URL: [https:// eos.com /uk/blog/volohist-gruntu](https://eos.com/uk/blog/volohist-gruntu)
18. LFG – малогабаритний вимірювач щільності ґрунту – HLR. URL: [https:// industry.hlr.ua / bulding-materials-testing/ controlrfzestva-story-place/lfg](https://industry.hlr.ua/bulding-materials-testing/controlrfzestva-story-place/lfg)
19. Wong Y. J. Terramechanics and off road vehicle engineering. *Second Ed.* Butterworth. Ondon, 2010. 482 p.
20. Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прохідність військових автомобілів: монографія. Київ: Професіонал, 2023. 182 с.
21. Іванишин В.В., Рудь А.В., Мошенко І.О. Визначення переуцілювання ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2017. Вип. 27. С. 146-158.
22. VDI-Richtlinie 6101. Maschineneinsatz unter Beruecksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Boeden. *VDI Verlag*. Duesseldorf, 2007. 39 p.
23. Tijink F. G. J., Spoor G. Technische Leitlinien zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtung. *Zuckerindustrie*. 2004. No 129/ 9. Pp. 647–652.
24. Frielinghaus D., Petelkau H., Seidel K. Schadverdichtungen in Ackerboeden – Entstehung, Folgen, Gegenmassnahmen 14. *Wissen. Fachtagung Landwirtschaftliche Fakultaet der Universitaet Bonn*, 5. Dezember 2001. 88 s.
25. Chamen W. C. T. et al. Preventiob strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part.2: Equipment and field practices. *Soil Till. Resume*. 2003. No 47. Pp. 161-174.
26. Tijjink F.G.J., van der Linden J.P. Engineering approaches to prevent subsoil compaction in cropping systems with sugar beet. *Advances in Geoecology*. 2000. No 32. Pp. 442-452.
27. 19. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Fiekd testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.
28. Saarlahti M., Antilla T. Rut depth model for timber transport on moraine soils. *Procedings of the 13 ISVTS Conference*, September 1999, Munich: Germany. Pp. 29-37.
29. Saarlahti M. Soil interaction model. *Univercity of Helsinki, Departament of forest resource management*, Nr.QLK5-1999-00991. 2002. 86 p.

30. Marusiak M., Neruda J. Dynamic soil pressures Caused by travelling forest machines. *Croat. Journal Forest. Engineering*. 2018. No 39. Pp. 233-245.
31. Хитров Е. Г., Хахина А. М., Григорьев И. В., Григорьева О. И., Никифорова А. И. Расчет тягово- сцепных свойств колесных лесных машин с использованием WES – метода. *Лесотехнический журнал*. 2016. № 3, 2. С. 196–202.
32. Ребров О. Ю., Кальченко Б. І., Макаров В. А., Якунін М. С., Бучко І. Г., Реброва О. М., Артюшенко О. В., Леленко О. М. Оціночний аналіз дії на ґрунт ходових систем колісних сільськогосподарських тракторів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія Автомобіле- та тракторобудування*. 2022. № 1. С. 36–43
33. Ребров О. Ю. Наукове обґрунтування підвищення ефективності колісних рушіїв сільськогосподарських тракторів на енергоємних технологічних операціях обробітку ґрунту: дис. ...д-ра техн. наук. Харків, НТУ «ХПІ», 2021. 423 с.
34. Зезетко Н. И. Эксплуатационная и конструктивная массы проектируемого колесного трактора 4К4. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2014. № 2 (43). С. 26-36.
35. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. Москва: Машиностроение, 1981. 230 с.
36. Czeratzki W. Die Ansprueche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforschung Voelkenrode*. 1972. No 22 (1). Pp. 29-36.
37. Petelkau H., Seidel H. Rompreibilitaet von Bodenproben unterschiedlicher Substrate bei stufenweiser uniaxialer Belastung in Abhaengigkeit vom Wassergehalt. *Bodenkunde*. 1982. No 26 (6). Pp. 389-393.
38. Sommer C. Bodenschonende und Bodenschuetzende Pflanzenproduktion – dargestellt an Beispielen der Bodenbearbeitung. *Landtechnik*. 1986. No 41, Heft 9. Pp. 236-243.

Стаття надійшла 20.05.2024



УДК 631.3-331.45

## ОЦІНКА ПРОФЕСІЙНОГО РИЗИКУ ПРАЦІВНИКІВ ПІД ЧАС ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

*Василь Тимочко<sup>1</sup>, к. т. н., Іван Городецький<sup>1</sup>, к. т. н., Олексій Бурнаєв<sup>1</sup>, к. ф.-м. н., Ігор Мазур<sup>1</sup>, к. с.-г. н., Тетяна Кохана<sup>1</sup>, к. е. н., Володимир Войналович<sup>2</sup>, к. т. н., Олена Вісин<sup>3</sup>, к. і.н.*

<sup>1</sup>Львівський національний університет природокористування,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівська обл., Україна,  
e-mail: Tymochko\_VO@ukr.net

<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України,  
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна,  
e-mail: voynalovich@nubip.edu.ua

<sup>3</sup>Луцький національний технічний університет,  
вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна,  
e-mail: lena\_visyn@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.217>

### **Тимочко В., Городецький І., Бурнаєв О., Мазур І., Кохана Т., Войналович В., Вісин О. Оцінка професійного ризику працівників під час обслуговування та ремонту електричного обладнання**

На об'єктах підприємств електроенергетики найбільша частка нещасних випадків зі смертельними наслідками припадає на ураження електричним струмом (55% від загальної кількості). Електротравматизм здебільшого виникає під час експлуатації зовнішніх електроустановок (53%), зокрема трансформаторних підстанцій, повітряних ліній електропостачання, конденсаторних та перетворювальних пристроїв. Найбільш травмобезпечними професіями на підприємствах електроенергетики є електрослюсар з ремонту електрообладнання та електромонтер. Тому використання методів ідентифікації ризиків та небезпечних чинників під час експлуатації електричного обладнання – актуальне завдання попередження виробничого травматизму. Ризик небезпечних ситуацій можна оцінити як поєднання важкості наслідків та ймовірності виникнення небезпечної ситуації під час виробничої діяльності. Обґрунтовано професійні ризики та основні види загроз у процесах ремонту та обслуговування електроустаткування. Встановлено, що ступінь базового ризику виникнення небезпечних ситуацій ураження працівника електричним струмом, який зумовлюються недоліками допуску до роботи електромонтера або порушенням ним вимог безпеки, а також недоліками організації робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування становить по 48 балів, що відповідає середньому рівню – ризик не може бути прийнятним без запровадження захисних заходів. Ступінь базового ризику через недоліки забезпечення інструментами, спецодягом та іншими засобами індивідуального захисту, а також їх несправностями становить 54 бали, що відповідає високому ризику. За результатами оцінювання ризиків під час експлуатації електричного обладнання визначають адекватність планованих заходів безпеки, потребу їх удосконалення чи запровадження інших заходів безпеки. Для зниження ймовірності виникнення травмобезпечних ситуацій і пов'язаних з ними збитків планують відповідні заходи безпеки – від таких, що спрямовані на повне усунення небезпек на робочому місці й до таких, що передбачають застосування засобів індивідуального захисту.

**Ключові слова:** безпека праці, електричне обладнання, ідентифікація ризиків, небезпечний чинник.

### **Tymochko V., Horodetskyi I., Burnaiev O., Mazur I., Kokhana T., Voinalovych V., Visyn O. Assessment of occupational risk of workers during maintenance and repair of electrical equipment.**

At electric power enterprises, electrocution accounts for the largest share of fatal accidents, representing 55% of all deaths caused by electric shock. Most electrical injuries occur during the operation of external electrical installations, which make up 53% of incidents. This includes transformer substations, overhead power lines, and capacitor and converter devices. The most hazardous professions in these enterprises are electrical fitters responsible for repairing electrical equipment. Consequently, identifying risks and dangerous factors during the operation of electrical equipment is a critical task for preventing industrial injuries. The risk of hazardous situations can be assessed by combining the severity of potential consequences with the likelihood of occurrence during production activities. An analysis of professional risks and the main types of threats in the repair and maintenance processes of electrical equipment has been conducted. It was found that the basic risk level of electrocution due to deficiencies in an electrician's work permit or violations of safety requirements is 48 points, which indicates an average risk level. This level suggests that the risk is unacceptable without implementing protective measures. Additionally, the risk level due to inadequacies in providing tools, protective clothing, and other personal protection equipment, as well as any malfunctions of such equipment, is rated at 54 points, indicating a high risk. Based on the results of the risk assessment during the operation of electrical equipment, the adequacy of planned safety measures can be evaluated. This assessment helps determine whether improvements are needed or if other safety measures should be introduced. To reduce the likelihood of traumatic situations and associated losses, appropriate safety measures are planned. These

range from the complete elimination of hazards at the workplace to the requirement of using personal protective equipment.

**Keywords:** occupational safety, electrical equipment, risk identification, dangerous factor.

**Постановка проблеми.** Аналіз травматизму на підприємствах електроенергетики свідчить про те, що понад 55 % від загальної кількості травмованих у галузі загинули внаслідок ураження електричним струмом [1]. Нещасні випадки відбувалися у спеціалізованих енергетичних підприємствах переважно з оперативними працівниками, які мають достатній досвід, кваліфікацію і, власне, повинні забезпечувати безпечне виконання робіт. Це свідчить про незадовільну роботу з охорони праці керівників окремих електроенергетичних підприємств, структурних підрозділів та загалом служб охорони праці [7].

Серед проблемних питань в електроенергетиці – низький рівень виконавчої й технологічної дисципліни працівників, порушення вимог безпеки під час експлуатації обладнання, машин і механізмів. Стабільно збільшується кількість небезпечних робочих місць, де в результаті використання застарілої техніки та обладнання ризик нещасних випадків зростає, незадовільними є забезпечення працівників засобами індивідуального захисту і рівень знань працівників з питань охорони праці.

Для зниження виробничих ризиків та недопущення випадків виробничого травматизму з летальними наслідками необхідно ідентифікувати ризики та небезпечні чинники на робочих місцях та обґрунтувати методи керування ними. Тому розробка і використання методів ідентифікації ризиків та небезпечних чинників на робочих місцях, зокрема під час експлуатації електричного обладнання (ЕО), які базуються на моделюванні процесів їх формування є актуальним завданням для підприємств електроенергетики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми ризиків електротравмування на об'єктах підприємств електроенергетики досліджували у працях [1; 4]. Встановлено, що найбільша частка нещасних випадків зі смертельними наслідками припадає на ураження електричним струмом (55 % від загальної кількості). Найбільша кількість зі смертельних травм в енергетичній галузі, за даними статистики, припадає на електротравми. За даними досліджень [1; 4; 16] в енергетиці електротравматизм здебільшого виникає під час експлуатації зовнішніх електроустановок, зокрема трансформаторних підстанцій, повітряних ліній електропередавання, конденсаторних та перетворювальних пристроїв. Аналіз причин травматизму за місцем їх виникнення свідчить про те, що 53 %

електротравм виникло під час експлуатації зовнішніх електроустановок, решта 47 % електротравм сталося у приміщеннях. Найбільш травмонебезпечними професіями на підприємствах електроенергетики були електрослюсар з ремонту електрообладнання та електромонтер. Однак автори досліджень не аналізують небезпечні дії та ситуації, які стали причинами травмування працівників.

