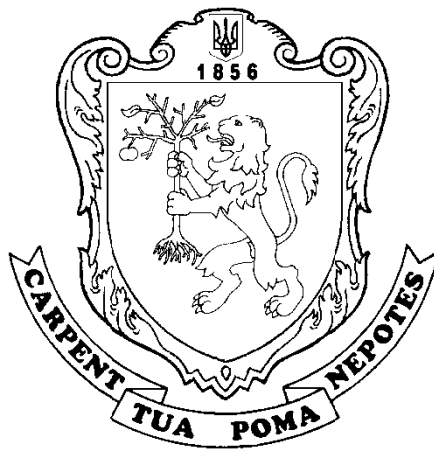


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ВІСНИК
ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Агроінженерія
№ 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 проєктами 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);

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

Бєлосєв 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);

Гнатів 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;

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

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

Левонюк 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 державний університет безпеки життєдіяльності;

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

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

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

Тюрбан 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»;

Швец Олексій, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування.

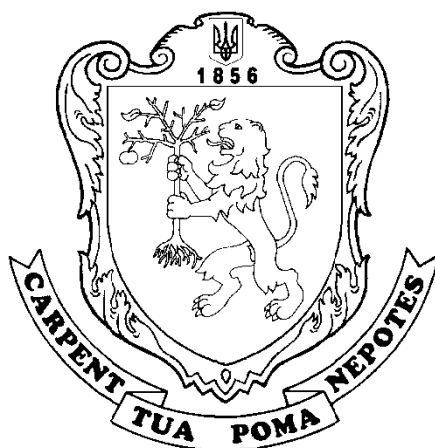
Засновник: Львівський національний університет природокористування

Періодичність видання: 1 раз на рік

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
LVIV NATIONAL ENVIRONMENTAL UNIVERSITY

BULLETIN
OF LVIV NATIONAL
ENVIRONMENTAL UNIVERSITY

Agroengineering
№ 28



Lviv 2024

Bulletin of Lviv National Environmental University. Series «Agroengineering». 2024. № 28. 235 p.

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, Wrocław 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;

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

Prístavka 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;

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

Sukach Oleh, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv State University of Life Safety, 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.

Founder: Lviv National Environmental University

Periodicity of publication: once a year

ЗМІСТ

Розділ 1

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

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

Розділ 2

МАШИНИ ТА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

<i>Швець О., Березовецький С., Коруняк П., Баранович С., Шеремета Р.</i> Вплив режимів MIG-паяння на параметри зварних швів з врахуванням синергетичного ефекту роботи зварювального півавтомата	25
<i>Баранович С., Шеремета Р., Швець О., Коробка С., Сиротюк С.</i> Методичний комплекс для визначення сили різання під час виконання токарних операцій	32
<i>Михалюк М., Шолудько Я., Бабич М., Гуменюк Р.</i> Аналітичне та експериментальне визначення температурних параметрів робочої рідини регульованого об'ємного гідروприводу машин	37
<i>Корчак М., Рудь А., Грушецький С., Замойський С.</i> Обґрунтування впливу котка на процес ущільнення комбінованого способу обробітку поля після збирання кукурудзи	42
<i>Бурнаєв О., Коруняк П., Семерак В., Пономаренко О., Тимочко В., Городецький І., Магац М.</i> Експериментальне дослідження впливу вібраційного навантаження	48

Розділ 3

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

<i>Березовецька О., Шарибура А., Крупич О., Березовецький С.</i> Інноваційні ГІС-технології в сільському господарстві на базі автоматизованої платформи <i>EOSDA CROP MONITORING</i>	57
<i>Кіхтан А.</i> Аналіз існуючих конструкцій та формування схеми гібридного приводу колісної автотехніки високої прохідності	63
<i>Шевчук Р., Сукач О., Миронюк О., Шевчук В., Габріель Ю.</i> Дослідження коефіцієнтів зчеплення та опору коченню автомобільних шин	72
<i>Крайник Т., Ковалишин С.</i> Мобільність та керованість руху автомобіля бездоріжжям: формування нормативної бази	83

Розділ 4

ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

<i>Пташник В., Чумакевич В-р., Пулеко І., Бондаренко Ю., Чумакевич В-ія., Бабич М.</i> Обґрунтування вибору системи керування електроприводом насосного агрегату для водоочистки та водопідготовки на основі комп'ютерного моделювання	90
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Розділ 5

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

<i>Levoniuk V., Muchailovicz T.</i> Analiza procesów nieustalonych w fragmencie sieci elektrycznej ultra wysokiego napięcia, która zawiera dławiki powietrzne	99
<i>Гречин Д., Дробот І., Гошко М., Філіпович В.</i> Дослідження відхилення напруги від номінального значення у системі електропостачання підприємства	105

Розділ 6

НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МАШИН

<i>Колеснікова Т., Лиходій О., Махоркіна Т.</i> Теоретичні дослідження механізму зміни ступеня стиску в безшатунному двигуні внутрішнього згоряння	111
<i>Пономаренко О., Семерак В., Бурнаєв О., Гавриляк О.</i> Розподіл напружень в півплощині з круговим отвором при розтягу під кутом до прямолінійного краю	123
<i>Бубняк Т., Семерак В., Бурнаєв О., Пономаренко О., Шпак Л., Говда О.</i> Напружений стан трансверсально-ізотропного середовища із сфероїдальним включенням за умов неідеального контакту	132
<i>Березовецький С., Березовецька О.</i> Перспективи реорганізації машинобудівних підприємств у великі машинобудівні фірми України	137

<i>Кохан В., Гончарук О.</i> Шляхи інтенсифікації процесу підготовки деталей для відновлення автомобільної техніки	143
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

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	148
<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	154
<i>Мозуль Х., Луб П., Чухрай Л., Штогрин С., Фіялковський В.</i> Методика використання Utm-міток для моніторингу трафіку сайту та веб-аналітики	165
<i>Железняк А., Пташник В., Падюка Р., Смолінський В., Станько В.Ю.</i> Використання інтелектуальних інформаційних систем для управління простежуваністю сільськогосподарської продукції	172
<i>Луб П., Ковалишин О., Чухрай, Л., Станько В., Заплатинський Н.</i> Використання інтелектуалізованих інформаційних технологій для управління ресурсами сільськогосподарських підприємств	179
<i>Тригуба А., Железняк А., Тригуба І., Татомир А.</i> Підхід і модель прогнозування врожайності озимої пшениці на основі машинного навчання	188
<i>Луб П., Смолінський В., Падюка Р., Боярчук О., Станько В.</i> Використання імітаційного моделювання в інформаційних системах підтримки прийняття рішень	198
<i>Ковалишин О., Чухрай Л., Заплатинський Н.</i> Вплив використання генеративного штучного інтелекту на продуктивність розробників програмних продуктів	204

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	210
<i>Сивулька П.</i> Порівняльний аналіз методик агроекологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів в Україні та країнах ЄС	218
<i>Тимочко В., Городецький І., Бурнаєв О., Кохана Т., Мазур І., Войналович В., Вісин О.</i> Оцінка професійного ризику працівників під час обслуговування та ремонту електричного обладнання	227

CONTENT

Chapter 1	
PHYSICAL, MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF SOILS, AGRICULTURAL AND RAW MATERIALS	
<i>Goshko Z., Burtak V., Magats M., Levchyk O., Kohana T.</i> Research physics-mechanics properties of garden-stuffs of walachian nuts	9
<i>Goshko Z., Burtak V., Barabash R., Kohana T., Berezovetska O.</i> Study of the physical and mechanical properties of swallow variety beans	16
Chapter 2	
MACHINES AND OPERATION PROCESSES OF AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION	
<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	25
<i>Baranovych S., Sheremeta R., Shvets O., Korobka S., Syrotiuk S.</i> Methodological complex for determining cutting force during lathe operations	32
<i>Mykhaliuk M., Sholudko Ya., Babych M., Humenuyk R.</i> Analytical and experimental determination of the temperature parameters of the working fluid of the adjustable volumetric hydraulic drive of machines	37
<i>Korchak M., Rud A., Hrushetskyi S., Zamoyskyi S.</i> Justification of the influence of the roller on the process of compaction of the combined method of field cultivation after harvesting corn	42
<i>Burnaev O., Korunyak P., Semerak V., Ponomarenko O., Tymochko V., Horodetskyi I., Magats M.</i> Experimental study of the influence of vibration load	48
Chapter 3	
TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EFFICIENT MACHINE USE IN AGROENGINEERING	
<i>Berezovetska O., Sharybura A., Krupych O., Berezovetskiy S.</i> Innovative GIS-technologies in agriculture based on the automated platform EOSDA CROP MONITORING	57
<i>Kikhtan A.</i> Patent analysis and formation of the hybrid all-terrain drive wheeled vehicles scheme	63
<i>Shevchuk R., Sukach O., Muronyuk O., Shevchuk V., Habriiel Yu.</i> Study of grip and rolling resistance coefficients of automobile tires	72
<i>Kraynyk T., Kovalyshyn S.</i> Mobility and controllability of car movamend off-road: formation of a regulatory framework	83
Chapter 4	
POWER ENGINEERING OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX	
<i>Ptashnyk V., Chumakevych V-r., Puleko I., Bondarenko Yu., Chumakevych V-ia., Babych M.</i> Justification of the Electric Drive Control System for Pump Unit of Water Treatment and Water Conditioning Choice Based on Computer Modeling	90
Chapter 5	
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS IN AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION	
<i>Levoniuk V., Muchailovich T.</i> Analysis of transient processes in a part of the ultra-high voltage electrical network that contains shunt reactors	99
<i>Grechyn D., Drobot I., Hoshko M., Filipovych V.</i> Study of voltage deviation from the nominal value in the electrical supply systems of the enterprise	105
Chapter 6	
RELIABILITY AND TECHNICAL SERVICE OF MACHINES	
<i>Kolesnikova T., Lykhodii O., Makhorkina T.</i> Theoretical research of the variable compression ratio mechanism in the pistonless internal combustion engine	111
<i>Ponomarenko O., Semerak V., Burnaev O., Havryliak O.</i> Distribution of stresses in semi infinite plate with circular hole by the tension under corner to straightforward edge	123
<i>Bubnyak T., Semerak V., Burnaev O., Ponomarenko O., Shpak L., Hovda O.</i> The stress state of a transversely isotropic medium with a spheroidal inclusion under conditions of non-ideal contact	132
<i>Berezovetskiy S., Berezovetska O.</i> Prospects for the reorganization of machine-building enterprises into large machine-building firms of Ukraine	137

<i>Kohan V., Goncharuk O.</i> Ways to intensify the process of preparation of parts for restoration of automotive equipment	143
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Chapter 7

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS. PROJECT MANAGEMENT IN AGROENGINEERING

<i>Fiialkovskiy V., Mozul Kh., Shtrohryn S., Lub P., Chukhrai L.</i> The online learning services usage with artificial intelligence	148
<i>Tryhuba A., Malanchuk O., Tryhuba I., Marmulyak A., Demchyna V., Andrushkiv O., Oliinyk R.</i> The impact of modern information technologies on the processes of initiating and planning community and regional development projects	154
<i>Mozul Kh., Lub P., Chukhrai L., Shtohryn S., Fiialkovskiy V.</i> The method of using Utm tags for site traffic monitoring and web analytics	165
<i>Zhelyeznyak A., Ptashnyk V., Padyuka R., Smolinskyy V., Stanko V.</i> Intelligent information systems for managing the traceability of agricultural products	172
<i>Lub P., Kovalyshyn O., Chukhrai L., Stanko V., Zaplatynskiy N.</i> Utilization of intelligent information technologies for management of resources in agricultural enterprises	179
<i>Tryhuba A., Zhelyeznyak A., Tryhuba I., Tatomyr A.</i> Approach and model for forecasting winter wheat yield based on machine learning	188
<i>Lub P., Smolinskyy V., Padiuka R., Boyarchuk O., Stanko V.</i> Use of simulation modelling in decision support information systems	198
<i>Kovalyshyn O., Chukhrai L., Zaplatynskiy N.</i> The Impact of Using Generative Artificial Intelligence on the Productivity of Software Developers	204

Chapter 9

ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION SAFETY

<i>Myronyuk O., Paslavskij R., Sukach O., Shevchuk V.</i> Assessment of refrigerator vehicles suitability for the transportation of perishable goods	210
<i>Syvulka P.</i> Comparative analysis of methods of agri-ecological assessment of machine-tractor units in Ukraine and EU countries	218
<i>Tymochko V., Horodetskyy I., Kokhana T., Voinalovych V., Visyn O., Burnaev O., Mazur I.</i> Assessment of occupational risk of workers during maintenance and repair of electrical equipment	227

**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 аграрний університет,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: zdenuk@gmail.com, vburtak-78@ukr.net*

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

Дана 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 неможливе 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;
- щільність плодів;
- зусилля різання плодів.

Були проведені дослідження і аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень та побудовані на їх основі експериментальні криві, можна зробити наступні висновки щодо плодів яблук сорту Гала:

- діаметр d $\min=57$ мм, d $\max=80$ мм, d $\text{ср}=63$ мм, $V_{\text{коеф.}} \text{варіац.}=7\%$;
- маса m $\min=95$ г, m $\max=150$ г, m $\text{ср}=115$ г, $V_{\text{коеф.}} \text{варіац.}=6,7\%$;
- об'єм V $\min=100$ см³, V $\max=165$ см³, V $\text{ср}=129$ см³, $V_{\text{коеф.}} \text{варіац.}=4,6\%$;
- щільність $g_{\min}=0,39$ г/см³, $g_{\max}=0,54$ г/см³, $g_{\text{ср}}=0,46$ г/см³, $V_{\text{коеф.}} \text{варіац.}=4,7\%$;
- зусилля різання P $\min=125$, P $\max=210$, P $\text{ср}=163$, $V_{\text{коеф.}} \text{варіац.}=4,3\%$;
- питомий опір різанню q $\min=1,31$ Н/см, q $\max=2,09$ Н/см, q $\text{ср}=1,69$ Н/см, $V_{\text{коеф.}} \text{варіац.}=5,6\%$.

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.

Goshko Z., Burtak V., Magats M., Levchyk O., Kohana T. Research physics-mechanics properties of garden-stuffs of walachian nuts

This article is devoted to the study of the physical and mechanical properties of apple fruits, which should be taken into account in their post-harvest processing, since all fruits are subjected to mechanical action: cleaning, transportation, sorting, storage, processing, etc. Designing and calculating equipment for mechanical operations is impossible without knowledge of the technological properties of the fruit (size and weight, strength, cutting force). The value of the cutting force of fruit is necessary to know in order to establish optimal and rational parameters of the working bodies that provide fruit crushing, as well as in the design of machines and apparatus for the processing industry.

The fulfillment of these tasks involves the development of a program of experimental research, in particular, to determine the physical and mechanical properties of Gala apple fruits, which have proven themselves in Ukraine and are well cultivated in the western regions:

- mass and dimensional indicators;
- The research and analysis of the obtained results of experimental studies and the experimental curves built on their basis, the following conclusions can be drawn about the fruits of apples of the Gala variety:
- diameter d $\min=57$ mm, d $\max=80$ mm, d average=63 mm, $V_{\text{coefficient of variation}}=7\%$;
- weight $m_{\min}=95$ g, $m_{\max}=150$ g, $m_{\text{average}}=115$ g, $V_{\text{coeff. variation}}=6.7\%$;

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

The results obtained 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 %.