Це зумовлює потребу вдосконалення управління охороною праці на підприємствах електроенергетики, зокрема слід розробити заходи для мінімізації ризиків електротравматизму. Для обґрунтування рішень щодо мінімізації ймовірності електротравмування та професійно зумовлених захворювань від електричної енергії та для оцінювання ризику електротравматизму доцільно застосовувати причинно-наслідкову модель ризику електротравмування персоналу під час технічного обслуговування та ремонту електроустановок та ін.

Дослідження щодо розробки, удосконалення і використання методів аналізу процесів формування, виникнення аварій та виробничих травм наведені в багатьох наукових роботах вітчизняних і закордонних науковців [3; 14]. Ці та інші методи ґрунтуються на ретельному аналізі небезпечних ситуацій, обставин та умов їх утворення і розвитку [3; 13; 20]. Такий підхід дає змогу розробити заходи для уникання дії потенційних небезпечних чинників ще до початку виникнення травмонебезпечних чи розвитку катастрофічних ситуацій. Методи побудови схем відмов і помилок операторів різних складних систем передбачають також математичну обробку моделей з метою одержання кількісних значень ймовірностей небажаних випадкових подій [15; 18]. Визначені параметри рівня безпеки можна використати під час планування організаційних заходів і розробки та вдосконалення конструкцій технічних засобів і пристроїв безпеки, зниження чи уникнення розвитку небезпечних явищ під час їх експлуатації тощо.

У роботі словацьких та чеських науковців [17; 19; 22] запропоновано вивчати ризики виникнення небезпечних ситуацій та розробляти заходи безпеки за допомогою методу експертних оцінок. Такі підходи уможливають визначення ймовірності і наслідків небезпечних подій, а також враховують думку експертів у галузі. Ми запропонували характеристики та значення ймовірностей, результатів, наслідків подій, експертних оцінок та рівні ризиків.

На підставі оцінки рівня ризику обґрунтовують профілактичні заходи, які дають змогу мінімізувати загрози травмування працівників. Запропонована методика може бути використана для дослідження травмонебезпечних виробничих процесів ремонту та обслуговування електроустановок.

**Постановка завдання.** Метою роботи є обґрунтування переліку можливих професійних ризиків працівників під час виробничих процесів ремонту та обслуговування електричного обладнання, визначення рівнів небезпеки та обґрунтування заходів запобігання.

**Виклад основного матеріалу.** Методологія аналізу професійного ризику під час виробничих процесів ремонту та обслуговування електричного обладнання ґрунтується на відомих методах аналізу ризику, яку широко застосовують у світовій практиці під час оцінки небезпек. Аналіз професійного ризику передбачає дослідження несприятливих наслідків дій небезпеки на об'єкти впливу та обґрунтування управлінських рішень щодо зменшення рівня ризику.

Під час виробничих процесів ремонту та обслуговування електроустановок працівник виконує високоточну зорову роботу із контролем об'єктів розрізнення розміру 1-0,3 мм. Згідно з Гігієнічною класифікацією за показниками шкідливості та небезпечності, важкості праці та напруженості трудового процесу праця електромонтера відповідає 3 класу 1 ступеня шкідливості [5].

Для оцінки ризиків потрібно врахувати обставини місця виконання робіт, умови праці, вид та стан обладнання, особливості технологічного процесу та ін. Після ідентифікації ризиків та небезпек на робочих місцях визначають імовірність завдання шкоди та методи, як цьому запобігти.

Ризики та небезпечні чинники на робочих місцях визначають працівники, які організовують виконання роботи на конкретному робочому місці. Ідентифікація ризиків на робочому місці та обґрунтування методів керування ними мають вирішальне значення для створення умов безпечної роботи, що уможливило всім працівникам зробити власний внесок у створення безпечних умов праці на робочих місцях [8; 9; 11].

Після початку російської агресії проти нашої держави ризики працівників підприємств електроенергетики значно зросли. Агресор масовано атакує ракетами та безпілотними літальними апаратами об'єкти підприємств енергетичної інфраструктури України. Рятувальни-

кам і працівникам підприємств електроенергетики доводиться ліквідувати на об'єктах енергетичної інфраструктури аварії, які характерні для військового часу та бойових дій, які не описані у жодному переліку небезпек мирного часу. У результаті є нагальна потреба перегляду чинних нормативних документів. Результати перегляду чинних нормативних документів із імовірними небезпеками та ризиками військового часу потрібно фіксувати у картках ідентифікації небезпек та оцінки ризиків на робочих місцях, з якими потрібно ознайомити працівників, а також мають ознайомлюватися й інші зацікавлені особи, зокрема відвідувачі та працівники підрядних організацій.

Ідентифікація ризиків і небезпечних чинників на робочих місцях та обґрунтування методів керування ними має вирішальне значення для створення умов безпечної роботи, що дає змогу всім працівникам робити власний внесок у створення безпечних умов праці на робочих місцях. Тому розробка методів ідентифікації ризиків та небезпечних чинників на робочих місцях, зокрема під час експлуатації електричного обладнання, які базуються на моделюванні процесів їх формування, – актуальне завдання для підприємств електроенергетики.

Небезпеки під час експлуатації електричного обладнання у вигляді різних негативних чинників можуть виникати практично скрізь на підприємствах електроенергетики [10]. Враховуючи те, що у таких підприємствах експлуатують багато різного електричного обладнання, яке створює шкідливі та небезпечні чинники на робочих місцях і які впливають на працівників, виникає потреба детальніше їх проаналізувати.

Шкідливі та небезпечні виробничі чинники під час експлуатації електричного обладнання у підприємствах електроенергетики нерозривно пов'язані між собою. У результаті тривалого або короткочасного впливу на працівника вони призводять до зниження працездатності, погіршення стану здоров'я, виробничих захворювань або до травмування. У підприємствах електроенергетики з такими умовами праці під час експлуатації електричного обладнання різні нещасні випадки відбуваються досить часто.

Межа між шкідливими та небезпечними виробничими чинниками досить умовна. За певних умов шкідливі виробничі чинники можуть стати небезпечними. Так, наприклад, підвищена вологість повітря є параметром несприятливих виробничих умов праці, які можуть зумовити різні захворювання дихальної системи працівника. Якщо працівнику доводиться за таких умов працювати з електричним струмом,

обслуговувати електрообладнання, то шкідливий виробничий чинник стає небезпечним.

Ідентифікуючи небезпеки і оцінюючи ризики під час обслуговування електричного обладнання відповідно до вимог нормативних документів, фахівці повинні комплексно враховувати всі небезпеки та ризики, які присутні на кожному робочому місці, а також особливості організації технологічних процесів.

Ідентифікація небезпек на робочому місці полягає у визначенні всіх об'єктів, ситуацій або дій (чи їх поєднання), що притаманні обслуговуванню електричного обладнання та є потенційно загрозливими для здоров'я працівників.

Для проведення робіт з ідентифікації небезпек потрібно визначити, які вхідні дані буде використано, а також способи та джерела їхнього отримання. Основними вхідними даними для проведення таких робіт під час обслуговування електричного обладнання є:

- вимоги нормативних документів у сфері охорони праці;
- результати атестації робочих місць обслуговування електричного обладнання за умовами праці;
- дані щодо розслідування інцидентів, які виникали під час обслуговування електричного обладнання;
- результати попереднього визначення небезпек і оцінювання ризиків під час обслуговування аналогічного електричного обладнання;
- дані, отримані під час опитування працівників та зацікавлених сторін, щодо ризиків і заходів безпеки під час обслуговування електричного обладнання;
- дані щодо організації робочого місця під час обслуговування електричного обладнання, маршрути руху;
- технічні характеристики електричного обладнання, дані про небезпечні режими роботи, матеріали тощо.

До основних способів і джерел отримання вхідних даних належать:

- аналіз основних причин небезпечних ситуацій, які виникали під час обслуговування електричного обладнання;
- спостереження за режимами і методами роботи електричного обладнання;
- опитування фахівців щодо небезпек під час експлуатації електричного обладнання;
- аналізування причин інцидентів під час експлуатації електричного обладнання;
- моніторинг і оцінювання можливих небезпечних хімічних, фізичних та ін. чинників під час роботи електричного обладнання;

- оцінювання стану роботи електричного обладнання з позиції можливого виникнення небезпечної ситуації;

- аналіз документації з охорони праці, зокрема нормативно-правових актів, інструкцій з охорони праці під час обслуговування електричного обладнання;

- аналіз креслень, схем розміщення електричного обладнання тощо, а також технічних паспортів підприємств-виробників електричного обладнання, тощо.

Під час ідентифікації небезпек потрібно розглядати небезпечні ситуації, які постійно наявні за нормальних умов роботи електричного обладнання, а також інші небезпеки, вплив яких можливий за умови відхилення від нормальних режимів та умов роботи електричного обладнання і особливо за аварійних ситуацій.

Неплановими ситуаціями під час обслуговування електричного обладнання можуть бути:

- тимчасові зміни виробничого процесу використання електричного обладнання;
- порушення роботи мереж електро-, водо-, тепло-, газопостачання;
- екстремальні погодні умови під час обслуговування електричного обладнання, яке розміщене на відкритій місцевості (трансформаторні підстанції, лінії електропередач та ін.);
- надзвичайні ситуації, зумовлені діями ворога у військовий час.

У процесі ідентифікації небезпек потрібно врахувати ситуації, коли джерело небезпеки безпосередньо не пов'язане з обслуговуванням електричного обладнання на робочому місці, а небезпека може вплинути на працівника від сусідніх робочих місць. Тому під час ідентифікації небезпек потрібно врахувати небезпечні чинники, які також можуть виникнути поблизу робочого місця [12; 21].

За результатами ідентифікації небезпек мають бути встановлені небезпеки (об'єкт, ситуація чи дія, або їх поєднання), місце, де виникає небезпека (вид електричного обладнання, робоче місце), вид робіт, операцій, під час виконання яких виникає небезпека обслуговування електричного обладнання; працівники, які наражаються на небезпеку, а також усі інші працівники, які мають доступ до місця виникнення небезпеки.

До додаткової інформації для оцінювання ризиків відносять докладні відомості про місце виконання роботи, відстань до іншого робочого місця, яке може мати небезпечний вплив на працівника; професійна підготовленість і досвід працівника, який виконує роботи з підвищеною небезпекою; перебування поблизу електричного обладнання інших осіб, які можуть постраждати

від робіт з підвищеною небезпекою; відомості інструкцій щодо робіт з підвищеною небезпекою; інструкції виробників з експлуатації електричного обладнання та його технічного обслуговування; наявність на робочому місці системи вентиляції, засобів індивідуального та колективного захисту [6] та інших можливих засобів, у т.ч. комплексної автоматизованої системи безпеки.

Мету оцінювання ризиків досягають виконанням завдань із визначення величини ризиків, їх можливих наслідків і ймовірностей виникнення, прийняття рішень щодо прийнятності чи неприйнятності цих ризиків.

Критерієм вибору методу оцінювання ризиків є їхні цілі, а також фахова компетентність працівників, потреба в ресурсах та ін. Найчастіше ризик оцінюють за допомогою методів на основі експертної оцінки фахівців галузі. За результатами оцінювання ризиків встановлюють обсяг ризику та визначають неприйнятні роботи. Таку інформацію використовують під час визначання черговості запровадження заходів безпеки. Окрім того, результати оцінювання ризиків уможливають визначення доцільності заходів безпеки та потребу в їх удосконаленні чи запровадженні інших заходів безпеки.