Key words: fruits, apples, physical and mechanical properties, dimensional indicators of cutting force.

Постановка проблеми. Фізико-механічні властивості плодів яблук є важливими показниками, які слід враховувати при їх післязбиральному обробітці, адже надалі всі плоди піддаються механічній дії: очищенню, транспортуванню, сортуванню, зберіганню, переробці тощо. Проектування та розрахунок обладнання для здійснення механічних операцій неможливе без знання технологічних властивостей плодів (зусилля перерізання). Значення зусилля руйнування шкірки та м'якоти, 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'якоти плодів дає змогу встановити залежність зусилля їх різання [1-3, 7, 8].

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 солодку або кисло-солодку смакову властивість. У центрі плоду зазвичай розташоване насіння, яке буває білого або коричневого кольору.

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

- **Літні** (Мелба (Лазурне), Білий налив, Донешта, та інші);
- **Осінні** (Антонівка, Апорт, Гала, Жигулівське, Слава переможцям, Безсім'янка нова, Боровинка, та інші);
- **Зимові** (Антонівка звичайна, Аніс новий, Айдарет, Богатир, Голд, Пепін шафранний,

Пам'ять Мічуріна, Спартан, Ренет Симиренко, Кортланд, та інші).

Яблуко, відноситься 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 офіційного ресурсу 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 [1-5, 7, 8].

Яблука містять клітковину, завдяки чому ефективно нормалізують мікрофлору кишківника, що у свою чергу, захищає організм від різних хвороб. Регулярне споживання яблук допомагає знизити ризики діабету завдяки високому вмісту поліфенолів та клітковини у його складі. Вони здатні регулювати рівень цукру в крові. Антиоксидант, що називається кверцетин, який міститься у 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, та займають одні із перших місць. 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 — в листопаді. У сховищі з природним охолодженням плоди зберігаються 2 - 2,5, а у холодильнику – 5 - 6 місяців. Транспортабельність середня. Використовують у свіжому вигляді та достатньо добре піддаються переробці [9, 10].

Постановка завдання. Наше завдання визначення фізико-механічних властивостей плодів яблук сорту Гала, як об'єкту збирання і післязбирального обробітку, з метою подальшого використання отриманих результатів, при проектуванні подрібнювальних машин.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставлених завдань була розроблена програма експериментальних досліджень, яка передбачала визначення наступних фізико-механічних властивостей плодів яблук сорту Гала, що позитивно зарекомендував себе і активно культивуються в Західних областях України:

- розмірні показники (d -діаметр) (рис. 2 а);
- масу (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.

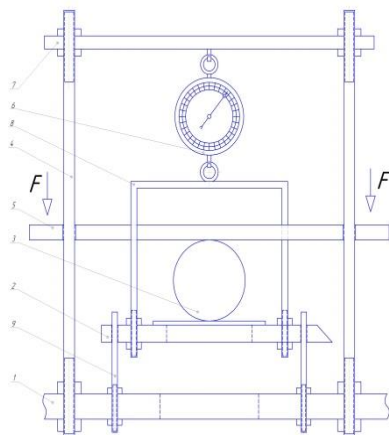


Рис 3. Лабораторна установка для визначення зусилля розрізання (яблука) на пластинки:

- а) загальна схема; б) загальний вигляд д) блоки різальних пластин
Fig. 3. Laboratory setup for determining the force of cutting (apples) into plates
а) general scheme; б) general view е) blocks of cutting inserts

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

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

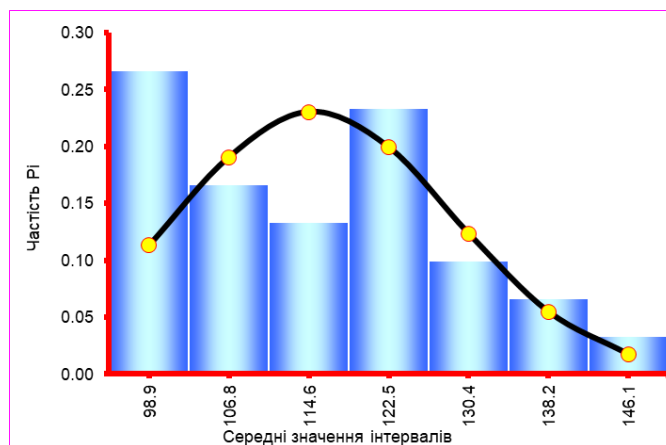


Рис. 4. Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за масою m , г.
Fig. 4. Histogram of the distribution of Gala apple fruits by mass m , g.

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	deltaY	7.9
Математичне сподівання	Ус	115.167
Серед.-квадр. відхилення	sigma	13.599
Коефіцієнт варіації	niu	0.674

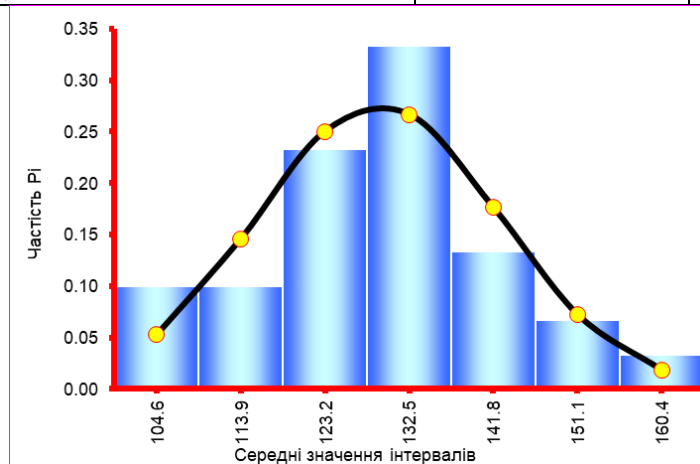


Рис. 5. Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за об'ємом V , cm^3 .
Fig. 5. Histogram of the distribution of Gala apple fruits by volume V , cm^3 .

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	deltaY	9.3
Математичне сподівання	Ус	129.095
Серед.-квадр. Відхилення	sigma	13.453
Коефіцієнт варіації	niu	0.462

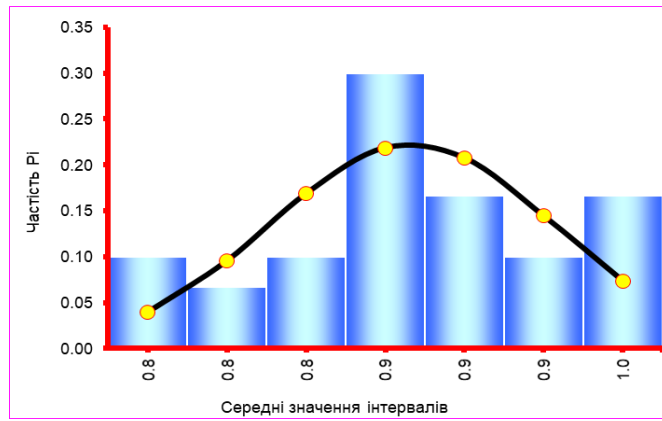


Рис. 6. Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за щільністю $g, g/cm^3$.
Fig. 6. Histogram of the distribution of Gala apple fruits by density $g, g/cm^3$.

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	deltaУ	0.0
Математичне сподівання	Ус	0.886
Серед.-квадр. Відхилення	sigma	0.059
Коефіцієнт варіації	niu	0.468

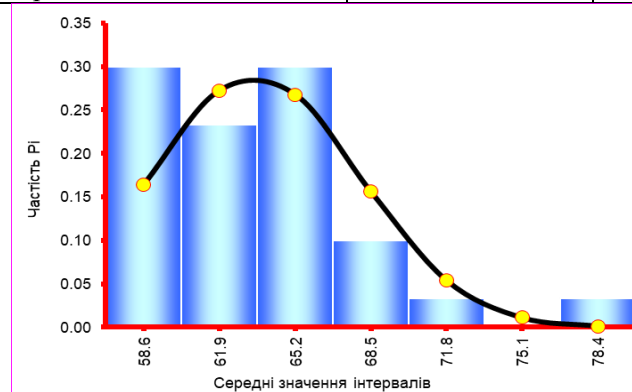


Рис. 7. Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за діаметром плодів, d, mm .
Fig. 7. Histogram of the distribution of Gala apple fruits by fruit diameter, d, mm .

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	deltaУ	3.3
Математичне сподівання	Ус	63.462
Серед.-квадр. Відхилення	sigma	4.548
Коефіцієнт варіації	niu	0.704

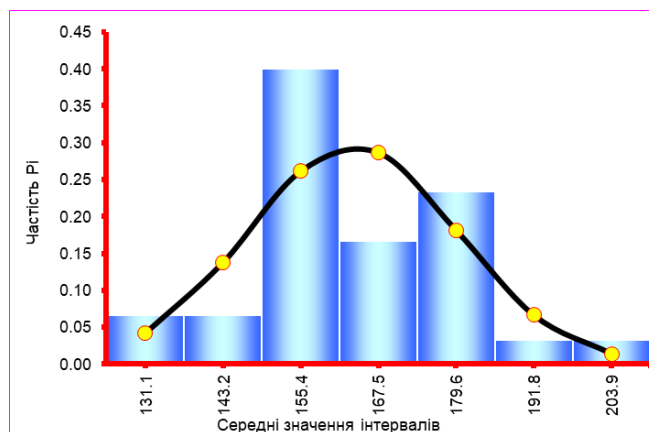


Рис. 8. Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за зусиллям різання, P, H .
Fig. 8. Histogram of the distribution of Gala apple fruits according to cutting effort, R, N .

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

Мінімальне значення	Умін	125
Максимальне значення	Умакс	210
Величина вибірки	N	30
Кількість інтервалів	k	7
Крок інтервалу	deltaY	12.1
Математичне сподівання	Ус	163.452
Серед.-квадр. Відхилення	sigma	16.392
Коефіцієнт варіації	niu	0.426

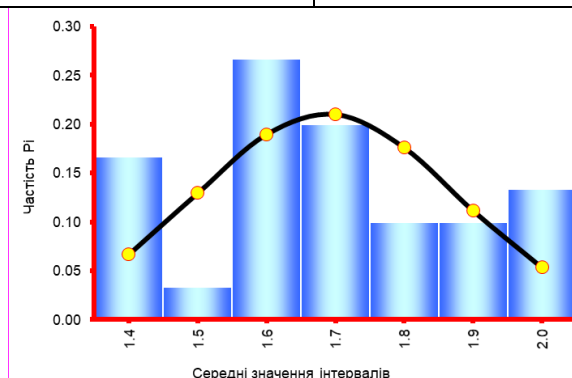


Рис. 9. Гістограма розподілу плодів яблук сорту Гала за питомим навантаженням по довжині леза, $q, N/cm$.

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	Умін	1.31
Максимальне значення	Умакс	2.09
Величина вибірки	N	30
Кількість інтервалів	k	7
Крок інтервалу	deltaY	0.1
Математичне сподівання	Ус	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 наступні 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 $V_{\min}=100$ см³, $V_{\max}=165$ см³, $V_{\text{ср}}=129$ см³, $V_{\text{коэф. варіац.}}=4,6\%$;

- щільність $g_{\min}=0,39$ г/см³, $g_{\max}=0,54$ г/см³, $g_{\text{ср}}=0,46$ г/см³, $V_{\text{коэф. варіац.}}=4,7\%$;

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. Хайліс Г.А., Гошко З.О. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Навчальний посібник.-Луцьк: РВВ ЛДТУ, 1998. 268 с.

2. Царенко О.М., Войтюк Д.Г. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів.- Київ: РВВ «Мета», 2003. 441 с.

3. Бакум М.В., Горбатовський О.М., Манчинський В.Ю., Манчинський Ю.О., Сергеєва А.В. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Практикум. Харків: РВВ ХНТУСГ, 2005. 193 с.

4. Кобець А.С., Іщенко Т.Д., Волик Б.А., Демидов О.А. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Навчальний посібник. Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2009. 84 с.

- зусилля перерізання $P_{\min}=125$, $P_{\max}=210$, $P_{\text{ср}}=163$, $V_{\text{коэф. варіац.}}=4,3\%$;

- 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 %. Отже, в процесі проектування сортувальних та калібрувальних машин суттєвих проблем під час розділення плодів виникати не буде. Досліджуваний сорт добре подрібнюється, формуючи

5. Головченко Г. С., Калнагуз О. М., Сіренко Ю. В. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Конспект лекцій. Суми: РВВ СНАУ, 2012. 59 с.

6. Крунич О.М. Спосіб визначення об'єму тіл неправильної форми / О.М. Крунич, С.І. Левко, Р.О. Крунич / Каталог інноваційних розробок №14, Львів 2014. С.63.

7. Подпряттов Г.І., Рожко В.І., Скалецька Л.Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. Київ: Аграрна освіта, 2014. 393 с.

8. Петак Г.М. Практикум з технології зберігання та переробки плодів і овочів. Ужгород. 1998. 98 с.

9. Кондратенко П.В., Шевчук Л.М., Левчук Л.М. Методика оцінки якості плодово-ягідної продукції. Київ, 2008. 80 с.

10. Min B., Lim J., Ko S. Environmental friendly preparation of pectins from agricultural byproducts and their structural. Bioresource Technology. 2011. Vol. 102. № 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
e-mail: zdenuk@gmail.com*

Гошко З., Буртак В., Барабаш Р., Кохана Т., Березовецька О. Дослідження фізико-механічних властивостей квасолі сорту Ластівка. Дана стаття присвячена дослідженню фізико-механічних властивостей квасолі, які слід враховувати під час збирання і подальшого післязбирального обробітку, адже все зерно піддається механічній дії: обмолоту, очищенню, сортуванню, транспортуванню, зберіганню, переробці тощо. Проектування та розрахунок обладнання для здійснення механічних операцій неможливе 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 була розроблена програма експериментальних досліджень, яка передбачала визначення таких фізико-механічних властивостей квасолі сорту Ластівка, що 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 і кількість зернин у стручку, можна легко розрахувати планову врожайність квасолі.

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

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

Goshko Z., Burtak V., Barabash R., Kohana T., Berezovetska O. Study of the physical and mechanical properties of swallow variety beans. This article is devoted to the study of physical and mechanical properties of beans, which should be taken into account in their post-harvest processing, because in the future, all grains are subjected to mechanical action: cleaning, sorting, transportation, storage, processing, etc. Designing and calculating equipment for mechanical operations is impossible without knowledge of the technological properties of grain components (shells, kernels). It is necessary to know the value of the force of destruction of the shell and the core in order to establish optimal and rational parameters of the working bodies, as well as in the design of machines and devices of the processing industry. To fulfill the tasks, a program of experimental research was developed, which involved the determination of the following physical and mechanical properties of beans of the Lastivka variety, which have proven themselves well in European countries and are well cultivated in the western regions of Ukraine:

- mass and dimensional indicators;
- effort spent on destruction;
- modulus of elasticity.

The obtained results indicate that the range of fluctuations in the size and mass indicators of beans of the Lastivka variety is not significant. Knowing the average number of plants per square meter, the number of pods per plant and the number of grains in a pod, you can easily calculate the planned yield of beans.

The force of seed destruction is quite high and has significant limits of variation, which can negatively affect its processing, cleaning, and transportation. Incorrectly selected modes of operation of the equipment can cause the destruction of part of the seed.

Key words: 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 неможливе 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 стручки квасолі.

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 2 до 6 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 2 до 8 насінин (або від 3 до 7). 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 біля 230 видів, з яких тільки 20 обробляється, інші - дикорослі.

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

Квасоллю продовольчу ділять на типи за формою і кольором:

- квасоллю білу, овальної або подовженої форми,
- квасоллю кольорову однотонну (зелена, жовта, коричнева, червона різних відтінків) круглої або овальної форми,
- квасоллю кольорова строката (світла або темна).

Квасоля за своїми поживними якостями займає одне з перших місць серед овочевих культур. Квасоля дає ранню продукцію, багату білками, цукром, вітамінами. У молодих бобах квасолі міститься від 8 до 15 % сухої речовини, яка на 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 (В1- 0,5 мг, В2- 0,2 мг, В3: 1,2 мг, В6- 0,9 мг, В9- 90,0 мкг), РР, Е, вітамін З; фосфор, сприяючий виведенню з організму радіоактивних і токсичних елементів (541,0 мг); мідь, необхідну 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]

Найбільш популярні 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 «Докучасевська» (білі «бомбочки»), «Грибівська 92», «Ластівка» «Золотиста», «Подільська кущова», «Харківська штамбова», «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'єкту збирання і післязбирального обробітку.

Виклад основного матеріалу. Під час проектування переробних машин, їх 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 наступних 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 використовуємо лабораторну установку (рис. 3 а, б).

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

Лабораторна установка для дослідження зусилля стиску зернового матеріалу, складається з 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

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 мікрометра 4, що контактує з упором 5 й затиснена фіксатором 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 прикріплений установлюваний шток 14, розташований в 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 наступним чином: дослідний зразок поміщається між мікрометром і пластиною, через мікрометр передаємо зусилля на натискну 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.

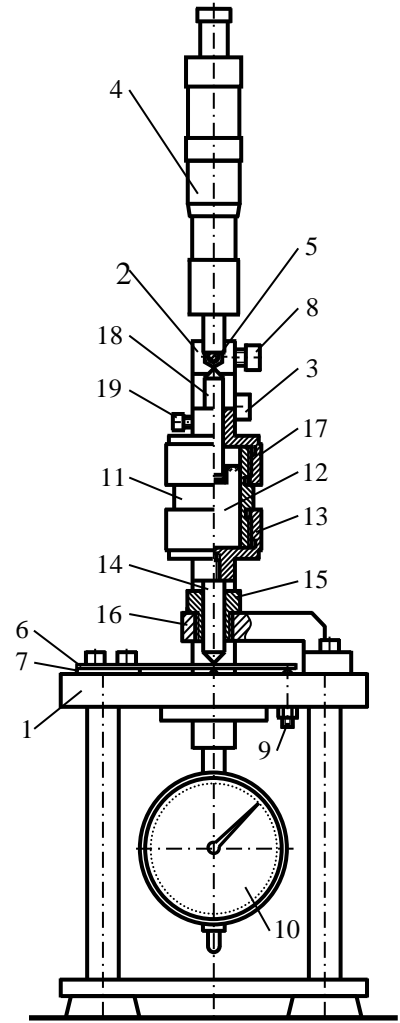
0,01 мм.



1
2
3
6
4
5

- 1.-мікрометр
- 2.-насінина
- 3.-пластина
- 4.-стіл
- 5.-індикатор годинникового типу
- 6.-калібрована пластина

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

В процесі випробувань визначаєм 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 натискної пластини, Н;

k – жорсткість каліброваної пластини, Н/мм;

n – покази індикатора, мм.

Основні механічні характеристики при стисканні можна визначити за наступними формулами:

1. Відносний стиск

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

де Δl – 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, $мм^2$.

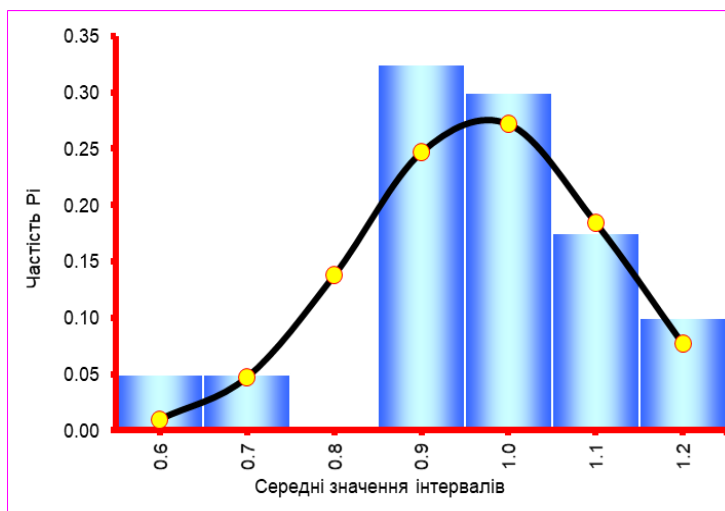
3. Модуль пружності першого роду

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

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 1. Результати статистичних досліджень за масою плодів квасолі сорту Ластівка

Table 1. The 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, $г$	ΔY	0.1
Математичне сподівання	Y_c	0.920
Серед.-квадр. відхилення	σ	0.144
Коефіцієнт варіації	ν	0.156

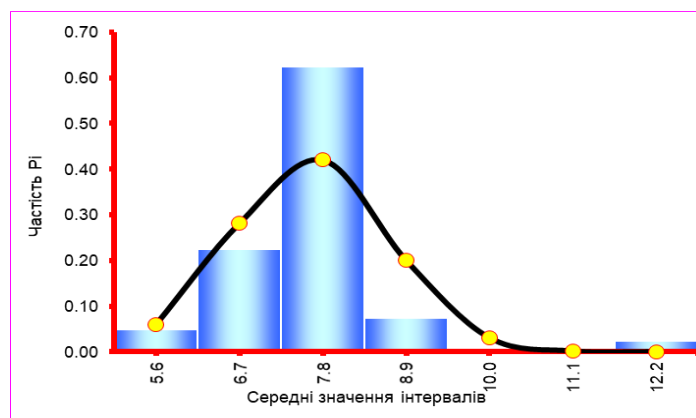


Рис. 5. Гістограма розподілу плодів квасолі за товщиною, h мм.

Fig. 5. Histogram of the distribution of bean fruits by thickness, h mm.

Таблиця 2. Результати статистичних досліджень за товщиною плодів квасолі сорту Ластівка

Table 2. The 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, $мм$	ΔY	1.1
Математичне сподівання	Y_c	7.619
Серед.-квадр. відхилення	σ	1.044
Коефіцієнт варіації	ν	0.137

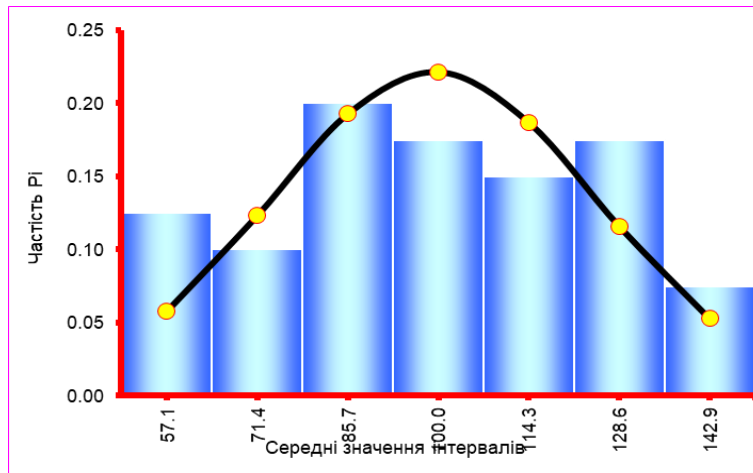


Рис. 6. Гістограма розподілу плодів квасолі за зусиллям руйнування, $P H$.
 Fig. 6. Histogram of the distribution of bean fruits according to the force of destruction, $P H$.

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

Table 3. The 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	ΔY	14.3
Математичне сподівання	Y_c	99.286
Серед.-квадр. відхилення	σ	25.744
Коефіцієнт варіації	n_{iu}	0.259

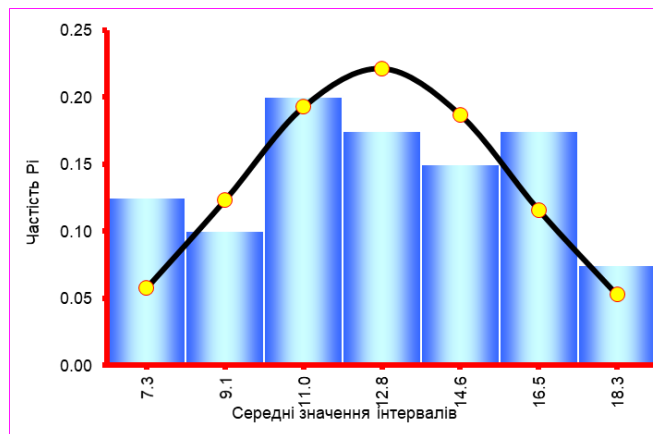


Рис. 7. Гістограма розподілу плодів квасолі за нормальним напруженням, σMPa .
 Fig. 7. Histogram of distribution of bean fruits according to normal stress, σMPa .

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

Table 4. The 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	ΔY	1.8
Математичне сподівання	Y_c	12.709
Серед.-квадр. відхилення	σ	3.295
Коефіцієнт варіації	n_{iu}	0.259

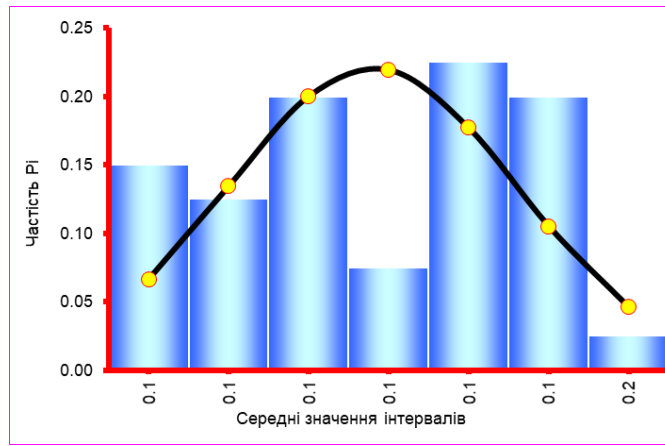


Рис. 8. Гістограма розподілу плодів квасолі за відносним стиском, ε
 Fig. 8. Histogram of the distribution of bean fruits by relative compression, ε

Таблиця 5. Результати статистичних досліджень за відносним стиском плодів квасолі сорту Ластівка
 Table 5. The 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	ΔY	0.0
Математичне сподівання	Y_c	0.105
Серед.-квадр. відхилення	σ	0.032
Коефіцієнт варіації	n_{iu}	0.302

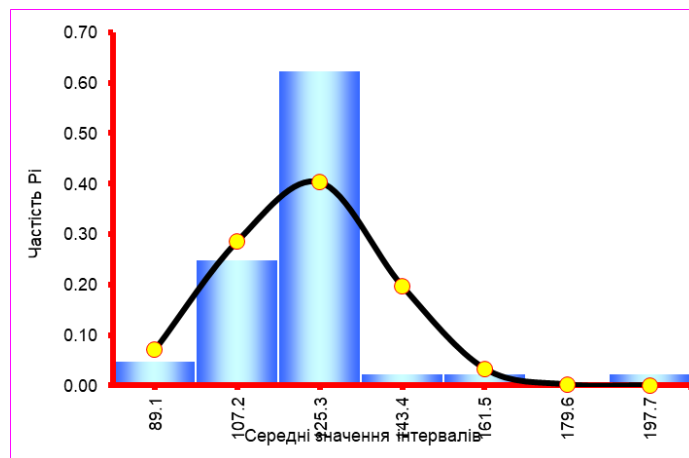


Рис. 7. Гістограма розподілу плодів квасолі за модулем пружності, E МПа.
 Fig. 7. Histogram of the distribution of bean fruits according to the modulus of elasticity, E МПа.

Таблиця 6. Результати статистичних досліджень за модулем пружності плодів квасолі сорту Ластівка
 Table 6. The 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	ΔY	18.1
Математичне сподівання	Y_c	122.083
Серед.-квадр. відхилення	σ	17.589
Коефіцієнт варіації	n_{iu}	0.144

Таблиця 7. Результати досліджень плодів квасолі сорту Ластівка
Table 7. The results of studies of beans of the Lastivka variety

Вид деформації	Площа поперечного перерізу F , $мм^2$	Абсолютне скорочення зразка Δ , $мм$	Нормальне напруження (граничне) σ , $МПа$	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 зробити наступні висновки 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 знаходиться 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.

Зусиллям 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 проектування сортувальних та калібрувальних машин суттєвих проблем під час розділення плодів квасолі виникати не буде, а от в процесі обробітку, дані 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: навчальний посібник 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. Спосіб визначення об'єму тіл неправильної форми / О.М. Крупич, С.І. Левко, Р.О. Крупич / Каталог інноваційних розробок №14, Львів 2014. С.63.

7. Подпряттов 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 сортозразків квасолі звичайної за придатністю до механізованого збирання врожаю // Вісник Полтавської державної аграрної академії. Полтава, 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 сортозразків 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. Кобизєва 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. Кам'янець-Подільський, 2013. Вип. 17. (1) С. 236–239.

15. Оліфірович С. Й. Вивчення сортозразків 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 сортозразків квасолі звичайної за зерною продуктивністю та адаптивністю. *Збірник наукових праць Сільське господарство та лісівництво.* 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. V. 8, № 3. P. 309-314.

Стаття надійшла 05.03.2024

УДК 621.791

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

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

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

В технологічних процесах машинобудування для з'єднання одно- та різномірних матеріалів все 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.

В 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, в залежності 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.

В результаті досліджень сформувані 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 semiautomatic 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 A 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. В технологічних процесах машинобудівних, монтажних та інших виробництв під час виконання зварювальних робіт все частіше застосовують метод паяння в інертних газах за допомогою зварювальних напівавтоматів (MIG-паяння). Дана 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 окислення розплавленого металу і зниження якості зварювання.

До переваг даного способу можна віднести

- Менше розбризкування металу завдяки його подачі у зварювальну ванну без короткого замикання;
- Легша обробка зварного з'єднання завдяки меншій твердості матеріалу дроту;
- Менша деформація деталі завдяки зниженню температури зварювання;
- Зниження ймовірності пропалювання тонких деталей;
- Хороше ущільнення вздовж шва.

Попри всі переваги процесу MIG-паяння та наявності 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 створити необхідні рекомендації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для виконання процесу MIG-паяння листової сталі в якості зварювального електрода використовують спеціальний мідно-кремнієвий дріт (CuSi3), або бронзових дротів (CuAl8 і CuSn6) [2, 16]. Температура плавлення таких дротів ≈ 1060 °С, що значно нижче за температура плавлення сталюго дроту при MIG/MAG зварюванні ≈ 1650 °С. 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 на дуже тонких деталях [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 в роботі [14] обґрунтовано можливість заміни контактного точкового зварювання кузовних деталей закритого перерізу. В роботі [11] встановлено, що якість процесу MIG-паяння залежить від струму, напруги та технологічної швидкості паяння. Робота [12] 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 в роботі [18] встановлено, що нові процеси з'єднання, такі як лазерне зварювання в вакуумі, MIG-пайка 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 роботоздатність таких з'єднань доведена дослідженнями, викладеними в роботі [15]. Її результатами встановлено, що міцність на розрив паяних з'єднань для сталей різного складу майже не відрізняється, а подекуди є вищою ніж у основного матеріалу.