Однією із основних професій, працівники яких задіяні під час виробничих процесів на підприємствах електроенергетики, є електриконттери з ремонту та обслуговування електрообладнання (РОЕ). До функціональних обов'язків електриконттера з РОЕ належить обслуговування силових електричних і освітлювальних установок, перевірка, розбирання і складання схем керування електроустаткуванням, підключення до електричної системи нового обладнання, його перевірка, періодичний нагляд за його роботою.

Для оцінки безпечності роботи електриконттера з РОЕ потрібно обґрунтувати перелік можливих ризиків, визначити їхні рівні та розробити проект заходів щодо їх запобігання під час ремонту та обслуговування електричного обладнання.

Для аналізу професійних ризиків розглянемо основні види загроз у процесах ремонту та обслуговування електричного обладнання, які зумовлені: 1) недоліками допуску до роботи електриконттера або порушенням ним вимог безпеки; 2) недоліками забезпечення електриконттера інструментами, спецодягом та іншими засобами індивідуального захисту, а також їх несправністю; 3) недоліками щодо організації робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування.

Ризик виникнення таких небезпечних ситуацій можна оцінити як поєднання важкості наслідків та ймовірності виникнення небезпечної ситуації під час виробничої діяльності. Для розрахунку характеристик і значень ймовірностей, результатів, наслідків подій і рівнів ризику було використано методуку, описану в роботах [19; 22]. Рівень ризику  $R$  розраховують за формулою:

$$R = P * D * V, \quad (1)$$

де  $P$  – ймовірність виникнення події;  $D$  – результат виникнення події;  $V$  – експертні рішення щодо рівня впливу ймовірності подій та наслідків на ризик.

Результати визначення ймовірностей виникнення події, її результат із відповідними характеристиками та розраховані значення рівнів ризику, а також запропоновані заходи безпеки подано у табл. 1–3.

Аналіз даних табл. 1–3 свідчить про те, що ступінь базового ризику виникнення небезпечних ситуацій ураження працівника електричним струмом, який зумовлений недоліками допуску до роботи електриконттера або порушенням ним вимог безпеки, а також недоліками організації робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, становить по 48 балів, що відповідає середньому рівню – ризик не може бути прийнятним без запровадження захисних заходів.

Ступінь базового ризику виникнення небезпечної ситуації ураження працівника електричним струмом, який зумовлюються недоліками забезпечення інструментами, спецодягом та іншими засобами індивідуального захисту, а також їх несправностями, становить 54 бали, що відповідає високому ризику та низькому рівню безпеки, існує значна ймовірність нещасних випадків та несприятливих подій.

Такий високий рівень ризику свідчить про те, що навіть за умов виконання чинних вимог нормативних документів щодо безпеки праці під час ремонту та обслуговування електроустаткування, внаслідок дії чинників ймовірнісного характеру, можуть виникати небезпечні ситуації травмування працівників. Це зумовлює потребу використання додаткових заходів безпеки.

Для зниження ймовірності виникнення тяжких травм слід проєктувати відповідні заходи безпеки, щоб можна було уникнути небезпек. Заходи безпеки вибирають починаючи від таких, які спрямовані на повне усунення небезпек на робочому місці і завершують застосуванням відповідних засобів індивідуального захисту (рис.).

**Таблиця 1.** Небезпечні чинники, зумовлені недоліками допуску до роботи електрика або порушенням ним вимог безпеки

**Table 1.** Dangerous factors caused by shortcomings in the electrician's work permit or his violation of safety requirements

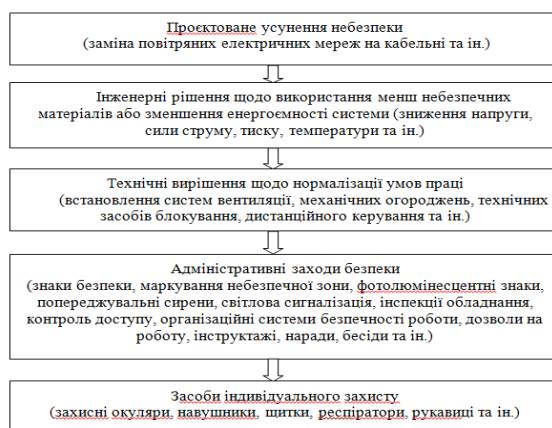
Опис загрози	Значення			
	P	D	V	R
До роботи електриком допущена особа, яка не відповідає вимогам за станом здоров'я	3	4	4	48
До роботи електриком допущена особа, яка має кваліфікаційну групу з електробезпеки нижче третьої, або не пройшла вступного інструктажу з охорони праці, пожежної безпеки, первинного інструктажу з безпеки робіт або не пройшла стажування під керівництвом досвідченого, висококваліфікованого електрика				
Електрик не використовує спецодяг та інші засоби індивідуального захисту, хоча ними забезпечений				
Електрик виконує монтажні і ремонтні роботи електричних мереж і пристроїв, а також роботи з приєднання і роз'єднання проводів, замінює несправні запобіжники без зняття напруги				
Електрик перед початком роботи не перевіряє справність електрообладнання або справність ізоляції проводів електроінструменту, переносних ламп, понижуючих трансформаторів на відсутність замикання на корпус, на цілісність заземлюючого проводу, стан ізолюючих підставок або решіток, пускових приладів, заземлення тощо				
Електрик вмикає електродвигуни або електроінструмент, або прилади електричного освітлення до електромережі шляхом скручування проводів без використання призначених для цього апаратів і приладів (кнопок, автоматичних вимикачів, рубильників, пускачів магнітних)				
Електрик перед початком роботи не перевіряє справність ручного інструменту (держаків кусачок і плоскогубців, робочої частини викрутки, стан гайкових ключів тощо), застосовує труби як продовжувачі ключів				
Електрик не відрегулював місцеве освітлення для відповідного освітлення робочої зони				
Електрик не відімкнув подачі напруги і (або) не вжив заходів, що перешкоджають помилковому або довільному включенню комутаційної апаратури для подачі напруги до місця роботи				
Електрик під час підготовки робочого місця до операцій з частковим або повним зняттям напруги не приєднав переносні заземлення до заземлюючого пристрою і (або) не ввімкнув заземлюючі ножі або не обгородив струмоведучі частини, що залишилися під напругою або не перевіряв показником напруги або переносним вольтметром відсутність напруги в електроустановках до 1000 В або не перевіряв наявність заземлення електроустановок при напрузі 500 В і вище або виконуючи роботи на відключеній частині електроустановки не забезпечив заземлення з усіх боків, звідки може бути подана напруга, включаючи і зворотну трансформацію				
Електрик накладає або знімає заземлення затискачами переносного заземлення без діелектричних рукавиць та без допомоги штанги із ізоляційного матеріалу і (або) знімає переносне заземлення спочатку від'єднуючи від заземлюючого пристрою				
Електрик, виконуючи роботи в електроустановках, у яких накладання заземлення небезпечне або неможливе (деякі розподільники, контрольно-розподільні пристрої тощо) не замкнув на замок привід роз'єднувача або не обгородив ножі або верхні контакти роз'єднувачів гумовими ковпаками або жорсткими ізоляційними накладками				

**Таблиця 2.** Небезпечні чинники, зумовлені недоліками забезпечення електрика інструментами, спецодягом та іншими засобами індивідуального захисту, а також їх несправністю  
**Table 2.** Dangerous factors caused by deficiencies in providing the electrician with tools, special work clothes and other means of personal protection, as well as their malfunction

Опис загрози	Значення			
	P	D	V	R
Електрик не забезпечений спецодягом і (або) засобами індивідуального захисту від ураження електричним струмом (діелектричними рукавичками, діелектричними килимами і ботами, інструментами з ізованими ручками)	4	4	4	54
Засоби індивідуального захисту від ураження електричним струмом, якими забезпечений електрик не перевірені та не випробувані, мають тріщини, розриви тощо				
Під час ремонту електрообладнання напруга для переносних світильників перевищує 42 В і (або) штепсельні вилки, що застосовують у мережах з напругою 12 і 42 В використовують у мережах з великою номінальною напругою і (або) електричні проводи не захищені від механічних пошкоджень ізоляції, від дотику до гарячих поверхонь, сталевих канатів, шлангів газової полум'яної апаратури, масел та кислот тощо				
Електрик під час робіт з частковим або повним зняттям напруги не забезпечений плакатами «Не вмикати – робота на лінії», «Не вимикати – працюють люди», «Не відкривати – працюють люди»				

**Таблиця 3.** Небезпечні чинники, зумовлені недоліками організації робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування  
**Table 3.** Dangerous factors, caused by shortcomings in the organization of work on repair and maintenance of electrical equipment

Опис загрози	Значення			
	P	D	V	R
Пуск електрообладнання, яке тимчасово відключене за заявкою персоналу, відбулося без перевірки готовності до прийняття напруги і без попередження персоналу, який працює на ньому	3	4	4	48
Не вимкнені вимірювальні трансформатори низької сторони, що призвело до трансформації напруги з низької сторони на високу				
Вмикання електроустановки, що автоматично вимкнулася без з'ясування та усунення причин її вимкнення				
Знаки безпеки, написи, плакати, засоби огороження та заземлення зняті без дозволу керівника робіт				
Електрообладнання увімкнено без відома особи, яка подала заявку на вимкнення, або особи, що замінила її, або уповноваженої особи, яка у цей час її заміняє				



**Рис.** Черговість вибору заходів безпеки операцій експлуатації електричного обладнання  
**Fig.** The sequence of selection of safety measures for electrical equipment operation

За результатами оцінювання ризиків під час експлуатації електричного обладнання визначають адекватність наявних заходів безпеки, потребу їх удосконалення чи запровадження інших заходів безпеки.

До заходів, спрямованих на повне усунення небезпек, належать такі, які повністю усувають з виробництва небезпечне електричне обладнання та встановлюють більш досконале та безпечне, наприклад, замінюють повітряні елек-

тричні лінії на кабельні. Однак це потребує значних капіталовкладень і тому такі проекти застосовують досить обмежено.

До інженерних рішень належать заміна небезпечних матеріалів менш небезпечними, зменшення енергоємності обладнання за рахунок зниження напруги, сили струму, тиску, температури тощо.

Заходи безпеки, які базуються на запровадженні технічних рішень для усунення небезпечних чинників, передбачають встановлення систем вентиляції, механічного огороження небезпечних частин електричного обладнання, аварійного блокування його роботи, звукового сповіщення про небезпеку та ін.

Якщо немає змоги усунути небезпеки електричного обладнання попередніми методами, відповідно застосовують організаційні (адміністративні) заходи безпеки, які полягають у встановленні попереджувальних написів, знаків безпеки, маркуванні небезпечних зон, попереджувальної звукової і світлової сигналізації тощо. Також організаційними (адміністративними) заходами можна вважати запровадження безпечних методів експлуатації електричного обладнання, періодичний контроль технічного стану обладнання, контроль доступу до електричного обладнання, удосконалення систем безпечності роботи, дозволи на роботу, проведення інструктажів тощо.

Якщо небезпеки експлуатації електричного обладнання на робочому місці цілком не усунуті, то потрібно використовувати засоби індивідуального захисту, а саме захисні окуляри, навушники, респіратори, рукавиці тощо.

Для досягнення задовільного рівня безпеки експлуатації електричного обладнання на робочому місці може бути застосований як окремих захід безпеки, так і їх групування, тобто використання кількох, різного спрямування. Якщо немає змоги усунути ризик небезпеки експлуатації електричного обладнання на робочому місці, то розглядають можливість його зниження до прийняттого рівня, який визначають у підприємстві з врахуванням правових зобов'язань та державної політики у сфері охорони праці.