В роботах [4, 5, 21] доведено, що застосування MIG-пайки 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 даного процесу сучасними зварювальними апаратами. Знайдені відомості щодо роботи зварювального обладнання носять загальний характер і не підтвердженні 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 вирі

шення 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].

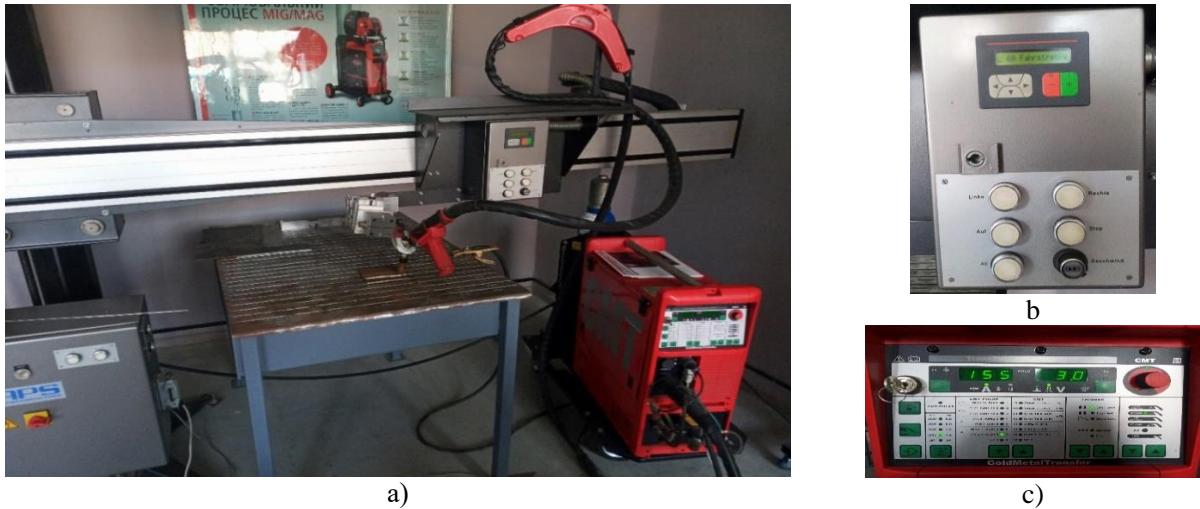


Рис. 1. Установа для автоматичного зварювання

а – загальний вигляд; б – панель керування зварювальної колони; с – панель керування джерела струму

Fig. 1. Automatic welding unit

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

В 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 швидкості зварювання (швидкості 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 з рисунка 3 найкраща якість формування зварного валика була отримана під час зварювання в режимі «Synergic». Дуга горіла стабільно без розбрикування розплавленого металу електродного дроту. При наплавленні валиків в режимах CMT і Pulse Synergic спосте-

рігалось незначне розбрикування розплавленого металу та несплавлення валиків з основним матеріалом. Найгірша якість валиків була при MIG-паянні в режимі Standard. Дуга горіла нестабільно з обривами, метал розбрикувався, 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) базується на використанні мікропроцесорних систем (мікроконтролерів) для вибору та забезпеченню 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 параметрів 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 і кількість імпульсів в ланцюзі змінного струму [1, 3].

Другий етап досліджень полягав у визначенні впливу синергетики на параметри процесу MIG-паяння. В 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 таблиці 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-пайки	Товщина деталі δ , мм	Швидкість зварювання $V_{зв}$, м/хв.	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Швидкості подачі дроту V_d , м/хв	Напруги 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.

В 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 зварних швів з

різними геометричними параметрами (див. 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

В результаті досліджень встановлено, що синергетичний ефект керування працює тільки в межах обраного режиму. При постійній товщині

деталей на різних режимах зварювання необхідно додатково корегувати параметри струму, подачі дроту та швидкості зварювання.

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-пайки	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	

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-пайки	Товщина деталі δ , мм		Струм зварювання $I_{зв}$, А		Швидкості подачі дроту $V_{д}$, м/хв		Напруги зварювання $U_{зв}$, 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	

** в 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 в біляшовній зоні, а також їх геометричними параметрами, то одними з основних характеристик зварного шва, які визначаються його геометричними параметрами є коефіцієнт форми шва $K_f = e/t$ та коефіцієнт опуклості шва $K_o = e/q$ (див. рис. 4).

Шляхом зміни параметрів процесу зварювання (наприклад полярності) можна забезпечити зменшення ширини шва зі збільшенням глибини проплавлення і навпаки. В 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 . В результаті це забезпечує зниження коефіцієнта форми K_f та коефіцієнта опуклості шва K_o . Регулюванням величини зварювального струму змінюють глибину проплавлення основного металу. Вища швидкість зварювання дає меншу ширину шва, що в свою чергу призводить до зменшення коефіцієнта форми та збільшення коефіцієнта опуклості.

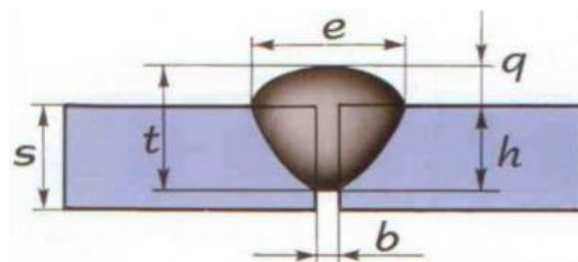


Рис. 4. Геометричні параметри стикового зварного шва
 b – зазор в стику; s – товщина деталі; e – ширина шва;
 t – товщина шва; h – глибина проплавлення q – підсилення шва
Fig. 4. Geometric parameters of the butt weld
 b - joint gap; s - part thickness; e - weld width t - weld thickness;
 h - penetration depth q - weld reinforcement

Як вже було згадано раніше, в процесі MIG-паяння температура плавлення дроту значно менша ніж температура плавлення деталі. Матеріал зварюваних деталей не розплавляється, а роз-

плав електрода лягає зверху не змішуючись з ним. Зразки поперечних перерізів зварних швів сталі, виконаних методом MIG-паяння представлені на рис. 5.

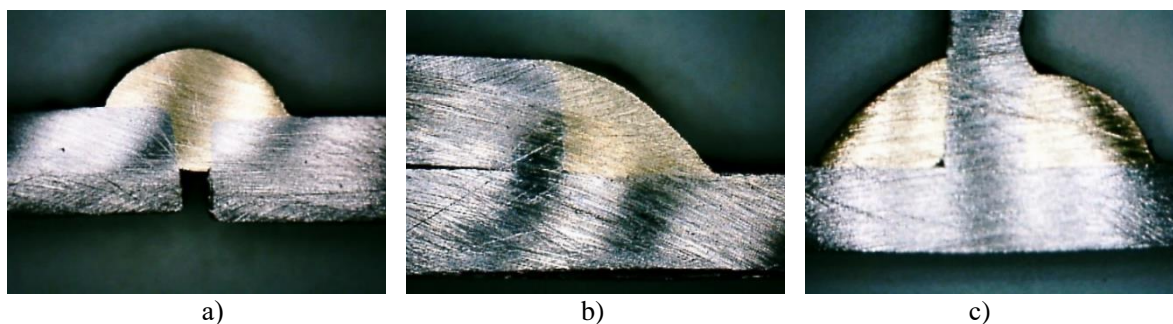


Рис. 5. Поперечні перерізи зварних швів
 а – стиковий; б – напускний; с – тавровий
Fig. 5. Cross sections of welds
 a - butt weld; b - overlap weld; c - tack weld

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 змінюється, а ризик пропалювання тонкого листового матеріалу зменшується. Крім того, при 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 CMT зварюванні валик шва є більш однорідними і рівномірними без слідів розбризкування.

Аналіз розмірів наплавлених валиків (рис. 2, 3), виконаних на різних режимах, показав, що підсилення шва q для режиму CMT суттєво збільшується в порівнянні 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 CMT і Standard швидкість зварювання має бути в 1,5-2 рази вищою, ніж для режимів Pulse Synergic і Synergic при тих же параметрах процесу.

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

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено, що процес MIG-паяння сталі за допомогою зварювального півавтомата апаратом

Fronius TPS 2700 CMT має певні особливості налаштування технологічних параметрів на різних 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 при роботі зварювального півавтомата в режимах Synergic та CMT. 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): [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id>
3. Квасницький В. В. Спеціальні способи зварювання. Навчальний посібник. 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, №6, 2020. С. 35-39. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.06.06>

5. Матвієнків О.М. Збереження захисного покриття при з'єднанні оцинкованих труб дуговим паянням. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукр. наук.-техн. журн. Івано-Франківськ: Факел, 2016, № 4. С. 7-14. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/4149>

6. Матвієнків О. М. Напружено-деформований стан MIG-паяних з'єднань оцинкованих труб. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, (1(54)). І. Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. с. 23-30. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2023-1\(54\)-23-30](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2023-1(54)-23-30)

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

8. 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, Ukraine. 2024. Pp. 341-344. URL: <https://sci-conf.com.ua/>

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

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

11. Berczeli, M., Weltsch, Z. (2018) "Experimental Studies of Different Strength Steels MIG Brazed Joints", Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 46(2), pp. 63-68. <https://doi.org/10.3311/PPtr.11565>

12. Cemil Çetinkaya, Ali Akay, Uğur Arabacı, Uğur Özdemir. Effect of shop-primer

coating on S235JR steel on MAG weldability. Advances in materials science, Vol. 22, No. 2 (72), June 2022. pp. 49-63. DOI: 10.2478/adms-2022-0007

13. Chovet, C., Guiheux, S. (2006) Possibilities offered by MIG and TIG brazing of galvanized ultra-high strength steel for automotive applications. La metallurgia Italiana, 7-8, 47-53.

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

15. Miklós Berczeli, Zoltán Weltsch. Experimental studies of different strength steels MIG brazed joints. Periodica Polytechnica Transportation Engineering. 46(2), pp. 63-68, 2018 <https://doi.org/10.3311/PPtr.11565/>

16. MIG/MAG. Навчальні документи. [Електронний ресурс]: Режим доступу: https://www.fronius.com/~/downloads/Perfect%20Welding/Training%20Documents/PW_TD_MIG_MAG_RU.pdf.

17. Muthuraju K and 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

18. Reisgen U., Stein L. Joining of steel and dissimilar material joints with highest strength - there are other ways than conventional welding. Автоматичне зварювання, №2, 2019. С. 30-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2019.02.04>

19. Seungmin Shin, Sehun Rhee. Porosity characteristics and effect on tensile shear strength of high-strength galvanized steel sheets after the gas metal arc welding proces. Metals 2018, 8, 1077; doi:10.3390/met8121077

20. 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>

21. 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

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

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 визначено шляхом 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 в 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 дане програмне середовище. Вимірювання основної складової сили різання можна визначити 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. Даний метод вимірювання дозволяє проводити дослідження в широкому діапазоні вимірюваних технологічних параметрів механічної обробки металів на токарно-гвинторізних верстатах в 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 lathe operations

The work proposes a methodological complex for determining cutting force during turning operations, as reducing energy consumption during mechanical metal processing is an important technological element for optimal production. Energy consumption can be determined through direct or indirect measurement. To minimize the time spent on measuring cutting force during mechanical processing, as well as other technological parameters, computer measurement and modeling methods can be applied. Such measurement and determination of the necessary technological parameters of mechanical metal processing can be implemented using virtual tools in the LabVIEW software environment produced by National Instruments. This software has several advantages, including: it utilizes a visual programming language; it has a convenient and informative user interface; it allows the use of external input/output devices in real-time; it has powerful data visualization tools, allowing data to be displayed in the form of graphs, diagrams, and tables; it supports various operating systems such as Windows, macOS, Linux, enabling its use on different devices, and so on. Therefore, this software environment is proposed for determining the technological parameters of turning mechanical processing. The measurement of the main component of cutting force can be determined by continuous input data signal from a torque dynamometer DK1 equipped with a hardware-software complex for obtaining digital signal of measured quantities, while other components can be determined by analytical method using LabVIEW software environment. This measurement method allows conducting research across a wide range of measured technological parameters of mechanical metal processing on turning-milling machines in real-time mode, visualizing and analyzing measured parameters on a PC.

Key words: turning-milling machine, cutting force, LabVIEW environment; methodological measurement complex, application software.

Постановка проблеми. Вивчення технологічних параметрів процесу обробки металів різанням в режимі реального часу стикається з проблемою їх отримання і обробки, що вимагає

розробки спеціальних алгоритмів для усунення стохастичного впливу одержуваних сигналів та знижує достовірність отриманих результатів. Використання 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 дозволяє в емпіричній формі представити основні функціональні властивості досліджуваного об'єкта, а також шляхом 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 факторів.

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 даних параметрів для виготовлення деталей.

У працях [2, 7, 9, 10, 12, 13, 15, 16] 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* [1, 11, 14], який може використовуватися також для дослідження технологічних операцій. Також даний 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 ІБ61А з доукомплектуванням деякими необхідними технічними засобами. Схема станда наведена на рис. 1, а, загальний вигляд – на рис. 1, б.

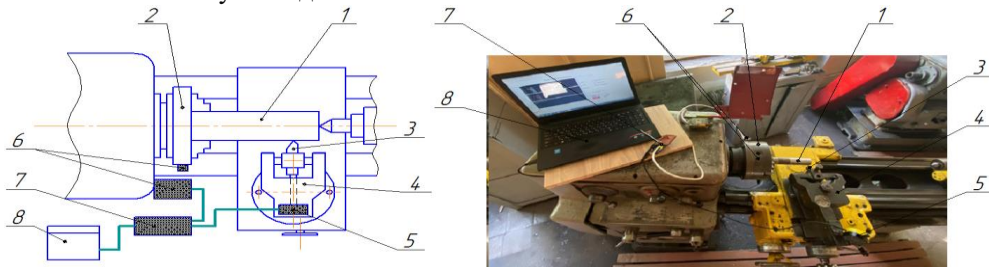


Рис. 1. Стенд для дослідження сили різання на токарно-гвинторізному верстаті: а – схема станда; б – загальний вигляд станда; 1 – заготовка для токарного обробітку; 2 – трьохкулачковий самоцентруючий патрон; 3 – токарний різець; 4 – динамометр кручення ДК1; 5 – індикатор з цифровим відліковим пристроєм; 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: a – diagram of the bench; b – general view of the stand; 1 – workpiece for turning; 2 – three-jaw self-centering carriage; 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 трьохкулачковому самоцентруючому патроні 2, різець токарний 3 встановлено на динамометр кручення ДК1 4, який через систему торсіонів та важелів передає переміщення на вимірюючий штифт в який давач обертів 6.

впирається наконечник індикатора з цифровим відліковим пристроєм 5. Для вимірювання частоти обертання трьохкулачкового самоцентруючого патрона в який встановлено заготовку передбачено.

Індикатор з цифровим відліковим прист-

роєм обладнано засобами для можливості отримання сигналу в електричному вигляді.

Реєстрація сигналів здійснюється з 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 у програмному середовищі *LabVIEW* з широким діапазоном налаштування сигналу. Для вимірювання переміщення проміжного стержня 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 [8]. Передусім ПК має бути оснащений пристроєм вводу/виводу аналогово-цифрової інформації. Підключення вимірювального приладу до ПК може реалізуватися такими пристроями: плата (DAQ-плата) промислового виготовлення, що вставляється в слот ПК або модулі віддаленого вводу/виводу (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).



Рис. 2. Цифровий індикатор MICROTCH ІЧЦ-13.
Fig. 2. Digital Indicator MICROTCH ІЧЦ-13.

Під'єднання до роз'єму micro-USB цифрового індикатора дозволило зчитувати вимірне 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 трьохкулачкового самоцентруючого партону було використано давач KY-033, який є оптичним модулем для виявлення білих або чорних ліній. Основою цього модуля є оптопара TCRT5000, що містить в собі інфрачервоний світлодіод та фототранзистор. Встановивши світлу мітку на шківі та розмістивши датчик KY-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 прототипу-

Для розробки програмного забезпечення зупинились на використанні алгоритмічної мови графічного програмування в середовищі *LabVIEW* [4], 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 вводу-виводу 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 вводів/виводів інформації вимагає значно менших затрат часу порівняно з використанням функцій *DLL*.

Для визначення прогину балки динамометра кручення використано цифровий індикатор MICROTCH ІЧЦ-13 (рис. 2) з діапазоном вимірювання 0-13 мм та дискретністю 0,01 мм [5]. Для виводу даних цифровий індикатор оснащений роз'ємом micro-USB. Цифровий індикатор пройшов метрологічний контроль в акредитованій за ISO 17025 метрологічній лабораторії.

вання з відкритим кодом – Arduino, а саме плату Arduino Mega 2560 на базі 8-бітного AVR мікроконтролера ATmega2560 з тактовою частотою 16 МГц [6]. На платі знаходиться 16 аналогових, а також 54 цифрових входів/виходів (з яких 15 можуть використовуватися як ШІМ-виходи).

Ввід/вивід 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) для відображення миттєвих значень показника індикатора, сили різання та частоти обертання трьохкулачкового самоцентруючого партону [4, 11].

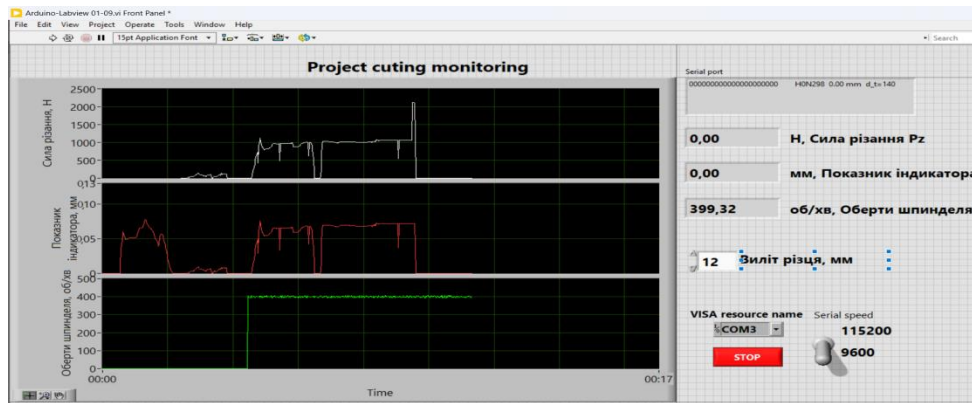


Рис. 3. Робоче вікно експериментального дослідження сили різання з використанням екранного інтерфейсу віртуального осцилографа.

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 трьохкулачкової патрона як

домножуються на перевідні коефіцієнти. Використовуючи дані тарування визначається сила різання, виміряні значення виводяться на робочу панель а також для подальшого аналізу зберігаються в табличному вигляді у форматі Excel.

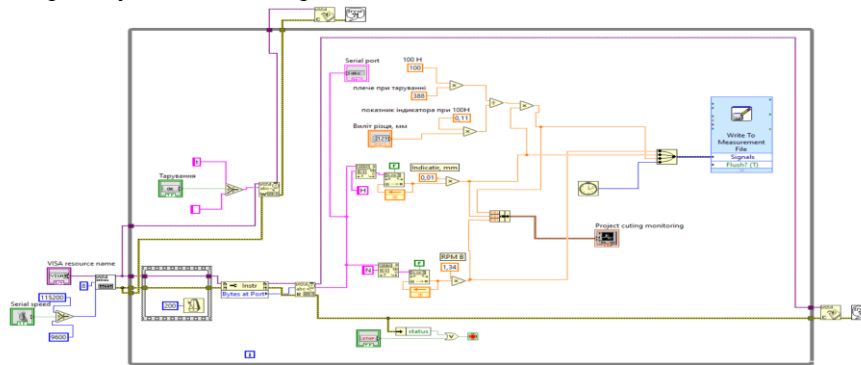


Рис. 4. Фрагмент панелі блок-діаграми функціонального взаємозв'язку між елементами вимірювальної системи.

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 торсійних брусків, то передбачено поле для введення цього значення у робочому вікні програмного комплексу.

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

Висновки.

Розроблений методичний комплекс для визначення сил різання під час виконання токарних операцій в середовищі *LabVIEW* може використовуватись, як інструмент дослідження широкого діапазону технологічних параметрів.

Результати дослідження за допомогою методичного комплексу відображають характер-

ристику технологічного процесу за різних значень змінних впливових чинників у реальному режимі часу.

Даний 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. Боярчук, В., Сиротюк, С., Сиротюк, В., Коробка, С., Пташник, В., Баранович, С., Шеремета, Р. Моделювання фотоелектричної панелі в середовищі *LabVIEW*. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження*. 2023. 26. С 71–76. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26>. 071

2. Майданюк С.В. Плівак О.А. Модуль вимірювання сил різання. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*. 2016. No2 (77). С 15-22.
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. Ronald W. Larsen LabVIEW for Engineers. *Larsen Ronald. Pentice Hall*. 2011. 396 p.
5. Цифровий індикатор МІКРОТЕХ ИЧЦ-13. URL: https://microtech-ua.com/index.php?id_product=11763&controller=product&id_lang=2
6. Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/>
7. Chen W. Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2000. 40. pp. 455-466
8. Kring J., Travis J. LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun 3rd Edition. *Prentice Hall*. 2006. 1032 p.
9. Kushnir E., Portman V.T., Aguilar A., Clark W. Cutting force excursion in turning. *Procedia CIRP*. 2023. Volume 118. pp. 495-500. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.085>
10. 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. pp. 167-179.
11. Chouder A., Silvestre S., Tag-hezouit B., Karatepe E. Monitoring, modelling and simulation of PV systems using LabVIEW. *Solar Energy*. 2013. Vol. 91. P. 337-349.
12. Niruban Projoth T., De Pours Melvin V., Nanthakumar P. Analysis and prediction of cutting force through lathe tool dynamometer in CNC turning process. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Volume 46, Part 9. P. 4174-4179. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.681>.
13. Nur R., Yusof N.M., Sudin I., Nor F.M., Kurniawan D. Determination of Energy Consumption during Turning of Hardened Stainless Steel Using Resultant Cutting Force. *Metals*. 2021. 11(4). 565 p. <https://doi.org/10.3390/met11040565>
14. Yadav Y., Roshan R., Umashankar S., Vijayakumar D., Kothari D. P. Real time simulation of solar photovoltaic module using labview data acquisition card. *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*. 2013. P. 512-523.
15. Sadílek M., Dubský J., Sadílková Z., Poruba Z. Cutting forces during turning with variable depth of cut. *Perspectives in Science*. 2016. 7. P 357-363.
16. Syrotyuk S., Boyarchuk V., Korobka S., Ptashnyk V., Baranovych S., Sheremeta R., Syrotyuk H., Chumakevych V., Giełżecki J., Jakubowski T., Sokołowski P. *Design And Research Of Computer Model Of Wind Turbine Using Labview. Przegląd Elektrotechniczny*. 2024. №4. P. 281-285. <https://doi.org/10.15199/48.2024.04.58>

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

Михалюк М., Шолудько Я., Бабич М., Гуменюк Р. Аналітичне та експериментальне визначення температурних параметрів робочої рідини регульованого об'ємного гідروприводу 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 гідравлічний привід сільськогосподарської техніки, транспортних засобів, дорожньо-будівельної техніки та вантажопідійомного обладнання, що працює у важких умовах їх експлуатації. Перспективні напрямки вдосконалення існуючих та створення нових взірців та 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 відбувається втрата тиску в нагнітальній магістралі від насоса до входу в гідромотор, повинна бути мінімальною. Запропонований метод побудови кривих постійної 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 конструктивного 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., Humenuyk R. Analytical and experimental determination of the temperature parameters of the working fluid of the adjustable volumetric hydraulic drive of 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 theoretically, new pumps with operational wear 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. The methods for increasing the efficiency of a variable displacement hydraulic drive using multiple displacement hydraulic motors have been considered. 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. Не одноразово підтверджено високу ефективність гідравлічного приводу підйомно-транспортних машин та гідростатичних трансмісій приводу ведучих коліс. Під час

визначення показників ефективності роботи гідроприводів необхідно особливу увагу приділити температурним режимам та їх впливу на роботоздатність гідроприводу в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для надання руху механізмам і машинам у

гідроприводах застосовують у якості робочої рідини гідравлічні оливи, які додатково виконують функцію змащення поверхонь елементів систем гідроприводів. Важливою функцією робочої рідини відведення теплоти у навколишнє середовище через систему кондиціонування.[3] В 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 оливи, що 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 оцінка затрат енергоносіїв на одиницю виконаної роботи. Ціль – дослідити вплив температури робочої рідини, що використовується в системах гідравлічного приводу машин на параметри гідропередачі з урахування факторів: в'язкість рідини, витрата рідини, втрати тиску.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження впливу температури робочої рідини на параметри гідропередачі розглянемо схему з послідовно сполучених скадових 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, в залежності від робочих параметрів гідравлічної оливи (температура, в'язкість), та загального об'ємного ККД гідро приводу запропонована математична модель:

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

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:

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

де Q_n , Q_p , $Q_{ГМ}$ – 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; U_{cp} , 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; μ – динамічна в'язкість робочої рідини.

Джерелом енергії є регульований аксіально – поршневий насос. Регулятори зміни робочого об'єму гідромашин бувають слідкуючими, із заданням режиму регулювання оператором, та автоматичними. [4] 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 – в системах дросельного регулювання гідромотора або гідроциліндра. При використанні дросельного регулювання швидкості руху вихідної ланки гідродвигуна спостерігаються підвищення температури робочої рідини внаслідок такого явища, як дросельовання. [4]

Характеристики регуляторів слідкуючого типу приведені на рис. 2 у вигляді залежності подачі насоса Q_n від положення регулювального органу χ ; кута нахилу γ ручки переміщення

приводу слідкуючого золотника (гідромеханічний регулятор типу МН), тиску керування P_y редукційним гідроклапаном на вході в гідроциліндр зміни кута похилого диску (гідравлічний регулятор типу НД), або значення струму I на пропорційних електромагнітах (пропорційний регулятор типу ЕР). Незалежно від конструктивних відмінностей регуляторів їх теоретичні характеристики носять лінійний характер. [3] Загальне допустиме зниження об'ємного ККД гідроприводу визначається можливістю забезпечити своє функціональне призначення, економічною доцільністю використання або забезпеченням безпеки [2, 7]. 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.

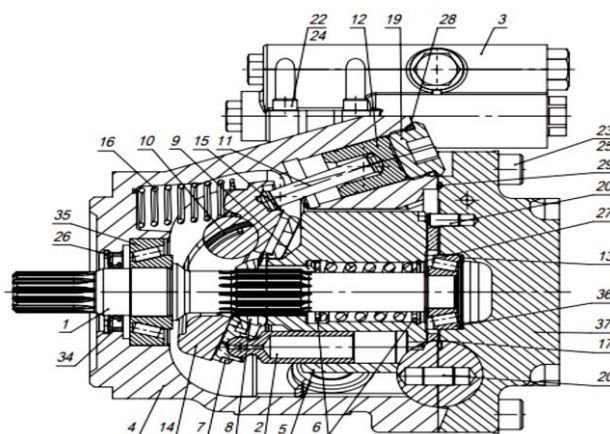


Рис. 1 - Аксиально-поршневий насос серії PVC (PVC1)

Fig. 1 - Axial-piston pump of the PVC series (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 управ-ління; 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; 22,23 – гвинти; 24 і 25 – шайби; 26 і 27 – кільця стопорні; 28...33 – кільця ущільнювальні; 34 – манжета; 35 і 36 – підшипники; 37 – кришка задня.

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 ΔP_{Q_n} - втрати тиску в гідроагрегаті за номінальної витрати й номінальної в'язкості;

ΔP_{Q_i} - втрати тиску в гідроагрегаті при розрахунковій витраті та при розрахунковій в'язкості. При цьому для ламінарного режиму показники тупеня $m = 1, n = 1$, а при турбулентному – $m = 2, n = 0$.

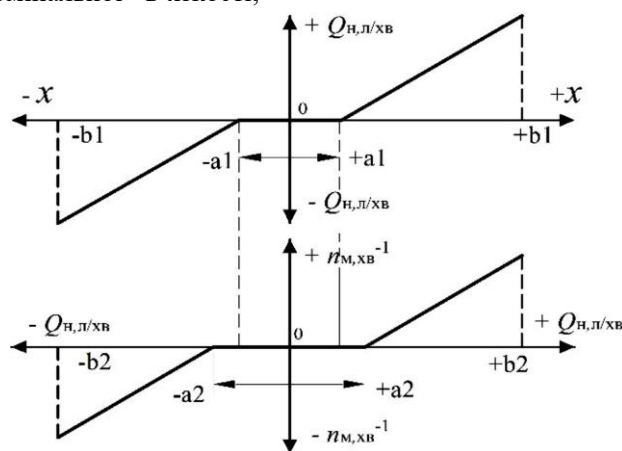


Рис. 2 - Теоретичні характеристики зміни подачі насоса від керувального сигналу регулятора робочого об'єму насоса Q_n та частоти обертання n_m гідромотора від подачі насоса Q_n для об'ємного гідроприводу із замкнутою циркуляцією.

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.

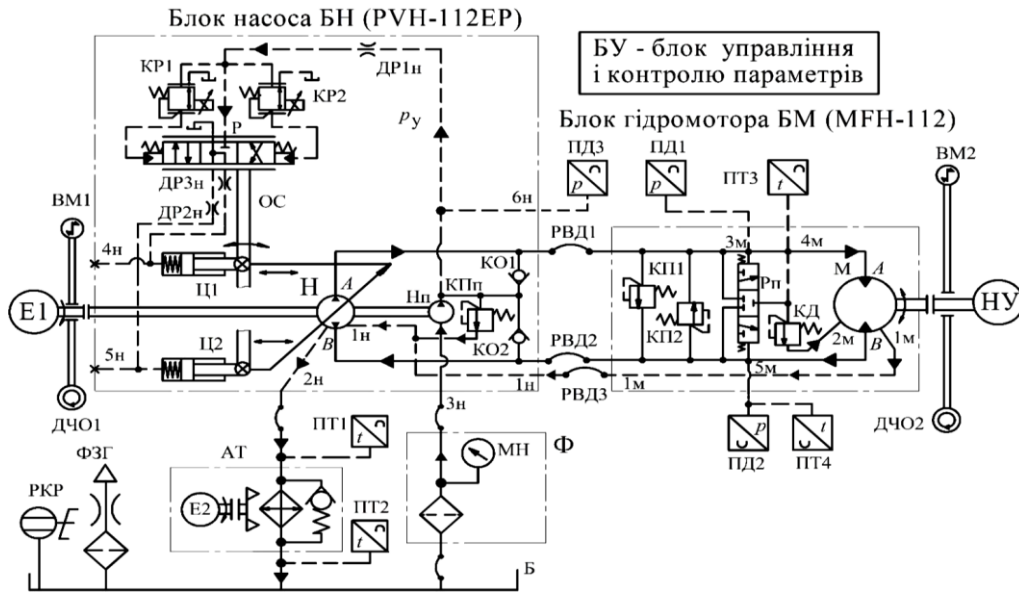


Рис. 3 - Гідрравлічна принципова схема стендового об'ємного гідроприводу, яка складається з аксіально-поршневих гідромашин серії Н (Н2)

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 к.к.д. гідроприводу визначають за співвідношенням

$$\eta = \frac{N_{ed}}{N_n} \quad (5)$$

де N_{ed} – корисна потужність гідродвигуна (гідродвигунів), кВт;

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

Якщо гідродвигуни працюють неодноразово, то необхідно визначити загальний к.к.д. 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 в 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;

α_i – коефіцієнт тепловіддачі i -го елемента, кВт·град/м;

S_i – площа поверхні i -го елемента, м².