Під час обґрунтування заходів безпеки експлуатації електричного обладнання на робочому місці потрібно враховувати:

рекомендації нормативних документів, в яких зазначено заходи безпеки для конкретних небезпек;

передовий досвід підприємств та новітні досягнення щодо застосування заходів безпеки експлуатації електричного обладнання;

можливості застосування засобів колективного захисту працівників;

необхідність поєднання різних заходів безпеки, зокрема технічних засобів захисту працівників та засобів індивідуального захисту;

наявність на підприємстві фінансових ресурсів для запровадження певного заходу безпеки.

### Висновки

1. На об'єктах підприємств електроенергетики найбільша частка нещасних випадків зі смертельними наслідками припадає на ураження електричним струмом (55 % від загальної кількості). Електротравматизм здебільшого виникає під час експлуатації зовнішніх електроустановок (53 %), зокрема трансформаторних підстанцій, повітряних ліній електропостачання, конденсаторних та перетворювальних пристроїв. Найбільш травмонезбезпечними професіями на підприємствах електроенергетики були електрослюсар з ремонту електрообладнання та електромонтер. Для зниження виробничих ризиків та недопущення випадків виробничого травматизму необхідно ідентифікувати ризики та небезпечні чинники на робочих місцях та обґрунтувати методи керування ними. Розробка методів ідентифікації ризиків та небезпечних чинників на робочих місцях, зокрема під час експлуатації електричного обладнання, які базуються на моделюванні процесів їх формування, є актуальним завданням.

2. Ризик виникнення небезпечних ситуацій можна оцінити як поєднання важкості наслідків та ймовірності виникнення небезпечної ситуації під час виробничої діяльності. Обґрунтовано професійні ризики та основні види загроз у процесах ремонту та обслуговування електроустаткування, які зумовлені недоліками допуску до роботи електромонтерів або порушеннями ним вимог безпеки, недоліками забезпечення електромонтерів інструментами, спецодягом та іншими засобами індивідуального захисту, а також їх несправностями, недоліками щодо організації проведення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування. Встановлено, що ступінь базового ризику виникнення небезпечних ситуацій ураження працівника електричним струмом, який зумовлюються недоліками допуску до роботи електромонтера або порушенням ним вимог безпеки, а також недоліками організації робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, становить по 48 балів, що відповідає середньому рівню – ризик не може бути прийнятним без запровадження захисних заходів. Ступінь базового ризику через недоліки забезпечення інструментами, спецодягом та іншими



засобами індивідуального захисту, а також їх несправностями, становить 54 бали, що відповідає високому ризику. Відповідно, за умови виконання чинних вимог нормативних документів щодо безпеки праці під час ремонту та обслуговування електроустаткування, внаслідок дії чинників ймовірного характеру, можуть виникати небезпечні ситуації травмування працівників.

3. За результатами оцінювання ризиків під час експлуатації електричного обладнання визначають адекватність планованих заходів безпеки, потребу їх удосконалення чи запровадження інших заходів безпеки. Для зниження ймовірності виникнення травмонебезпечних ситуацій і пов'язаних з ними збитків планують відповідні заходи безпеки – від таких, що спрямовані на повне усунення небезпек на робочому місці і до таких, що передбачають застосування засобів індивідуального захисту. Узагальнено елементи обґрунтування заходів безпеки експлуатації електричного обладнання на робочому місці.

#### Бібліографічний список

1. Бондаренко Є. А., Вишневський С. Я., Бондаренко А. Є. Сучасний стан електротравматизму в енергетичній галузі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 3. С. 18–23. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-156-3-18-23>.
2. Войналович О., Тимочко В., Гнатюк О., Городецький І.М. Визначення ризику травмування під час тракторних робіт на основі дефектоскопічного контролю. *Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. 2019. № 23. С. 131–136. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.131>.
3. Городецький І., Мазур І., Городецька Н., Березовецький А. Вплив обставин на формування небезпечних ситуацій аграрного виробництва. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Серія Агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 162–166.
4. Городецький І., Тимочко В., Магац М., Мазур І., Березовецький А., Мазурак М. Аналіз стану виробничого травматизму, як передумова управління процесами формування небезпечних подій. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження*. 2023. № 27. С. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.127>.
5. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»: Наказ Міністерства охорони здоров'я України 08.04.2014 р. № 248. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text> (дата звернення: 10.03.2024).
6. ДСТУ 7239:2011. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація. [Чинний від 02.02.2011]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2011. 20 с.
7. Інформація про травматизм на підприємствах паливно-енергетичного комплексу. URL: <https://mev.gov.ua/storinka/informatsiya-pro-travmatyzm-na-pidpryyemstvakh-palyvno-enerhetychnoho-kompleksu> (дата звернення 28.04.24).
8. Порядок розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/337-2019-%D0%BF#Text> (дата звернення: 21.04.2024).
9. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві: затв. наказом Міністерства соціальної політики України від 29.08.2018 р. № 1240. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1090-18#Text> (дата звернення: 10.03.2024).
10. Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0011-98#Text> (дата звернення 28.04.24).
11. Про затвердження Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій: наказ Міністерства охорони здоров'я України від 21.05.2007 р. № 246. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0846-07#Text> (дата звернення: 15.03.2024).
12. Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань. URL: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/968023> (дата звернення: 22.04.2024).
13. Тимочко В. О., Городецький І. М., Березовецький А. П. Оцінка ризику під час роботи на металообробних верстатах токарної групи. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 22–29.
14. Bujna M., Dostal P. Assessment of selected equipment by method FTA. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*. 2017. No. 5(65). P. 1655–1661.
15. Bujna M., Prístavka M., Lee C. K., Borusiewicz A., Samociuk W., Beloev I., Malaga-Toboła U. Reducing the Probability of Failure in Manufacturing Equipment by Quantitative FTA Analysis. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol.27,

- No. 1. Pp. 255–272. <https://doi.org/10.2478/agriceng2023-0019>.
16. News release. Bureau of Labor Statistics. US Department of Labor. URL: <https://www.bls.gov/news.release/pdf/cfoi.pdf> (date of application: 21.04.2024).
17. Occupational safety and health indicators. URL: <https://ilostat.ilo.org/topics/safety-and-health-at-work/> (date of application: 21.04.2024).
18. Pačaiová H., Andrejiová M., Balažiková M., Tomašková M., Gazda T., Chomová K., Hijj J., Salaj L., 2021. Methodology for complex efficiency evaluation of machinery safety measures in a production organization. *Applied Sciences*. Vol. 11, No. 1, article no. 453. DOI: 10.3390/app1101045.
19. Risk Assessment of Handling Loads in Production Process / E. Jankajova, M. Kotus, T. Holota, M. Zach. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis*. 2016. No 2(64). Pp. 449–453.
20. Tymochko V.O., Horodetskyi, I.M., Ber ezovetskyi, A.P., Voynalovich, O.V., Visyn, O.O. Analysis of safety regulations for mechanized spraying of agricultural crops. *Machinery and Energetics*. 2021. No. 12(2). Pp. 23–31.
21. Žitňák M., Lendelová J., Pivarčiová Z., Kieľbasa P., Dostál P. Possibilities of Noise Load Elimination in Production. *Acta Technologica Agriculturae*. 2023. No 26(1). Pp. 42–48.
22. Žitňák M., Korenko M., Shchur T., Kazán Ľ., Mazur M. Risk Management in Manufacturing Practice Using the Point Method. *System Safety: Human - Technical Facility – Environment*. 2023. No 5(1). Pp. 318–331.

Стаття надійшла 12.07.2024

УДК 629.113.001

## ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РУХУ УНІВЕРСАЛЬНИХ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

*Георгій Худавердян, аспірант, Олег Сукач, доцент*

*Львівський національний університет природокористування*

*вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н., Львівська обл., Україна,*

*<sup>1</sup>e-mail: georgiu.kh@gmail.com, <sup>2</sup>e-mail: 19oleg85@ukr.net*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.227>

### **Худавердян Г., Сукач О. Оцінка адекватності імітаційної моделі руху універсальних тягово-транспортних засобів**

Представлено результати досліджень потенційного максимального тягового зусилля, що може розвинути колісна машина (КМ) по деформованій поверхні. Метою проведення експериментальних досліджень є перевірка імітаційної моделі руху КМ згідно з WES-методикою армії США в програмному середовищі MATLAB Simulink, а саме її програмного модуля для визначення максимального тягового зусилля на адекватність. Раніше оцінка цієї моделі на адекватність базувалась на зіставленні результатів уже наявних експериментальних даних щодо колісного трактора Т-150К та результатів відповідного імітаційного моделювання – розрахунку за допомогою опрацьованого вищезгаданого програмного модуля. Експериментальне визначення тягового зусилля відбувалося на базі легкого тактичного автомобіля «Мамай» та мінітрактора Mahindra Feng Shou FS244 з відомими техніко-експлуатаційними показниками. Експеримент проводився відповідно до принципів, закладених у методиці WES армії США – «іде/не», яка є однією з основ, на яких побудована імітаційна модель. Представлена структура даних, необхідна для порівняння результатів експерименту і моделювання, визначено основні показники та їхні джерела для подальшої оцінки адекватності моделі. Представлено вимірвальне обладнання, що було необхідне для проведення експерименту, а саме твердомір ґрунту ЛАН-М PRO для визначення конусного індексу опорної поверхні, що деформується, який був доопрацьований відповідно до методики, динамометра ДПУ-2-2-У2 для визначення тягового зусилля, лазерний безконтактний тахометр UNI-T UT373 для визначення реальної частоти обертання коліс. Підтвердження адекватності цієї моделі дозволить її використання при розробці універсальних тягово-транспортних засобів типу Унімог/Автотрак категорії N1/T1 ще на етапі проектування. Підібрано агрегати силового приводу та визначено її тяговий клас – підібрано технологічне обладнання та причеп. За результатами експерименту встановлено, що ця імітаційна комп'ютерна модель руху КМ адекватна.

**Ключові слова:** колісна машина, повний привід, імітаційна модель, технологічне обладнання, опорна поверхня, максимальне тягове зусилля, транспортна операція, технологічна операція.

### **Khudaverdian H., Sukach O. Assessment of the adequacy of the simulation model of universal towing vehicles**

The article discusses the results of an experimental study aimed at determining the maximum tractive effort that a wheeled vehicle (WV) can exert on a deformable surface. The primary objective is to validate a previously developed simulation model for WV movement, based on the WES methodology of the US Army, using the MATLAB Simulink software environment. Specifically, this involves evaluating the software module designed to compute maximum tractive effort for its adequacy. Previously, the adequacy of this model was assessed by comparing experimental data from the T-150K wheeled tractor with results from the corresponding simulation modeling conducted with the aforementioned software module. The experimental assessment of tractive effort was performed using the light impact vehicle "Mamai" and the Mahindra Feng Shou FS244 minitractor having well-documented technical and operational specifications. The study adhered to the principles of the WES methodology, specifically its "goes/does not" criteria, which is fundamental to the construction of the simulation model. The article details the necessary data structure for comparing experimental and modeling results and specifies the types of data and their sources to facilitate further evaluation of the model's adequacy. It also outlines the measuring equipment used in the experiments, including the modified LAN-M PRO soil penetrometer for assessing the cone index (CI) of the deformable surface, the DPU-2-2-U2 dynamometer for measuring traction force, and the UNI-T UT373 laser non-contact tachometer for determining the actual wheel rotation frequency. Confirming the adequacy of this simulation model will enable its application in the development of universal traction vehicles in the Unimog/Avtotrak category (N1/T1 type) during the design phase. This will assist in selecting power drive units and determining traction class, as well as in choosing appropriate technological equipment and trailers. The results of the experiment indicate that the simulation computer model of the WV movement is, in fact, adequate.

**Keywords:** wheeled vehicle, four-wheel drive, simulation model, technological equipment, support surface, maximum tractive effort, transport operation, technological operation.

**Постановка проблеми.** Універсальні тягово-транспортні колісні машини (КМ) типу Автотрак/Унімог [6] розроблені для виконання як транспортних завдань (перевезення з приче-

пом), так і технологічних операцій (оранка, культивування, косіння тощо). Для забезпечення їх багатofункціональності необхідно передбачити можливість додаткового оснащення відповід-

ним технологічним обладнанням і причепами ще на етапі проєктування.

Ефективне використання таких машин у сільськогосподарських роботах, підвищення продуктивності та зниження експлуатаційних витрат залежать від правильного підбору та агрегуванням додатковим обладнанням. Визначальним параметром для такого вибору є максимальне тягове зусилля, яке здатне реалізувати КМ на певному типі опорної поверхні, тобто її відповідність класу тяги [12].

Розроблена раніше [9; 10] імітаційна комп'ютерна модель руху УКТТЗ, а саме її підсистема для визначення максимального зусилля, що може бути реалізоване на відповідній опорній поверхні [11], дає змогу:

- визначити вільне тягове зусилля, яке може бути реалізоване за умов залишкової потужності двигуна на відповідній опорній поверхні;
- оцінити ефективність методів покращення тягово-зчіпних характеристик;
- визначити клас тяги КМ для оптимального вибору обладнання та причепів.

Для подальшого коректного використання запропонованої моделі під час проєктування та виготовлення КМ необхідно перевірити вказану модель на адекватність для обґрунтування параметрів різних типів і класів машин. Також необхідно визначити ступінь відповідності результатів моделювання та експериментального визначення тягового зусилля та їх розбіжності за умови зміни вхідних параметрів моделювання, таких як компоновальна схема, навантаження на вісь, кінематика приводу, механічні параметри опорної поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Експериментальне дослідження тягових показників КМ у своїх роботах [7; 8] висвітлив Погорілий С. П. Зокрема у статті [7] подано методику проведення експериментальних досліджень, представлено вимірювально-ресруюче обладнання для виконання тягових випробувань, результати тягових випробувань у польових умовах на базі дослідного зразка автомобільного шасі виробництва ПАТ «АвтоКрАЗ», моделі КрАЗ-255Б1. У статті [8] автор навів результати експериментальних досліджень МЕЗ 330 «Автотрактор» з плугом ПНН-5-40.

Оцінку адекватності моделей руху КМ, розроблених у програмному середовищі MATLAB Simulink, висвітлили у своїх роботах Грубель М. Г., Фтемов Ю. О., Хома В. В., Крайник Л. В. [3; 4]. Крім цього, здійснено експериментальну оцінку фізико-механічних характеристик різних ділянок опорної поверхні за

WES-методикою визначення конусного індексу та визначено модуль деформації ґрунту.

**Постановка завдання.** Завдання нашого дослідження – перевірка розробленої імітаційної моделі на адекватність порівнянням отриманих результатів моделювання та експериментального визначення тягового зусилля, що може розвинути КМ на заданій опорній поверхні. Відповідно до структури імітаційної моделі механічна характеристика опорної поверхні є одним із найбільш мінливих її вхідних параметрів. Широкий діапазон значень фізико-механічних характеристик опорної поверхні, що відповідає умовам експлуатації КМ (асфальтована, ґрунтова, піщана, гравійна дороги, а також зміна їхньої вологості чи ступеня ущільнення) може значною мірою впливати на результати моделювання [12]. Визначення тягового зусилля у заданих дорожніх умовах вимагає постійного уточнення фізико-механічних характеристик опорної поверхні. Найбільш оптимальним за швидкістю і вартістю є емпіричний метод комплексної оцінки несучої здатності опорної поверхні, що базується на визначенні конусного індексу СІ [2]. Він передбачає використання портативного пенетрометра, який забезпечує належну точність і швидкість збору даних на значних площах, тому активно використовується інженерним корпусом армії США (WES US Army) [16; 17] безпосередньо в польових умовах чи умовах бездоріжжя.

Формальне підтвердження коректності структури моделі передбачає натурне визначення тягового зусилля, що може реалізувати КМ та порівняння його з результатами, отриманими в процесі моделювання. Іншим завданням дослідження є перевірка стійкості розробленої моделі за умови зміни початкових умов моделювання (параметри силового приводу, зміна кінематичних параметрів, механічні параметри опорної поверхні).

**Виклад основного матеріалу.** Робота КМ у сільськогосподарському виробництві характерна значною різноманітністю експлуатаційних умов. Рациональність і обґрунтованість використання мобільних енергетичних засобів на тих чи інших роботах визначається тяговим зусиллям і тяговим навантаженням. Через неоднорідність фізико-механічних властивостей ґрунту та мікрорельєфу опорної поверхні тягове зусилля та опір руху безупинно варіює й має змінний, часто коливальний характер. За таких умов тягове зусилля є нестационарною випадковою величиною.

Для оцінки тягово-динамічних і економічних властивостей КМ найчастіше застосовують класичні лабораторні методи випробувань із застосуванням гідромеханічних та механічних

тягово- гальмівних стендів. Стендові випробування дозволяють визначити тяговий потенціал машини, однак не враховують змінний характер взаємодії рушіїв з опорною поверхнею, мінливості опору руху додаткового обладнання тощо.

Крім цього, польові випробування дозволяють повніше оцінити тягово-динамічні характеристики машин у визначених виробничих умовах та обґрунтованість застосування результатів моделювання під час подальших проектно-конструкторських робіт. Стандартизовані тягові випробування [3] передбачають визначення тягового зусилля, прикладеного до тягово-зчіпного пристрою. Згідно з процедурою випробувань машину агрегують із динамометричним гальмівним візком, за допомогою якого створюють перемінний опір в усьому можливому діапазоні тягових зусиль. Як гальмівний пристрій часто застосовують трактори,

завдяки чому досягається зміна величини опору, а регулюється вона подачею кількості палива, вибором певної передачі, або ж застосуванням гальмівної системи. Випробування здійснюють до моменту появи нестійкої роботи двигуна чи значного буксування рушіїв.

Відповідно до поставленого завдання досліджень передбачалось отримання експериментальних даних із визначення тягового зусилля та порівняння їх із результатами моделювання. Попередньо, оцінка імітаційної моделі на адекватність базувалася на зіставленні результатів уже наявних експериментальних даних щодо колісного трактора Т-150К [1], отриманих при моделюванні [3].

Імітаційне комп'ютерне моделювання відбувалося за допомогою підсистеми для визначення максимального тягового зусилля, описаної у статті [10], а відповідна структура даних відображена у табл. 1.

**Таблиця 1.** Структура даних для оцінки адекватності експерименту  
**Table 1.** Data structure for assessing the adequacy of the experiment

Параметр	Джерело	Одиниці вимірювання
Конусний індекс (CI) опорної поверхні	Експериментальне визначення, довідкові дані	кПа
Споряджена маса КМ	Дані виробника	кг
Повна маса КМ	Дані виробника	кг
Потужність двигуна КМ	Дані виробника	кВт
Передатні числа трансмісії КМ	Дані виробника	-
Шини, розмірність КМ	Дані виробника	-
Колісна формула	Дані виробника	
Максимальне тягове зусилля що може реалізувати на відповідній ОП	Експериментальне визначення, імітаційне моделювання	кН

Для перевірки моделі на адекватність проведено експериментальне дослідження за принципами, закладеними в імітаційну модель, визначено вхідні й вихідні дані моделювання, а саме підсистеми для визначення максимального тягового зусилля, що може реалізувати КМ на відповідній деформованій поверхні. Експериментальне визначення максимального тягового зусилля проводили із застосуванням трактора Mahindra Feng Shou FS244 [14] із відомими параметрами силового приводу та експлуатаційними характеристиками (заявленими виробником) для подальшої оцінки достовірності даних експерименту. В іншому випадку, виходячи з точки зору розширення вхідних даних для імітаційного моделювання й подальшої оцінки моделі на адекватність, проводили експериментальне та імітаційне (методом комп'ютерного моделювання) визначення максимального тягового зусилля легкого ударного автомобіля «Мамай», який за своїми параметрами найбільш наближений до проекту ВАТ «Укравтобспром» ВТ-041. Характеристики

відповідних КМ, які, згідно з табл. 1, – вхідні дані для моделювання й подані в табл. 2.

Іншим показником, що має визначальний вплив на реалізацію тягового потенціалу машини, є механічна характеристика опорної поверхні. Подальша перевірка розробленої моделі передбачала уточнення даних щодо деформованості та міцності опорної поверхні внаслідок внутрішніх і зовнішніх силових впливів. Таку оцінку проводили за допомогою потративного пенетрометра шляхом визначення конусного індексу (CI). Вказаний індекс є стандартизованим показником оцінки твердості ґрунту (ASAE S313.3) й визначається як сила на одиницю площі, необхідна для проштовхування стандартного конуса через шар досліджуваного ґрунту. Для визначення конусного індексу (CI) використано електронний твердомір ґрунту Лан-М PRO [13] з круглим конусом 30° з площею основи 3,23 см<sup>2</sup> (0,5 дюймів<sup>2</sup>) та модифікованим програмним забезпеченням, що дозволяє виміряти зусилля згідно з методикою WES.

Дослідження проводили на рівній горизонтальній грантовій ділянці (необроблений край поля) розміром 10×50 метрів, кількість точок вимірювання – 100. Згідно з процедурою, визначеною стандартом, цифровий твердомір автоматично розраховує усереднене значення

твердості на фіксованих значеннях глибини ґрунту (1, 2,5; 5, 7,5 10...45 см) та зберігає їх на карту пам'яті microSD. Конус рівномірно вдавлювали у ґрунт зі швидкістю не більше ніж 2 см/с (рис. 1).

Таблиця 2. Характеристики КМ

Table 2. WV characteristics

Параметр	Mahindra Feng Shou FS244	Автомобіль «Мамай»
Споряджена маса, кг	1420	680
Потужність двигуна, кВт	17,64	110
Передатні числа трансмісії	-	1-а передача: 3,78 2-а передача: 2,12 3-я передача: 1,36 4-а передача: 0,97 5-а передача: 0,76 Задня передача: 3,61
Шини, розмірність	Передні 6,00-16 Задні 9,50-24	205/75 R15
Колісна формула	4x4	4x2
Максимальне тягове зусилля що може реалізувати на відповідній ОП, кН	5	-



Рис. 1. Твердомір ґрунту ЛАН-М PRO

Fig. 1. LAN-M PRO soil penetrometer

Згідно з отриманими даними, середній конусний індекс СІ на вказаній ділянці становив 750 кПа, тоді як на утвореній колії після проходження автомобіля «Мамай» – 816 кПа, а трактора Mahindra Feng Shou FS244 – 843 кПа.

Експериментальне визначення максимального тягового зусилля проводили за допомогою динамометра ДПУ-2-2-У2 [5] до моменту пробуксовування коліс більш ніж як 15 % або ж до появи нестабільної роботи двигуна (рис. 2).



Рис. 2. Динамометр ДПУ-2-2

Fig. 2. Dynamometer DPU-2-2

Визначення пробуксовування коліс відбувалося шляхом порівняння величин швидкості руху КМ теоретичної і дійсної частоти обертання ведучих коліс (рис. 3) за допомогою безконтактного лазерного цифрового тахометра UNI-T UT373 [15].