Коефіцієнт α_i залежить від конструктивних особливостей елемента та умов обтікання його повітрям. Наближені значення α_i для елементів з гладкими стінками: в разі ускладненої циркуляції повітря – 0,009; вільної циркуляції – 0,015; примусового обдуву – 0,023 [3; 4].

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, м³.

За загальним к.к.д. і питомою металомісткістю оцінюють технічну досконалість розглядуваного гідроприводу.

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

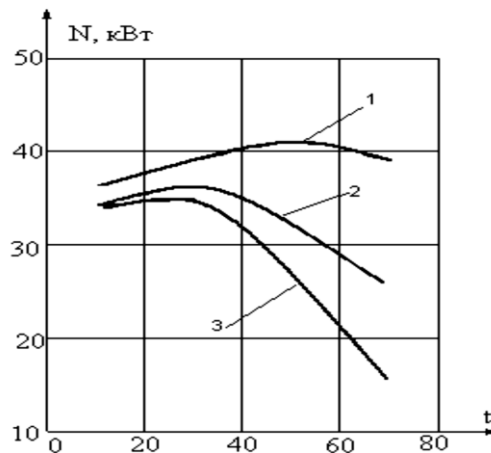


Рис. 4 - Вплив температури робочої рідини на потужність гідродвигуна
 Fig. 4 - The influence of the temperature of the working fluid on the power of the hydraulic motor

Експериментальні дослідження вказують на те, що показник експлуатаційного зносу насоса прямо пропорційний зменшенню його коефіцієнта подачі, що в свою чергу 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 °С (крива 2, рис. 4), а для насосів, що мають $\mu_0 = 0,65$ – 10...20 °С (крива 3, рис. 4).

Висновки. В гідромашинах із регульованим робочим об'ємом застосовані ефективні регулятори з автоматичними та електрогідравлічними пропорційними системами. Проведено аналіз технічного рівня, суттєво підвищеного в останні роки, 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 50 °С, рекомендованої 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: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2013. 273с.
 2. Дідур В. А., Савченко О. Д., Пастушенко С. І., Мовчан С. І. Гідравліка,

сільськогосподарське водопостачання та гідропневмопривод. Запоріжжя : Прем'єр, 2005. 464 с.

3. Гідро- та пневмосистеми в автотракторобудуванні: навчальний посібник. В. Б. Самородов, Г. А. Аврунін, І. Г. Кириченко, А. І. Бондаренко, Є. С. Пелипенко: за ред. В. Б. Самородова.; НТУ «ХПІ», Харків : ФОП Панов А. М., 2020, 524 с.

4. Михалюк М. А., Барабаш Р. І. Наліз залежностей параметрів та показників ефективності технологічного процесу ТО-2 та ТО3 тракторів ХТЗ-1613. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. с. 264-271 DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-23.

5. Михалюк М.А. Боярчук В.М. Шолудько Я.В. Гідроприводи: навчальний посібник. ЛЬВІВ. ЛНУП, 2024. 175с.

6. Лур'є Я., Самородов В. Б., Аврунін Г.А., Цента Є.Н. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. 2019. № 2. с. 68–76.

7. Hydraulic Motor/Pump Series F11/F12 Fixed Displacement. PARKER HYDRAULICS; HY17-8249/UK, October, 2000, 31p.

8. 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 1219-12:2006 (E/F), 88 p.

Стаття надійшла: 12.06.2024.

УДК 631.312.024.001.63

ОБҐРУНТУВАННЯ 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*

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 ефективне 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., Zamoyskyi 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 a field littered with plant residues of corn, the following processes are carried out in sequence: cutting long and coarse plant residues; row distribution; consolidation; crushing of compacted plant-earth mass; leveling of the treated soil surface. Each process contributes to a better flow of the next one.

In the case of the proposed combined method of field cultivation, after harvesting corn, the rollers carry out one of the most important technological processes – compaction of cut and rolled stalks along the cultivation lanes, while ensuring a more efficient flow of subsequent processes of the proposed method.

Theoretical studies of the influence of the roller on the process of compaction of cut and rolled corn plant residues along the cultivation strips were carried out, in particular, its main technological parameters were substantiated. The study of the influence of the roller on the process of compaction of plant residues provides an opportunity to substantiate it scientifically.

The main technological parameters of the roller are substantiated, taking into account previously obtained experimental data on the nature of the field clogging with plant residues of corn: diameter of the roller $D_k = 0,20 \dots 0,24$ m, width of the roller $B_k = 0,20 \dots 0,25$ m.

A theoretically justified roller is implemented in the development of a combined shredder of plant residues of corn. Further development of research on the justification of compaction of stem residues and rollers, used in combined tillage units for soil cultivation after harvesting corn, was obtained.

Key words: 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 поля, подрібнення і загортання рослинних залишків по

всьому фронту ширини захвату за один прохід агрегату; ефективне 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 перерізання 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 прикорневими залишками подрібнюються ножами фрезерних секцій і перемішуються з ґрунтом. Для перерізання 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 вищеописаних процесів відбувається процес подрібнення фрезерними барабанами, що працюють в зонах подрібнення. Ґрунт і рослинні залишки, що відкидаються ножами, за допомогою вирівнювальних щітків 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 запропонованого 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, Kvernelend, 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]. Все це зменшує можливості їх використання в енергоощадних комбінованих ґрунтообробних машинах.

На даний час котки використовуються в різних комбінованих ґрунтообробних машинах [2; 12-17]. Однак, у публікаціях вітчизняних вчених недостатньо обґрунтовано розміри котків в залежності від умов і режимів роботи. Залишається не дослідженою 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. Метою статті є: 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. 1).

Від дії сили N на стебла виникають сили тертя F_2 (рис. 1) між ободом котка і стеблами, які направлені в сторону, зворотно напрямку руху котка. Защемлення стебел між котком і поверхнею поля проходить у тому випадку, коли

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

$$\text{але} \quad N' = N \cdot \sin \alpha. \quad (2)$$

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

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

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 при умові:

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

де α – кут між горизонталлю і дотичною до кола котка, проведений в точці дотику його із стеблами [18].

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

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

Відповідно

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

Знаючи кути тертя φ_1 і φ_2 та діаметр котка D_{κ} , 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_{κ} – 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 наступній умові:

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

де $h_{\text{заг.ст}}$ – загальна висота згорнених стебел;

φ_1, φ_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 1 см ширини котка, Н/см.

Мінімальне значення діаметра котка може бути визначене по умові недопущення намотування стебел на коток із співвідношення:

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

де D_{κ} – діаметр барабана котка, см;

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

Ширина котка рівна:

$$B_{\kappa} = B_{\text{фр}} = d_{\kappa}, \quad (14)$$

де $B_{\text{фр}}$ – ширина фрези, см;

d_k – діаметр кореневища (одержані дослідні дані), см.

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

Тяговий опір котка:

$$P_k = 0,86 \cdot k \cdot \sqrt[3]{\frac{G^4}{g_0 \cdot B_k \cdot D_k}}, \quad (15)$$

де G – сила тиску котка на рослинні залишки та ґрунт;

g_0 – 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].

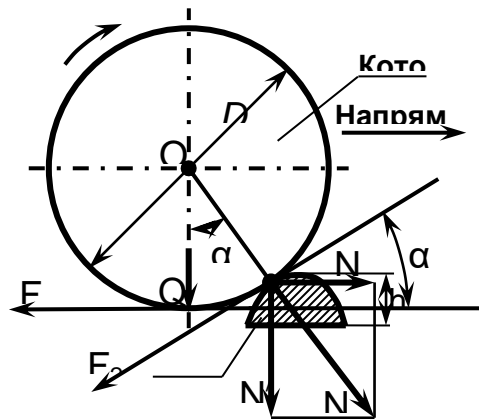


Рис. 1. Схема дії котка на згорнені стебла: h – висота валка згорнених стебел; D – діаметр котка; α – кут між горизонталлю і дотичною до кола котка, проведений в точці дотику його із стеблами; N – сила, нормальна до поверхні котка в точці дотику із стеблами.

Fig. 1. Scheme of action of a rolling pin on rolled stems: h – height of the swath of rolled stems; D – diameter of the roller; α – 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.

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

2. Обґрунтовано 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 produkcji), 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 / І.А. Шевченко. Київ, 2002. 36 с.

9. Залужний В.І. Особливості компоновання і використання ґрунтообробних комбінованих агрегатів з пасивними робочими органами / В.І. Залужний, М.І. Грицишин // *Машиновипробування на службі прогресу машинобудування і сільськогоспо дарського виробництва: зб . наук. праць. Дослідницьке: УкрНДПВТ. 1997. С. 87–92.*
10. Войтюк Д.Г., Дубровін В.О., Іщенко Т.Д. та ін. *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. та ін. *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. 248с.
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. 48с.
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 X. Київ: НАУ, 2001. С. 131-138.*
18. Заяц О.М. *Сівозміни: теоретичні основи, проектування та освоєння.* Харків, 1999. 90с.
19. Корчак М.М. *Дослідження характеру засміченості поля листостебельними та кореневими залишками після збирання кукурудзи / М.М. Корчак, С.В. Єрмаков // 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. – № u 2022 03673; заявл. 03.10.2022; опубл. 05.04.2023, Бюл. № 14.*
- <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=284698>
21. Пат. № 154183, Україна, МПК (2006.01) А01В 49/02. *Комбінований подрібнювач рослинних залишків грубостеблових культур з регулюванням вирівнювальних робочих органів / Корчак М.М. – № u 2023 01645. заявл. 12.04.2023; опубл. 18.10.2023, Бюл. № 42.*
- <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=286622>
22. Корчак М.М. *Обґрунтування параметрів дискового робочого органу для розрізання стебел кукурудзи / М.М. Корчак // 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. (ISBN – 979-8-88796-818-6, DOI – 10.46299/ISG.2022.1.34).*
23. Корчак М.М. *Розробка комбінованого способу та подрібнювача для ґрунту, засміченого рослинними залишками / М.М. Корчак // Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. Львівський національний агроуніверситет, 2009. №13, т. 1. С. 155–163.*
24. M. Korchak, S. Yermakov, V. Maisus, S. Oleksiyko, V. Pukas, I. Zavadskaya. *Problems of field contamination when growing energy corn as monoculture. E3S Web of Conferences. Krynica, Poland. 6th International Conference – Renewable Energy Sources. Volume 154 (2020). (ISSN: 2267-1242).*
- <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015401009>.
25. V. Sheichenko, I. Marynchenko, I. Dudnikov, M. Korchak. *Development of technology for the hemp stalks preparation. Independent Journal of Management and Production. State agrarian and engineering university in Podilia. V. 10, № 7. p. 687 –701 (2019). (ISSN: 2236-269X).*
26. Mykola Korchak, Serhii Yermakov, Taras Hutsol, Lesya Burko, Weronika Tulej. *Features of weediness of the field by root residues of corn // Environment. Technology. Resources. Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference. Rezekne, Latvia, Volume 1, P. 122 – 126 (2021). 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, Volume 2, № 6 (116), P. 13 – 18 (2022).*
- DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253655>
28. M. Korchak. *Use and quality assessment of test technologies in the educational process. International Science Journal of Education & Linguistics. National Centre for Poland, Poland. Volume 1, № 3. p. 57-63 (2022). (ISSN: 2720-684X).*

<https://isg-journal.com/isjel/article/view/37>.

DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20220103.5>

29. M. Korchak. Substantiation of agrotechnical requirements for soil preparation for sowing grain crops. International Science Journal of Engineering & Agriculture. National Centre for Poland, Poland. Volume 1, № 3. p. 52-61 (2022). (ISSN: 2720-6319).

<https://isg-journal.com/isjea/article/view/15>.

DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20220103.5>

30. M. Korchak. 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. Volume 1, № 4. p. 92-101 (2022). (ISSN: 2720-6319).

<https://isg-journal.com/isjea/article/view/105>

DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220104.08>

31. M. Korchak. 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. Volume 1, № 4. p. 38-45 (2022). (ISSN: 2720-684X).

<https://isg-journal.com/isjel/article/view/107>

DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjel.20220104.07>

32. M. Korchak. Justification of the constituent factors of production safety. International Science Journal of Management, Economics & Finance. National Centre for Poland, Poland. Volume 1, № 4. p. 9-16 (2022). (ISSN: 2720-6394).

<https://isg-journal.com/isjmef/article/view/116>

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. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Volume 5, № 6 (119), P. 16 – 25 (2022). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265087>

Стаття надійшла 12.04.2024

УДК 539.5

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, semerakvictor@gmail.com*

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. Завданням роботи є дослідити легкий, дешевий, але потужний і продуктивний віброущільнювач для впровадження силосування в селянських господарствах сімейного типу. Досліди 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.

Проаналізувавши в цілому результати експериментів, можна констатувати:

- обрано оптимальні параметри компактного вібратора для малих сховищ.
- 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.
- найбільш інтенсивно ущільнюється силосна маса протягом перших 10...30 секунд. Таку тривалість можна прийняти як основну для трамбування на одному місці робочими органами ударного типу;
- в 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 м² площі башмака штовхача, досягнута щільність проби 377 кг/м³. Такої щільності можна досягнути, ущільнюючи пробу зеленої маси статичним тиском, що створюється вантажем 1200 кг на 1 м² протягом 72 годин.

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

Burnaev O., Korunyak P., Semerak V., Ponomarenko O., Tymochko V., Horodetskyi I., Magats M.
Experimental study of the influence of vibration load. Experiments were conducted to analyze the optimal characteristics of the device for tamping hay and silage with vibro-impact type compactors in the conditions of a peasant family farm to check and clarify the prerequisites for determining the required duration of silage mass compaction under different conditions and different modes of operation. When loading the chopped plant mass into the silo or hay, it is necessary to constantly ram it. It causes compaction and ventilation of the crushed mass, the access of fresh air, it does not allow the mass to heat up to an excessive temperature, with the growth of which the speed of biochemical reactions increases sharply. This leads to the deterioration of the quality of the feed and the loss of nutrients. Excessive heating of the silage mass when filling the storages is prevented by intensive tamping. The task of the work is to investigate a light, cheap, but powerful and productive vibratory compactor for the introduction of silage in family farms. Experiments were carried out during the preparation of hay from grain and fodder crops. The obtained results can be used to characterize the process of tamping silage from traditional crops - cereals, legumes and their mixtures.