Рис. 3. Тягові випробування на базі автомобіля «Мамай» та трактора Mahindra Feng Shou FS244

Fig. 3. Traction tests based on the Mamai car and the Mahindra Feng Shou FS244 tractor

Дані результатів експерименту та імітаційного комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB Simulink подані у вигляді графіка (рис. 4).

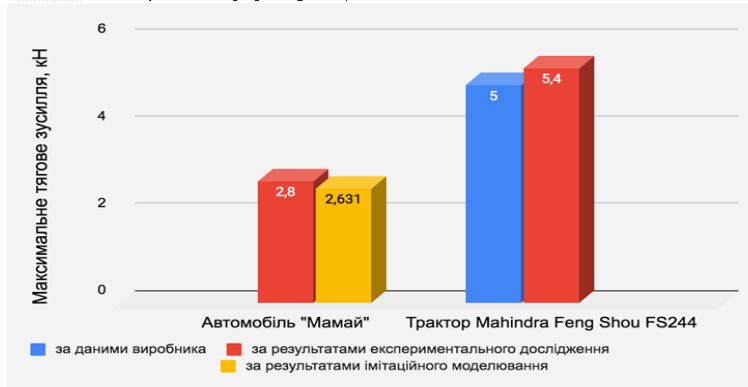


Рис. 4. Графік порівняння отриманих результатів  
Fig 4. Chart of obtained results comparison

У ході проведених експериментальних досліджень підтверджено коректність структури та стійкість розробленої імітаційної моделі за умови зміни початкових умов моделювання, таких як параметри силового приводу, зміна кінематичних показників, механічні характеристики опорної поверхні.

**Висновки.** Дані, отримані в ході досліджень, формують вихідні умови для подальшого обґрунтування параметрів та виготовлення колісних машин. Під час досліджень встановлено:

1) найбільш оптимальним за швидкістю і вартістю є емпіричний метод комплексної оцінки несучої здатності опорної поверхні, що базується на визначенні конусного індексу (CI) за допомогою портативного електронного пенетрометра, який забезпечує належну точність і швидкість збору даних на значних площах.

2) достовірність теоретичних припущень підтверджують результати експериментальних досліджень на прикладі трактора Mahindra Feng Shou FS244, оскільки тягове зусилля відповідає заявленому виробником значенням;

3) запропонована імітаційна комп'ютерна модель руху КМ адекватна, про що свідчать: збіжність результатів експериментальних досліджень та імітаційного моделювання руху в середовищі MATLAB Simulink на прикладі автомобіля «Мамай»; збіжність результатів імітаційного моделювання та вже наявних експериментальних даних на прикладі колісного трактора Т-150К.

#### Бібліографічний список

1. Бугара В. А., Ватуля Н. Н., Вайнштейн Л. А., Коваль І. А., Левітанус А. Д., Огий Г. Є. Довідник по тракторах Т-150 і Т-150К; за ред. професора Б.П. Кашуби. Вид. друге, перероблене і доповнене. Харків: Прапор, 1975. 401 с.

2. Грубель М.Г., Крайник Л. В., Купріненко О. М. Методологія оцінки опорної прохідності колісної військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 4. С. 22–31.

3. Грубель М.Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Науково-виробничий журнал «Автошляховик України»*. Київ, 2020. № 2. С. 21–28.

4. Грубель М.Г., Фтемов Ю. О., Хома В. В. Експериментальні дослідження параметрів опорної прохідності зразків колісної військової автомобільної техніки. *Науково-технічний журнал «Системи озброєння та військова техніка»*. Харків: Харківський НУПС, 2019. № 4 (60). С. 7–15.

5. ДПУ-2-2-В1 2 т (20 кН) динамометр URL: <https://zapadpribor.com/ua/dpu-2-2-v1-2-t-20-kn/> (дата звернення: 06.09.2024).

6. Крайник Л. В., Худавердян Г. А. Концепція та формування вітчизняного універсального автомобіля типу автотрак/унімог для фермерських та комунальних господарств. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: тези доповідей X-ї Міжнар. науково-технічної інтернет-конференції* (м. Вінниця, 14-15 квітня 2022 р.). Вінниця: ВНТУ, 2022. С. 178–180.

7. Погорілий С. П. Результати експериментальних досліджень тягових показників мобільного сільськогосподарського агрегату, сформованого на базі автомобільного шасі. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник* 2017. Вип. 5 (104). С. 263–268.

8. Погорілий С. П. Результати експериментальних досліджень МЕЗ-330 «Автотрактор» з плугом ПНН-5-40. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарського*

рських машин : загальнодержавний міжвідомчий тематичний збірник. 2017. Вип. 47, Част. II. С. 227–231.

9. Худавердян Г. А., Хома В. В. Технологічні процеси обробітку ґрунту: комп'ютерне моделювання. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: матеріали III Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Рівне, 19–20 жовтня 2022 р.). Рівне: НУВГП, 2022. 301 с. Електронне видання. С. 299–301.

10. Худавердян Г. Формування технологічного обладнання тягово-транспортної машини категорії T1/N1 в АПК. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 27. С. 18–21. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.018>.

11. Худавердян Г., Хома В., Крайник Л. Імітаційне моделювання руху полем повнопривідної колісної техніки у програмному середовищі MATLAB Simulink. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 26. С. 164–170. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.164>.

12. Шевчук Р. С., Сукач О. М., Миронюк О. С., Шевчук В. В. Обґрунтування та апробація методики визначення тягово-зчіпних показників автомобілів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. Том 29. С. 179–190.

13. Щільномір для ґрунту ЛАН-М PRO з функцією GPS. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html> (дата звернення: 06.09.2024).

14. Mahindra Feng Shou FS244 URL: <https://am.ua/uk/traktor-mahindra-feng-shou-fs244-new/?srsltid=AfmBOooMMfNLU NQAWOCTKn gYr2Jy2Vu65IZUBPZN5Z8jPDI0n4BJc5G> (дата звернення: 07.09.2024).

15. UT373 Mini Tachometer – UNI-T Meters Test & Measurement Tools and Solutions URL: <https://meters.uni-trend.com/product/ut373/> (дата звернення: 08.09.2024).

16. Wong Y. C. D., Lim H. H. S, Chan W. Q. W. An assessment of land vehicles trafficability. *DSTA HORIZONS*. 2016. P. 54-63. URL: <https://www.dsta.gov.sg/docs/default-source/dstaabout/an-assessment-of-land-vehicles-trafficability.pdf?sfvrsn=2/> (дата звернення: 07.09. 2024).

17. Wong Y. J. *Terramechanics and off-road vehicle engineering*. Second ed. London: Butterworth–Hannemann, 2010. 482 p.

*Стаття надійшла 18.09.2024*



УДК 620.16.63

## МЕТОДИКА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

*Руслан Барабаш, к. т. н., Андрій Шарибура, к. т. н.,  
Володимир Чухрай, к. т. н., Микола Михалюк, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна  
e-mail: [rbarabash@ukr.net](mailto:rbarabash@ukr.net), [ascharibura@gmail.com](mailto:ascharibura@gmail.com), [gazowod@ukr.net](mailto:gazowod@ukr.net),  
[v.chukrai@gmail.com](mailto:v.chukrai@gmail.com), [rysvasyl@gmail.com](mailto:rysvasyl@gmail.com), [levchuklnau@gmail.com](mailto:levchuklnau@gmail.com)*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.233>

### **Барабаш Р., Шарибура А., Чухрай В., Михалюк М. Методика імітаційного моделювання технологічних процесів технічного обслуговування**

Представлена методика дає змогу для врахування таких структурних особливостей ТП ТО, як обмеження на черговість виконання операцій і розміщення робочих зон об'єкта обслуговування.

Процес моделювання створює умови для забезпечення: реалізації важливих теоретичних положень про взаємозалежність різних параметрів ТП ТО (фронту ТО  $f$ , кількості робітників  $u$  і обладнання різних типів  $K_r$ ), а також взаємозалежності різних показників ефективності ТП (тривалості  $T_{T,П}$  коефіцієнтів використання фондів робочого часу робітників  $\eta_u$  і обладнання  $\eta_r$ ); автоматизованого розрахунку параметрів і показників ефективності ТП та техніко-економічних показників; отримання початкових даних для синтезу параметричних рядів виробничих структур різної продуктивності, визначення максимальної та оптимальної продуктивності.

Для імітаційного моделювання ТП ТО автомобілів, тракторів, мобільної техніки та їхніх гідравлічних систем у середовищі *Net Beans IDE* розроблено систему автоматизованого проектування. Вихідними даними для моделювання є кількість: ЕТО та їх зміст, робочих зон, в яких вони проводяться, типів обладнання, норм часу на операції та пріоритету виконання тих чи інших операцій. Необхідно знайти мінімальний час  $T_{T,П}$ , за який можна виконати  $N$  операцій, на які накладено виразу виробничо-технологічну структурність.

Цей алгоритм дає змогу отримати такий розпис операцій, за якого тривалість технологічного циклу є мінімальною за одночасного досягнення максимального можливих значень їх коефіцієнтів використання. Такий розподіл здійснюється з дотриманням таких обмежень: по-перше, в одній робочій зоні одночасно може виконуватися операція лише одним виконавцем і одним типом обладнання, тому операції, які просторово розміщені в одній робочій зоні, у невпорядкованій моделі можуть розташовуватися лише послідовно, але не паралельно; по-друге, розподіл операцій між виконавцями та обладнанням здійснюють без порушення часових та міжопераційних зв'язків; по-третє, потрібно досягнути мінімуму втрат робочого часу виконавців під час переміщень їх навколо об'єкта та в інші робочі зони.

Описаний алгоритм дозволяє виконувати багато випадкових симуляцій побудови розв'язків. Кожен із розв'язків є відмінним, оскільки для вибору операцій, які будуть виконуватися, використовується генератор рівномірного розподілу випадкових величин.

**Ключові слова:** алгоритм, методика, технічне обслуговування, операція, параметр, тривалість.

### **Barabash R., Sharybura A., Chukhray V., Mykhaliuk M. Methodology of the simulation modeling of maintenance technological processes**

The proposed technique takes into account various structural features of TP maintenance, such as restrictions on the sequence of operations and the arrangement of work areas within the service facility.

The modeling process establishes conditions for ensuring: 1. the implementation of key theoretical principles regarding the interdependence of different parameters involved in maintenance operations, including the maintenance front ( $f$ ), the number of workers ( $u$ ), and the equipment types ( $K_r$ ). It also considers the interdependence of various indicators related to maintenance efficiency, such as the duration of the technological process ( $T_{T,P}$ ) and the utilization coefficients for labor ( $\eta_u$ ) and equipment ( $\eta_r$ ); 2. automated calculation of parameters and performance indicators related to maintenance efficiency and technical-economic metrics; 3. the generation of initial data required for synthesizing parametric series of production structures with varying productivity levels, thereby determining maximum and optimal productivity.

An automated design system has been developed within the *NetBeans IDE* environment for simulating the maintenance and repair of cars, tractors, mobile machinery, and their hydraulic systems. The initial data for modeling include the number of maintenance tasks (ETOs) and their characteristics, the work areas where these tasks are conducted, types of equipment, time norms for operations, and the priority of executing specific tasks. The aim is to find the minimum time ( $T_{T,P}$ ) required to complete  $N$  operations, given a distinct production and technological structure. This algorithm facilitates the creation of an operation schedule that minimizes the duration of the technological cycle while maximizing the utilization rates of workers and equipment. This scheduling must adhere to several constraints: first, only one operator and one type of equipment can perform an operation in a given work area at the same time, meaning that operations located within the same work area cannot be executed in parallel; second, the distribution of operations among performers and equipment must maintain the integrity of time and operational

connections; and third, efforts should be made to minimize the loss of workers' time as they move around the site and between work areas.