Having analyzed the results of the experiments as a whole, it is possible to constant:

- the optimal parameters of a compact vibrator for small storages are selected.
- by compacting the silage mass with a working body of the vibration-impact type with the parameters adopted for production conditions, it is possible to quickly achieve the residual density of the silage mass, which is equal to the average density of the silage mass in the tower storages during the storage process.
- the silage mass is most intensively compacted during the first 10...30 seconds. This duration can be taken as the main one for tamping in one place with working bodies of the impact type;
- in the process of tamping silage mass from cereal grasses with a crank radius of 0.03 m, a pusher stroke frequency of 8 Hz, a tamping duration of 10 seconds and a weight of the mechanism equivalent to 80 kg per 1 m² of the pusher shoe area, a sample density of 377 kg/m³ was achieved. This density can be achieved by compacting a sample of green mass with static pressure created by a load of 1200 kg per 1 m² for 72 hours.

Key words: vibration impact load, silage and silage 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 даному дослідженні прийнято два технологічних процеси заготівлі силосу – традиційний [4,8,9,10,11] 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 є альтернативними. 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. Це викликається диханням живих рослинних клітин та окисленням жирів і вуглеводів. З ростом температури різко підвищується 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 проводились численні дослідження на сінажній масі. Посередині траншей в сінажну масу

були закладені термодавачі з виведеними зовні провідниками. Один давач був установлений на глибині 0,2 м від поверхні сінажної маси, один на віддалі 0,2 м від дна траншеї і один на віддалі 0,8 м від дна. Загальна глибина траншеї становила 2,2 м.

Результати вимірювань показали, що температура зеленої маси під час заповнення траншеї не перевищувала 33 °С, що значно нижче, ніж допустима – 40 °С. Під час неперервного трамбування верхні шари охолоджувалися до 27 °С, а після 5...6-годинної перерви нагрівалися до 33 °С. Датчик, встановлений на віддалі 0,2 м від дна, реєстрував більш стабільну температуру – 32...33 °С. 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 рисунку 1 наведений графік зміни температури сінажної маси в траншей після герметизації протягом часу зберігання. Трамбування [15] цієї траншеї при завантаженні здійснювали трактором Т-150К.

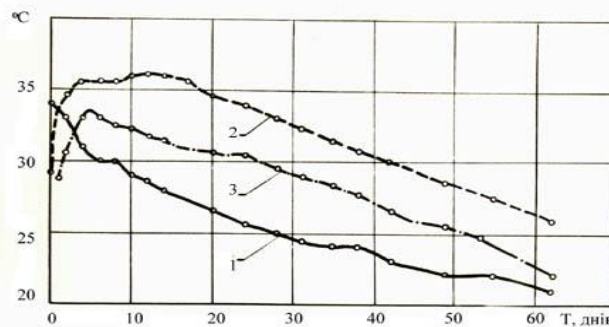


Рис.1. Зміна температури сінажної маси в траншей під час зберігання:

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 спочатку зростає. Це відбувається доти, доки не витратиться весь вільний кисень в повітрі, що знаходиться між частинками подрібненої маси. В даних досліджах температура верхніх шарів різко зростала протягом майже 5 днів. Далі температу-

ра почала спадати. Характер лінії зміни температури на графіку показує, що на верхній шар частково впливали коливання температури атмосферного повітря. В шарі на глибині 0,8 м від дна температура зростала протягом 5 днів і досягла $38,5^{\circ}\text{C}$, після чого почала спадати. Більш висока температура в цьому шарі пояснюється низькою теплопровідністю сінажної маси. В 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, 9,10,11] в таких сховищах слід розраховувати без врахування наслідків теплового режиму.

Постановка завдання. Завданням роботи є 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.

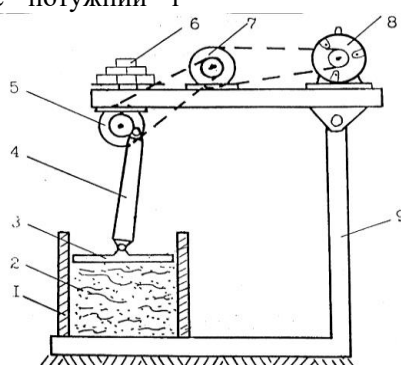


Рис. 2. Схема лабораторної установки: 1 – обичайка; 2 – силосна маса; 3 – опора; 4 – шатун; 5 – кривошипний механізм; 6 – вантаж; 7 – контрпривод; 8 – електродвигун

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

В результаті проведених дослідів визначені оптимальні режими ущільнення силосної маси. За оптимальні режими ущільнення прийняті такі співвідношення між масою ущільнювача (що в досліді імітується вантажем 6), частотою коливань кривошипного механізму 5, амплітудою коливань штовхача (в досліді – опори 3) та тривалістю ущільнення, при яких максимальне ущільнення проби силосу ($450...500 \text{ кг/м}^3$) здійснюється за мінімальних витрат енергії.

Даний експеримент є багатофакторним. 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.

В результаті обробки експериментальних даних одержана формула, яка виражає функціональну залежність залишкової щільності утрамбованої силосної маси γ 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, м²; 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 відноситься до випадку, коли робочим матеріалом була подрібнена маса із злакових трав вологістю 50%.

Графічний вигляд приведених залежностей свідчить про те, що частота ударів є найбільш впливовим фактором. В умовах дослідів дана функція не досягає екстремума, 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. Даний графік відноситься до випадку, коли тривалість трамбування дорівнювала 10 секундам. Графік побудований для чотирьох значень частоти коливань штовхача.

Графік 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.

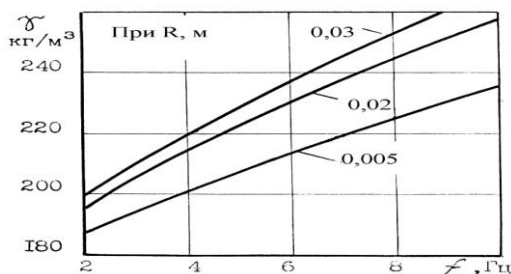


Рис. 3. Залежність величини залишкової щільності силосної маси вологістю 50% від частоти ударів штовхача для тривалості трамбування 10 с

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

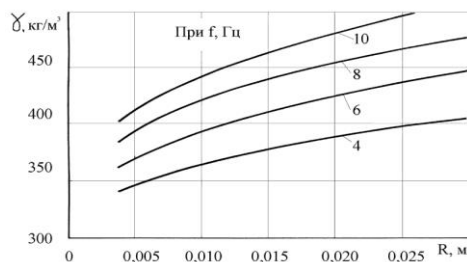


Рис. 4. Залежність величини залишкової щільності утрамбованої силосної маси із кукурудзи вологістю 70% від радіуса кривошипа для тривалості трамбування 10 с

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 compaction 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 найбільш інтенсивно ущільнення проходить у перші 5...10 секунд. Далі ущільнення 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 в цілому результати експериментів, можна константувати:

- ущільнення 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.

- найбільш інтенсивно ущільнюється силосна маса протягом перших 10...30 секунд. Таку тривалість можна прийняти як основну для трамбування на одному місці вібраційними робочими органами;

- в 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 м² площі башмака штовхача, досягнута щільність проби 377 кг/м³. Такої щільності можна досягнути, ущільнюючи пробу зеленої маси статичним тиском, що створюється вантажем 1200 кг на 1 м² протягом 72 годин.

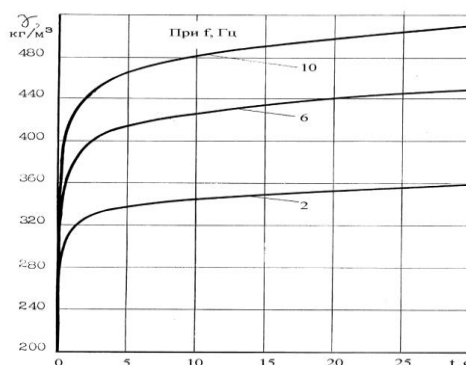


Рис. 5. Залежність величини залишкової щільності силосної маси із кукурудзи вологістю 70% від тривалості трамбування для радіуса кривошипа 0,02 м

Fig. 5. Dependence of residual density corn silage with a moisture content of 70% from the duration of tamping for a crank radius of 0.02 m

Виробничі випробування експериментального зразка ущільнювача

Експериментальний зразок віброущільнювача виготовлений з 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 були визначені наступні показники:

- ступінь ущільнення зеленої маси в залежності від тривалості трамбування;

- витрати електроенергії і часу праці людини на одиницю продукції. Ступінь ущільнення зеленої маси в залежності від тривалості вібровпливу.

Дослідження проведені в такій послідовності. В металічний ящик з 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 нормативних 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 метрів 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.

В 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/м²;
- необхідну кількість обслуговуючого персоналу, чол.

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

Виробниче випробування

Попереднє випробування експериментального зразка ущільнювача провели в лабораторних умовах. Подрібнену масу в кількості 498,5 кг в металічному ящику розміром 1,7 × 1,7 × 0,85 м ущільнювали на протязі 55 хвилин. Зміна щільності подрібненої маси показана на рис.8. На осі абсцис відмічені питомі витрати часу на ущільнення (в 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.

Таким чином, для ущільнення верхнього шару подрібненої маси із кукурудзи в сховищі з найбільш імовірною площею 3х6=18 м² потрібно витратити 4,5 години. Після закінчення ущільнення був визначений розподіл щільності подрібненої маси по товщині шару. Як вказано вище 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 (в кг/м³). Ця залежність описується формулою

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

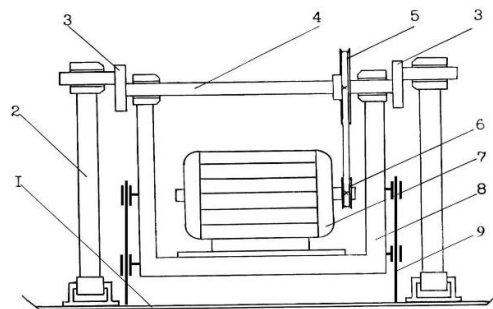


Рис. 6 Схема експериментального ущільнювача:

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

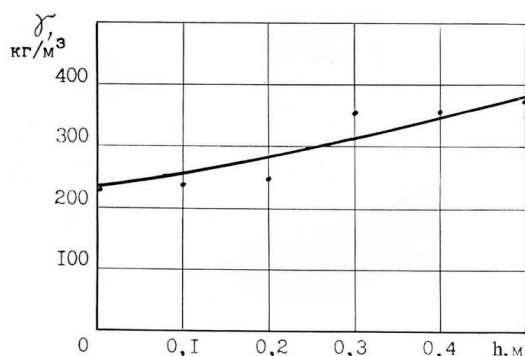


Рис. 7. Розподіл щільності силосної маси по товщині поверхневого шару у сховищі
Fig. 7. Distribution of the density of the silage mass by the thickness of the surface layer in the storage

В результаті встановлено, що після ущільнення подрібненої маси на протязі 45 хвилин (що відповідає питомим витратам часу 15,1 хв/м²) маса ущільнилась з 197,6 (насіпна щільність) до 383,5 кг/м³. При цьому середня щільність всього об'єму досягла 357,6 кг/м³. Ці дані відносяться тільки до поверхневого шару. Слід відмітити ще такий факт: 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. В процесі заготівлі силосу в умовах селянського господарства ущільнення подрібненої маси здійснювали на протязі всього часу заповнення сховища. Після заповнення масу ущільнювали до припинення зменшення товщини шару. Процес ущільнення маси після заповнення сховища показаний на графіку (рис. 8).

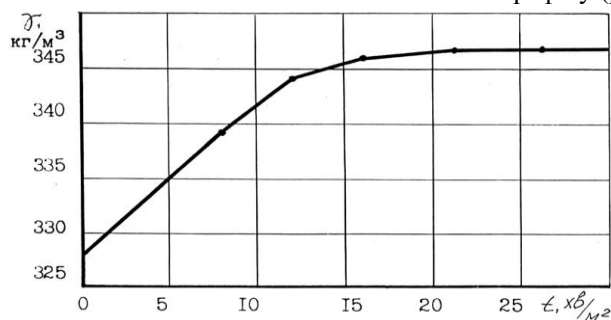


Рис. 8. Зміна середньої щільності подрібненої маси в залежності від тривалості трамбування (після заповнення сховища і 17 годин перерви)

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

В 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 при вологості 59,5% - 347,4 кг/м³ (це відповідає щільності подрібненої маси в перерахунку на вологість 70% з врахуванням наявної сухої речовини - 442,8 кг/м³);
- необхідна кількість обслуговуючого персоналу - 2 чоловіки.

В процесі виробничої перевірки виявлені такі недоліки:

а) установка потребує ручної підтримки в 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) в 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.

д) для опускання і піднімання ущільнювача за допомогою ручної лебідки потрібно прикладати великі зусилля. Для цього потрібний електричний привід.

Із результатів виробничої перевірки ущільнювача силосу і сінажу в сховищах малого об'єму випливає висновок, що розроблена установка працездатна, якість її роботи відповідає агроотехнічним 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 в 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. В 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 в процесі ущільнення за допомогою робочого органа віброударного типу. Ці залежності є основою для вибору конструкційних параметрів ущільнювача. Найбільш інтенсивно ущільнюється силосна маса на протязі перших 10...15 секунд. Таку тривалість можна прийняти як розрахункову для трамбування на одному місці.

6. В процесі трамбування силосної маси із злакових трав з вологістю 50 процентів 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 м² площі опори штовхача, досягнута щільність проби 337 кг/м³. Такої щільності можна досягнути, ущільнюючи пробу статичним тиском, що створюється вантажем 1200 кг на 1 м² на протязі 72 годин.

Для експериментального ущільнювача вибрані такі технічні параметри:

- маса – 250 кг;
- потужність - 10 кВт;
- радіус кривошипа – 3 см;
- частота штовхача – 8 Гц;
- площа опори штовхача – 0,35 м²;

Експериментально визначений розподіл щільності по товщині 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 кг/м³ за середньої щільності 357,6 кг/м³.

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 кг/м³ (в перерахунку на 70% вологості з врахуванням наявної сухої речовини це відповідає щільності 442, 8 кг/м³).

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. Машини 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. Машини 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 випробовувань . 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. Соєво-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.

Розділ 3

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*

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* створюють ключову роль в 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.

Окрім цього, платформа *EOSDA Crop Monitoring* дозволяє 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. Крім того, точне дозування добрив і пестицидів зменшує їх використання, покращуючи якість ґрунту. Інтегровані системи підтримки прийняття рішень забезпечують рекомендації для оптимізації агрономічних практик. Важливу роль відіграє також співпраця між учасниками аграрного сектора, 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 data is provided not only from traditional ground installations, but also with the help of satellite monitoring and drones, which allows you to get accurate information about the condition of fields, plants and climatic conditions.

One of the main uses of such data is yield forecasting, which allows farmers to plan their actions in advance, reducing the risk of losses and optimizing the use of resources. GIS-based precision farming technologies make it possible to regulate the amount of fertilizers and plant protection products in specific areas of the field, which ensures farm efficiency.

In addition, the *EOSDA Crop Monitoring* platform allows for the tracking of livestock movements and numbers, which is crucial for the management of large agricultural enterprises. The integration of satellite data with other sources of information created by enterprises of various scales achieves not only short-term financial results, but also contributes to the realization of long-term goals of sustainable development in the agricultural sector.