The described algorithm is capable of conducting numerous random simulations to generate different solutions. Each solution varies because a uniform random variable generator is utilized to select the operations for execution.

**Keywords:** algorithm, technique, maintenance, operation, parameter, duration.

**Постановка проблеми.** Скоротити тривалість ТП ТО об'єкта можна залученням більшої кількості робітників  $u$ , ремонтно-технологічного обладнання  $K_r$  та збільшенням постів  $f$ . Але в цьому разі ускладнюється визначення тривалості ТП ТО  $T_{ТЛ}$  і показників ефективності використання фонду робочого часу виконавців та обладнання. Традиційно вся сукупність робіт, яку потрібно виконати під час ТО об'єкта, розглядалася як єдиний неподільний ТП з відомою трудомісткістю і кількістю обладнання ( $K_r=1$ ) та здебільшого стосувалась одного виконавця. Під час залучення допоміжних виконавців з метою скорочення тривалості ТО загальна нормативна трудомісткість ділилась між ними навпіл. Такий розподіл не враховував неминучих простоїв робітників, які виникали внаслідок часових і просторових обмежень на виконання операцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питаннями імітаційного моделювання та створення алгоритмів для проектування технологічних процесів ремонту, розбирання-складання машин розглядалися в роботах Семковича О. Д., Роговського І. Л., Кузьмінського Р. Д., Флиса І. М. та багато інших вчених. Однак системного наукового підходу до вирішення задач оптимізації виробничої структури технічного обслуговування, імітаційного моделювання та створення алгоритмів для ТП ТО загалом не створено [1; 3; 5; 7-9].

Аналіз теоретичних підходів до розрахунку обсягів робіт, які можуть бути виконані в умовах нестаціонарного потоку вимог та обсягів втрат показують, що методики оптимізації ТП ТО сьогодні не мають достатньої завершеності та придатності до практичного використання.

Множинні методи не дозволяють безпосередньо отримати оцінку максимальної правдоподібності, проте вони дають можливість багаторазово змодельовати стан системи та опрацювати результати відомими методами статистичної оцінки інформації. Достовірність оцінки у цьому випадку визначатиметься якістю вихідних даних, оскільки система може набувати безліч різних варіантів та станів.

Розроблені методи імітаційного моделювання оптимізації ТП, не враховують значну кількість обмежень, що накладаються на ТП ТО, що ускладнює їх використання. Досі вибір оптимального рішення здійснюється шляхом

порівняльної оцінки невеликої кількості варіантів, які можуть бути реалізовані у конкретній виробничій ситуації. Подібні підходи засновані лише на технічному аспекті аналізу можливих варіантів вирішення та не можуть бути застосовані при розрахунку завантаженості стаціонарних постів та втрат.

Враховуючи відносно короткий ретроспективний період протягом якого йде формування ринку послуг технічного сервісу в Україні, доцільно застосувати для розрахунку завантаження постів та втрат евристичний алгоритм моделювання. Перевагою методу є більш простий та зручний метод підготовки вихідних даних, гнучкість розрахунків, що дозволяє використовувати генератор рівномірного розподілу випадкових величин.

**Постановка завдання.** Для визначення залежності параметрів ТП ТО та показників його ефективності (а також інших простоїв, пов'язаних із ТО, у яких можна застосувати бригадний метод організації праці) від кількості залучених виконавців, обладнання та постів – розробити методику, яка ґрунтується на структурному моделюванні процесу на ЕОМ і складається з таких етапів:

1. Визначення максимальної кількості робочих зон для суб'єктів праці з врахуванням антропологічних даних людини, а також конструкторії машини.

2. Визначення переліку технологічних операцій та їхньої тривалості.

3. Формування та занесення в пам'ять ЕОМ первинних даних для моделювання.

4. Моделювання процесів на ЕОМ та аналіз його результатів.

**Виклад основного матеріалу.** Для імітаційного моделювання ТП ТО різних об'єктів у середовищі *Net Beans IDE* розроблено систему автоматизованого проектування.

Вихідними даними для моделювання є кількість: ЕТО та їх зміст; робочих зон, в яких вони проводяться; типів обладнання; норм часу на операції та пріоритету виконання тих чи інших операцій.

Необхідно знайти мінімальний час  $T_{ТЛ}$ , за який можна виконати  $N$  операцій, на які накладено виразну виробничо-технологічну структурність.

Представимо послідовність операцій як множину  $O_{pi} = \{O_{p1}, O_{p2}, \dots, O_{pn}\}$ . Кожна з опе-

рацій  $O_{pi}$  має заданий порядковий номер  $id_i$ , тривалість виконання  $t_i$ , номер робочої зони  $z_i$ , тип інструменту  $e_i$  та множину операцій  $p_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\}$ , які необхідно виконати до моменту виконання поточної операції. Час завершення операції позначимо через  $t_{ei}$ .

Для спрощення логічних перетворень використаємо позначення реєстрів вільних зон навколо об'єкта  $FZ$  (*free zone*) =  $\{fz_1, \dots\}$ , працівників  $FW$  (*free workers*) =  $\{fw_1, \dots\}$ , обладнання  $FE$  (*free equipment's*) =  $\{fe_1, \dots\}$ , переліку операцій, які виконуються  $OPIP$  (*operations in progress*) =  $\{opip_1, \dots\}$ , операцій, які можуть

виконуватися  $ROP$  (*reachable operations*) =  $\{rop_1, \dots\}$  та множину можливих операцій, які можуть бути виконані на наступному етапі  $PM$  (*possible moves*), – це означає, що усі необхідні операції, які необхідно попередньо виконати, вже є завершені. Поточний час системи позначимо через  $T$ . Для розв'язку задачі необхідно запустити симуляцію процесу для  $M$  випадкових розкладів.

Формування розкладу операцій між відомою кількістю виконавців, обладнання та постів здійснюють за алгоритмом структурного моделювання процесів ТО об'єкта (рис. 1).

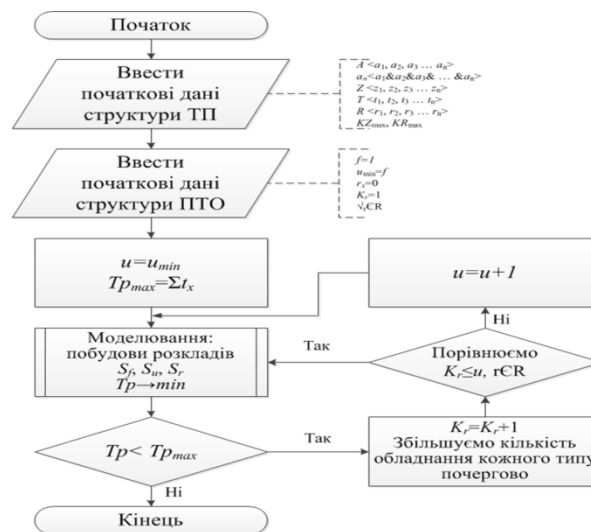


Рис. 1. Алгоритм моделювання технологічних процесів ТО, які виконуються на стаціонарних постах  
 Fig. 1. Algorithm for modeling maintenance technological processes performed at stationary stations

Цей алгоритм дає змогу отримати такий розпис операцій, за якого тривалість технологічного циклу є мінімальною за одночасного досягнення максимально можливих значень їх коефіцієнтів використання. Такий розподіл здійснюється з дотриманням таких обмежень: по-перше, в одній робочій зоні одночасно може виконуватися операція лише одним виконавцем і одним типом обладнання, тому операції, які просторово розміщені в одній робочій зоні, у невпорядкованій моделі можуть розташовуватися лише послідовно, але не паралельно; по-друге, розподіл операцій між виконавцями та обладнанням здійснюють без порушення часових та міжопераційних зв'язків; по-третє, потрібно досягнути мінімуму втрат робочого часу виконавців під час переміщень їх навколо трактора та в інші робочі зони.

Алгоритм роботи системи пошуку рішення для фіксованої кількості робітників, ремонтно-технологічного обладнання та постів

Для розв'язання задачі використовується наступний алгоритм пошуку рішення:

**Крок 1.** Внесення множини даних у систему та їх зчитування. Визначення операцій, які можуть бути виконані невідкладно. Для цього необхідно перевірити усі операції  $O_{pi}$  та вибрати ті, в яких множина операцій становить  $p_i = \{\}$ . У разі виявлення таких операцій додати їх до реєстру операцій, які можуть виконуватися  $ROP$ .

**Крок 2.** Якщо є невиконані чи незакінчені операції, то переходимо до наступного кроку 3, якщо навпаки, то до кроку 6. Для цього перевіряємо, чи  $OPIP \langle \{\} \rangle$  і  $ROP \langle \{\} \rangle$  мають порожні списки.

**Крок 3.** Знайти усі можливі невиконані операції, які можна негайно виконати. Для цього необхідно очистити список  $PM$  від елементів. Після цього необхідно переглянути всі операції зі списку досяжних операцій. Вибірємо поточну операцію  $O_{pi}$ , перевіряємо у відповідних реєстрах ( $FW, FZ, FE$ ), чи є вільні працівники для виконання даної операції  $fw_i$ , необхідна зона  $fz_i$  та обладнання  $fe_i$ . У разі, коли виконується умова наявності вільного робітника, обладнання та зони, додаємо операцію  $O_{pi}$  до списку  $PM$ .

*Крок 4.* Якщо є вільні робітники, обладнання та зони для виконання операції, переходимо до кроку 3, якщо ні, то до кроку 5 (у цьому випадку не відбуватимуться простої робітників, якщо є операції, які можна виконати в поточний момент часу).

Для цього перевіряється, чи є об'єкти в реєстрі вільних робітників  $FW$  і операції в списку  $PM$ . У разі, коли виконуються обидві умови, використаємо генератор рівномірного розподілу випадкових величин для вибору номера операції  $x$ , яка буде надалі виконуватись. Додаємо операцію  $O_{px}$  до списку  $OPIP$  та фіксуємо час початку виконання даної операції. Вилучаємо перший елемент із  $FW$ , знаходимо перше входження  $fz_x$  і  $fe_x$  та вилучаємо їх із реєстрів  $FZ$  та  $FE$ . Фіксуємо час завершення операції  $t_{ei}=T+t_i$ .

*Крок 5.* З масиву операцій, які перебувають у процесі виконання, вибираємо ті, які найшвидше завершаються. Після їх завершення  $\rightarrow$  перехід до кроку 2.

Перевіряємо операції в реєстрі  $OPIP$ , знаходимо  $O_{pi}$  у множині  $OPIP$ , час завершення яких є найшвидший і дорівнює тривалості  $T$ . Завершуємо всі операції з тривалістю  $T$  та вивільнюємо працівників, робочі зони і обладнання. Проводимо вибірку всіх операцій, які є у реєстрі  $OPIP$ , якщо віднаходимо операцію  $O_{pi}$ , яка завершується в часі  $T_{ei}$ , вилучаємо її з цього реєстру. Незадіяних працівників, обладнання та вільні робочі зони вносимо у відповідні реєстри ( $FW$ ,  $FZ$ ,  $FE$ ).

Обираємо всі операції  $O_{pi}$ , над якими не проводилося жодних дій і які відсутні в реєстрах  $OPIP$  та  $PM$ . Для кожної операції  $O_{pi}$  з цього списку перевіряємо умову виконання операцій із множини  $P_i$ , якщо умова виконується, то додаємо її до реєстру  $PM$ .

*Крок 6.* Обчислити загальну тривалість процесу. Знайдений найкращий результат фіксуємо, одержимо значення змінної  $T$ , в якій записано час завершення останньої операції. У разі, коли  $T < T_{min}$ , знайденого нами на поточній ітерації, відбувається переприсвоєння значень  $T_{min}=T$  та збереження послідовності виконання операцій у списку  $O_{pmin}$ .

*Крок 7.* Якщо умова виконання заданої кількості симуляцій процесу відбулася, то переходимо до кроку 8, якщо ні, то до кроку 2 (перезапуск пошуку рішення). Перевіряємо кількість симуляцій процесу, якщо їхня кількість рівна  $M$ , завершуємо пошук, якщо ні, відбувається перезапуск симуляції процесу, поточний час якої знову рівний 0.

*Крок 8.* Вибрати мінімальну тривалість процесу  $T_{min}$  та вивести результати (послідовність виконання операцій), які збережені у  $O_{pmin}$ .

*Алгоритм роботи системи пошуку рішення для різноманітної конфігурації системи*

Для розв'язання задачі використовується такий алгоритм пошуку рішення:

Необхідно згенерувати можливі конфігурації залучення працівників, обладнання та постів для виконання роботи. Для кожного варіанта конфігурації необхідно знайти мінімальний час  $T_{TL}$  реалізації системи пошуку рішень.

З цією метою задається максимальна кількість працівників  $W_{max}$  та різнотипного обладнання  $E_{max}=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ . Можливі варіанти конфігурації системи зберігаються в списку  $S$ . Кожний з елементів множини  $s_i$  містить кількість працівників  $sw_i$ , обладнання  $se_i$ , поле для збереження найкращого часу виконання роботи заданої конфігурації системи  $st_i$  та послідовність виконання операцій  $sop_i$ .

Для розв'язку задачі використовується такий алгоритм пошуку варіантів конфігурації системи та тривалості її виконання:

Крок 1. Зчитати обмеження на пошук, зафіксувати кількість працівників.

На цьому кроці задається кількість  $W_{max}$  та  $E_{max}$  та початкове значення кількості працівників  $W$ .

Крок 2. Згенерувати усі варіанти залучення обладнання для заданої кількості робітників.

Для  $W$  шукають усі можливі варіанти розбиття кількості обладнання  $se_i$  так, щоб жоден  $se_i$  не перевищував  $W$ . До кожного з можливих варіантів  $e_i$ , кількості працівників  $W$  та множини  $S$  додається такий елемент  $se$ , за умови, що  $se=e_i$  та  $sw=W$ .

Крок 3. Вибрати варіант залученого обладнання, запустити систему розв'язку для фіксованої кількості робітників, обладнання і робочих зон. Зберегти результати.

Послідовно вибирається варіант  $S_i$ . Цей варіант  $S_i$  використовується як вхідні дані для системи пошуку розв'язку для фіксованої кількості робітників та обладнання, яка описана вище. Відбувається пошук часу виконання для заданої конфігурації  $S_i$ . Час виконання роботи зберігається в  $st_i$ , а послідовність операцій зберігається в  $sop_i$ .

Крок 4. Якщо вичерпано всі варіанти залучення обладнання, то переходимо до кроку 5, якщо ні, то повертаємося до кроку 3.

Крок 5. Збільшити кількість робітників  $W$ .

Крок 6. Якщо залучено максимальну кількість робітників, то переходимо до кроку 7, якщо ні, то до кроку 2.

У разі, коли  $W > W_{max}$ , необхідно завершити пошук, бо перевищено максимальну кількість робітників та знайдено і обчислено

всі можливі варіанти.

Крок 7. Вивести результати роботи.

Для кожного  $S_i$  з множини  $S$  необхідно вивести час виконання операції  $st_i$ , послідо-

вність виконання операції  $sop_i$ , кількість працівників  $sw_i$  та доступне обладнання  $se_i$ .

Після виконання описаного алгоритму отримуємо всі можливі конфігурації та час виконання роботи для кожного з варіантів.

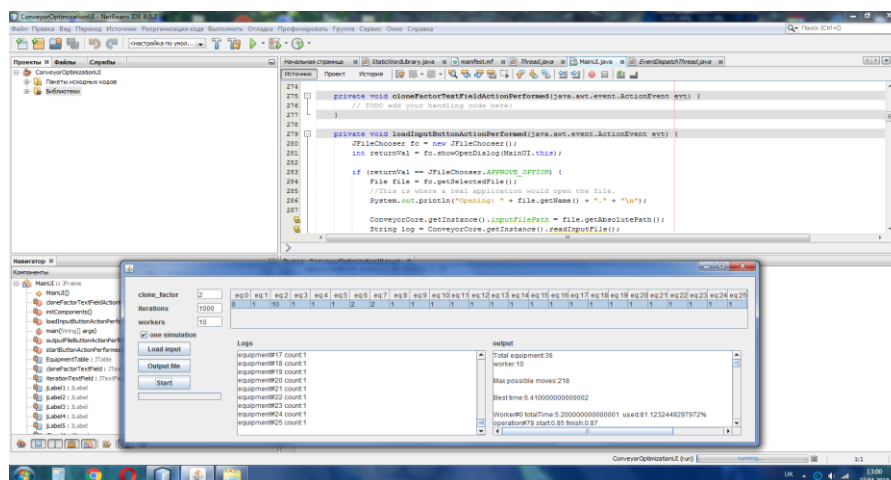


Рис. 2. Інтерфейс системи автоматизованого проектування ТП ТО

Fig. 2. Interface of the system of automated design of TP TO

**Висновки.** Розроблено методику моделювання ТП ТО, які виконуються на стаціонарних постах, алгоритм моделювання технологічних процесів та програмне забезпечення його реалізації на ЕОМ.

Методика дає можливість моделювання ТП ТО, на відміну від процесу ремонту та розбирання-складання, де немає чітко встановленої виробничо-технологічної послідовності виконання операцій. Лише деякі групи операцій мають чітку черговість, це дає змогу під час моделювання при певній кількості робочих зон, робітників та обладнання суттєво скоротити тривалість ТО.

Моделювання ТП ТО передбачає декілька етапів:

- змінна кількість робітників та незмінна кількість обладнання та постів;
- змінна кількість працівників та обладнання та незмінна кількість постів;
- моделювання при змінній кількості робітників, обладнання та постів.

Процес моделювання дав змогу визначити мінімально можливу тривалість ТП різних моделей.

Розроблена методика моделювання ТП ТО, евристичний алгоритм та програмне забезпечення її реалізації на ПК є універсальними та уможливають дослідження будь-яких ТП, що виконуються на стаціонарних постах.

### Бібліографічний список

1. Барабаш О. В., Свинчук О. В., Му-сієнко А. П. Математичне моделювання та оптимізація процесів і систем. Частина 1 : навч.

посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 160 с.

2. Барабаш Р. І. Обґрунтування виробничої структури пунктів технічного обслуговування тракторів ХТЗ : дис...канд. техн. наук. Львів. 2021. 215 с.

3. Біліченко В. В., Кужель В. П. Моделювання технологічних процесів підприємств автомобільного транспорту : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. 163 с.

4. Кузьмінський Р. Д., Соколовський О. Р. Алгоритм проектування технологічних процесів, які виконуються на стаціонарних постах. *Сільськогосподарські машини*: зб. наук. статей. Луцьк, 2011. Вип. 21, т. 1. С. 228–235.

5. Кузьмінський Р., Кордоба В. Алгоритм визначення продуктивності та виробничої структури технологічних дільниць відновлення зношених деталей на етапі проектування. *Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. 2011. № 15. С. 297–308.

6. Математичне моделювання систем і процесів : навч. посіб. / П.М. Павленко та ін. Київ : НАУ, 2017. 392 с.

7. Роговський І. Л. Методологія оцінювання технології технічного обслуговування сільськогосподарських машин *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2012. № 170 (2). С. 368–375.

8. Семкович А. Д., Кузьмінський Р. Д. Моделювання технологічних процесів ремонту машин. Перспективи розвитку механізації, електрифікації, автоматизації та технічного сервісу: тези доп. Міжнародної наук.-техн. конф.

(Глеваха, 1-3 жов. 1996 р.). Глеваха, 1996. С. 15.

9. Семкович А. Д., Кузьмінський Р. Д. Узагальнений алгоритм моделювання ремонтно-технологічних процесів розбирання та складання. *Моделювання процесів та технологічного обладнання у сільському господарстві: матеріали доп. Міжнародної наук.-практ. конф. (17-19 серп. 1994 г.)*. Мелітополь: ТДАТА, 1994. Т. 4. С. 48–51.

10. Семкович О. Д., Кузьмінський Р. Д., Флис І. М. Методика моделювання на ЕОМ технологічного процесу поточного ремонту двигуна. *Підвищення організаційно-технологічного рівня ремонтно-відновних процесів в АПК регіону: зб. наук. праць*. Львів: Львів. с.-г. ін-т, 1990. С. 15–26.

11. Томашевський В. М. Моделювання систем. Київ : Видавнича група ВHV, 2005. 352 с.

12. Чухрай В. С. Чухрай Л. В. Методика впорядкування послідовності виконання операцій складання та розбирання машин. *MOTROL : Motoryzacja i energetyka rolnictwa*. Tom 13. Lublin. 2011. С. 70–80.

13. Attahiru S. Alfa. *Applied Discrete-Time Queues*. Springer New York, NY. 2016. 383 p.

14. Chan W. C. *An elementary introduction to queueing systems*. University of Calgary, Canada. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2014. 103 p.

15. Gautam N. *Analysis of queues: methods and applications*. Boca Raton. CRC Press, 2012. 802 p.

16. Gross D., Shortle J., Thompson J., Harris J. *Fundamentals of Queueing Theory*. Hoboken, New Jersey. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2008. 528 p.

17. Grozev D., Milchev M., Georgiev I. Study the work of specialized car service as queue theory. *International Scientific Journal «Mathematical Modeling»*. 2020. Vol. 4, Issue 1. P. 31–34.

18. Sztrik J. *Basic Queueing Theory*. GlobeEdit, OmniScriptum GmbH, KG, Saarbrucken, Germany. 2016. 246 p.

*Стаття надійшла 23.04.2024*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

**Серія  
Агроінженерні дослідження  
№ 28**

Редактор: С.В. Шафранська  
Коректор: М. Б. Опир  
Технічний редактор: О. Є. Проць

Перелік наукових фахових видань України, категорія «Б» (технічні науки)  
Накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р., № 886 від 02.07.2020 р.  
і № 1166 від 23.12.2022 р.

Наукове видання індексується в наукометричних базах даних:  
Google Scholar; Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського; Crossref

Видавець:  
Львівський національний університет природокористування  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни  
Львівського р-ну Львівської обл., 80381,  
Свідоцтво ДК № 6177 від 11.05.2018 р.

Підписано до друку 30.10.2024. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Папір офс. Гарнітура «Таймс». Друк на різнографі.  
Обл.-вид. арк. 20,49. Ум. друк. арк. 23,33.  
Наклад 500. Зам.137.

Друк Видавництво «Сполом»  
вул. Краківська, 9, м. Львів, 79008  
Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності  
Серія ДК № 2038 від 02.02.2005 р.