The platform also has an intuitive interface that makes the technology accessible to small farms. The introduction of innovative GIS technologies allows to assess the risks associated with climate changes, pests and plant diseases. In addition, accurate dosing of fertilizers and pesticides reduces their use, improving soil quality. Integrated decision support systems provide recommendations for optimizing agronomic practices. An important role is also played by cooperation between the participants of the agricultural sector, which contributes to joint development and exchange of knowledge.

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, можуть 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 відносяться такі пристрої як персональні комп'ютери, ноутбуки, планшети, а також дрони і супутники [3]. Для створення карт застосовують спеціалізоване (профільне) програмне забезпечення. Карти 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 є також не винятком, 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) часовий 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 протягом 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 ми можемо перейти до нового рівня інформації про земельні ресурси. На даний час увага великої кількості науковців, в тому числі сільського господарства, займаються вирішенням питань ефективного застосування у господарствах ГІС-технологій під час управління земельними ресурсами [7-9].

Скануванням 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 візуалізуються як цифрові зображення. Це зроблено для того, щоб більш ефективно вирішувати такі завдання, як зрощування 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 світлини 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 з «сирими» даними (як це робить багато компаній). Вони аналізують хмарність, ідентифікують тіні на світлинах, вирівнюють і опрацьовують дані в ручному режимі, завдяки чому клієнти отримують на 10-12 світлин на рік більше, ніж у конкурентів [8, 13].

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

Постановка завдання. Застосування геоінформаційних систем дає можливість 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 прийняття єдиного правильного рішення, потрібно багато часу і висококваліфікованих фахівців. Програмне забезпечення для нього наповнене залежно від поставлених задач –

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, робимо висновок, що для того, щоб зекономити, доводиться витратити. Особливість супутникового моніторингу в тому, що це один з найдоступніших інструментів для оптимізації агровиробництва [13].

Коли мова йде про геоінформаційні системи (ГІС) і технології супутникового моніторингу в сільському господарстві, конкуренти EOSDA (*EOS Data Analytics*) включають 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 і пропонує безкоштовний доступ до супутникових 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, спос-тереженням 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 прийняття 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 з клієнтською базою понад 700 тис. користувачів по всьому світу, який співпрацює з державними, комерційними та науковими організаціями. Компанія застосовує технології ДЗЗ для надання послуг в більше ніж 20 галузях, в тому числі 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 можливість дистанційно управляти полями за допомогою однієї платформи. Дана 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 в сільському господарстві [13].

Геоінформаційні системи дозволяють створювати карти вегетації та продуктивності полів, а це в свою чергу, 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 визначати 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 швидше за все вказує на наявність чи хвороби, чи шкідників або обезводнення рослин [15].

Сучасні ГІС-технології для сільського господарства є настільки універсальними засобами контролю, що підходять також для відстеження переміщення худоби. Завдячуючи 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].

Також, завдяки геоінформаційним технологіям аграрного напрямку, на індексній карті позначаються ділянки поля з поганою вегетацією, що дає можливість 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).

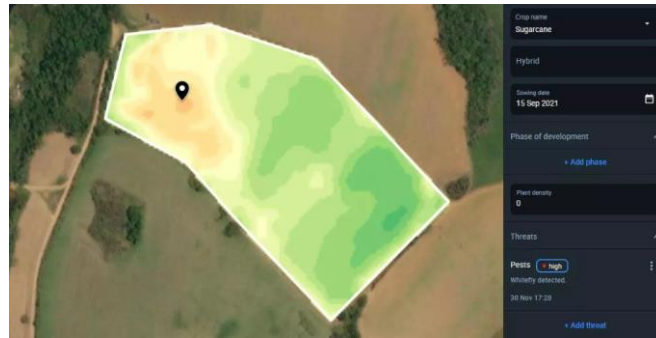


Рис. 3. Визначення ділянок поля з низькою рослинністю для зменшення площі перевірки відповідними службами завдяки *EOSDA Crop Monitoring*.

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

Довготривала посуха, з одного боку, та зливи, з другого, однаково знижують врожайність сільськогосподарських культур. За допомогою ГІС-технологій, фермери можуть оцінювати рівень вологи кожної сільськогосподарської культури і визначати ознаки перенасичення або дефіциту вологи для наступного регулювання зрошувальних робіт [13, 15]. Такі технології для аграрної сфери полегшують аналізування 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* є конкурентоспроможною платформою для супутникового моніторингу в агросекторах завдяки її точності, використанню штучного інтелекту для прогнозування, а також можливості індивідуальних рішень для різних типів аграрних підприємств. У порівнянні 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 наступні 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, та спростить їм частину важливої рутинної роботи. Геоінформаційні системи дозволяють як найефективніше 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 відслідковані проблеми. Саме тому використання геоінформаційних систем з застосуванням багатofакторної оцінки небезпек мають великий попит не тільки у 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
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 агросфері : навч. посіб. Херсон : ХДУ. 2007. 223 с.
8. Примак Л. Основні вимоги до складу топографічного забезпечення для радіочастотного планування телекомунікаційних систем. *Інженерна геодезія: наук.-технічний збірник*, 2018. № 65, С. 158–168.
9. Світничий О.О., Плотинський С.В. Основи геоінформатики : навч. посіб. Суми : Універстетська книга, 2006. 295 с.
10. Сергєєва К. ГІС-технології в сільському господарстві та їх переваги. URL: <https://eos.com/uk/blog/his-tekhnolohii-v-silskomuhospodarstvi/> (дата звернення: 07.04.2024)
11. Boltyanska N. I. (2012). Mechanization of technological processes in animal husbandry: textbook. manual. Melitopol: Color Print. 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. (2015). Satellite Remote Sensing in Agriculture and Food Security Assessment. *Procedia Environmental Sciences*. DOI:10.1016/j.proenv.2015.07.278
15. Quattrochi, Dale & Luvall, Jeffrey. (1998). Thermal Infrared Remote Sensing for Analysis of Landscape Ecological Processes: Methods and Applications. *Landscape Ecology*. DOI:10.1023/A:1008168910634.
16. Howard, L. (2021) *Advances in Satellite Data Utilization for Agriculture: A Focus on Planet Labs*. Taylor & Francis, 285 p.
17. Ritchie, J. C., & Zeng, X. (2020) *Sentinel Satellites for Monitoring Agricultural Systems*. Springer, 312 p.
18. Thompson, P. (2021) *Optimizing Agricultural Operations: A Guide to John Deere Operations Center*. Elsevier, 275 p.
19. Martin, L. (2020) *EOSDA Crop Monitoring: Transforming Agriculture with Satellite Data*. Springer, 280 p.
20. Thompson, M. (2021) *The Future of Smart Agriculture: EOSDA Crop Monitoring Solutions*. Wiley, 275 p.

Стаття надійшла: 12.04.2024.

УДК 629.133.001

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ФОРМУВАННЯ СХЕМИ ГІБРИДНОГО ПРИВОДУ КОЛІСНОЇ АВТОТЕХНІКИ ВИСОКОЇ ПРОХІДНОСТІ

Андрій Кіхтан, асп.

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

Кіхтан А. Аналіз існуючих конструкцій та формування схеми гібридного приводу колісної автотехніки високої прохідності

Гібридний привід стає уже одним з 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 цього у польових умовах автомобіль з гібридним приводом часто може бути і джерелом електроенергії для забезпечення підрозділу при 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, з значним запізненням у порівнянні з 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. Patent analysis and formation of the hybrid all-terrain drive wheeled vehicles scheme

The hybrid drive is already one of the serial elements of the new 4th generation wheeled and tracked military vehicles (MV). However, both the conditions of the off-road useage and the target priorities of using the hybrid drive (minimization of the sound and infrared location of the enemy's movement by thermal imagers) are radically different from the already known general-purpose hybrid cars. In addition, in the field position, a car with a hybrid drive can often be a source of electricity export to provide the unit in the case of absence of stationary power networks.

Driving off-road conditions additionally determine certain requirements for the hybrid drive characteristics - the resistance to movement increases in several times, significantly higher requirements for the range on only electric traction with the internal combustion nonworking engine and the corresponding batteries capacity to these conditions. In addition, requirements for passing water obstacles with a depth of up to 0.8-1.2 m, which causes additional restrictions on the construction of the electric drive.

Accordingly, this imposes a decisive influence on the schemes and technical characteristics of the drive, which is only now being adopted with a significant delay comparing to the usual general purpose hybrid cars. The understandable limitation of information in available public sources specifically regarding to the schemes and technical characteristics of the MV hybrid drive led to the consideration and analysis of available patents in this field of leading automotive manufacturers, as well as publications on tests and evaluation of the efficiency of specific models, from which the scheme of the drive follows.

The survivability of the MV is also very important - the preservation of the movement's possibility in the case of failure of the traction electric drive or the internal combustion engine. Accordingly, two versions of the drive schemes (patent-free) have been worked out for perspective models of the national MV, which is also relevant for the agricultural and other sectors of the economics. These developed two drive schemes are in the process of patenting.

Key words: hybrid drive, automotive engineering, high cross-country ability, patents, drive schemes, patents of drive schemes.

Постановка проблеми. Роботи по гібридному приводу військової автотехніки (ВАТ) провідними виробниками були розпочаті практично одночасно з роботами по автотехніці загаль-

ного призначення, однак практична реалізація машин з гібридним приводом у військах тільки розпочинається, з 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 і інш.]. Зокрема це насамперед забезпечення руху (у т.ч. бездоріжжям, форсування водних перешкод, круті ґрунтови/ піщані підйоми і т.п.) тільки на електротязі, звично на обмеженій дистанції, що обумовлено умовою мінімізації локації руху машини тепловізорами противника. Окрім цього це можливості забезпечення підзарядки акумуляторних батарей тільки двигуном внутрішнього згоряння в польових умовах відсутності електромереж, а також, аналогічно, як джерело електропостачання 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 та 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 ВАР однак, як зазначено вище, суттєво відрізняються, що обумовлює і відповідні зміни у методології як конструктивного синтезу, так і визначенню базових технічних характеристик приводу [1,2,7-9]. Разом з тим, як у інформаційних матеріалах фірм-виробників та державних агенцій з розвитку озброєння та військової техніки провідних країн НАТО, що фінансують розробки ВАР з гібридним приводом, відсутня, в силу зрозумілих причин, інформація щодо конкретної схеми самого приводу та технічних характеристик. (Як от приклад інформаційні матеріали по уже віднедавна прийнятих на озброєння машин з гібридним приводом у найбільш чисельною в структурі сучасного парку ВАР категорії– Oshkosh – eJLTV у США [10] та Scarabeu у Франції [11]). Згідно [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. Метою статті є опрацювання схем гібридного приводу для перспективної ВАР вітчизняного виробництва на основі аналізу існуючих патентів, сфери та умов використання і дотримання патентної чистоти розробки.

Виклад основного матеріалу. З вище викладеного практично випливає, 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 з вищезазначених умов. Проведений 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 ВАР вітчизняного виробництва для ЗСУ, насамперед машин важчих класів, природно ця схема є недостатньою.

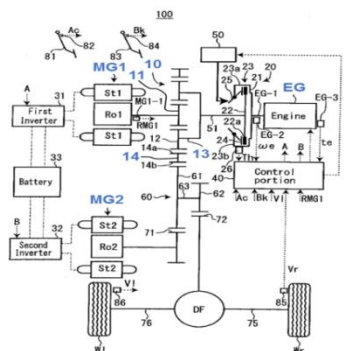
Важке бездоріжжя, чорноземи, в умовах відлиги чи тривалих дощів обумовлюють доцільність і варіанту змішаної схеми приводу (mish-hybrid) з одночасним використанням двигуна внутрішнього згоряння та тягового електродвигуна для приводу ведучих коліс. У цьому плані практичний інтерес представляє аналіз відомих запатентованих рішень провідних автовиробників, які можна вирізнити на декілька підвидів.

Зокрема ця ж схема Toyota Prius (патент EP 2743114A1 від 14.12.2012р.), 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 04.12.2007р.), рис.2. Однак обидві схеми опрацьовані під моно привід – одну ведучу вісь, що допустимо з умов прохідності для надлегких автомобілів – баггі заднемоторної компоновки [1], але не адаптується в існуючому виконанні під повний привід.

Однак обидві схеми опрацьовані під моно привід – одну ведучу вісь, що допустимо з умов прохідності для надлегких автомобілів – баггі заднемоторної компоновки [1], але не адаптується в існуючому виконанні під повний привід.

У цьому плані більш перспективною виглядає схема з 2 планетарними рядами (так зв. схема 2-Mode) – розробка Daimler/Chrysler (патент EP 2616712A1 від 15.09.2010р.), рис.3. У даному випадку другий планетарний ряд 5 використовується з 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 не працюючому двигуні внутрішнього згоряння.



- EG –двигун внутрішнього згоряння
- MG1 – перший електромотор/генератор
- MG2 – другий електромотор/генератор
- 10 – планетарний ряд
- 11 – сонячна шестерня
- 13 – водило
- 14 – коронна шестерня

Рис.1. Схема змішаного приводу Toyota/Aisin (пат. EP 2743114A1)
Fig. 1. Toyota/Aisin mish-hybrid drive scheme (pat. EP 2743114A1)

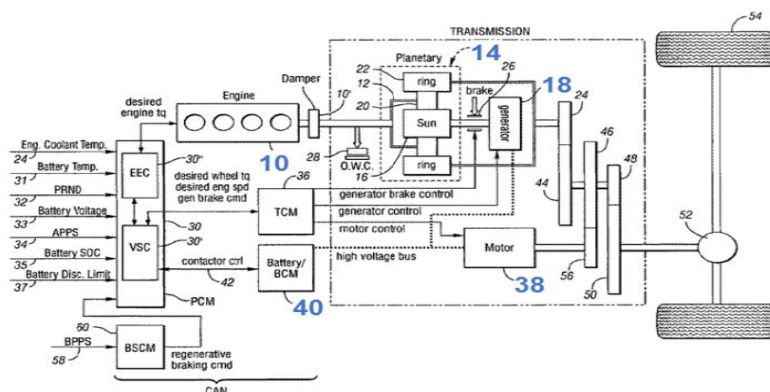
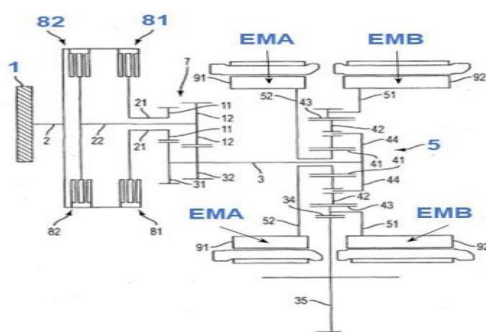


Рис. 2. Схема гібридного змішаного приводу Ford (пат. EP 2067646A1)
Fig. 2. Ford mish-hybrid drive scheme (pat. EP 2067646A1)

де: 10 – ДВЗ; 14 – планетарний ряд; 18 – ел. двигун/генератор; 38 – ел. двигун; 40 - АКБ



- 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)

Проблему 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 послідовний

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 електродвигуна в зоні менше 700-800 об/хв. (неробоча для ДВЗ), актуальних для руху бездоріжжям на малих

швидкостях (при відсутності коробки передач для ДВЗ). Відповідно серійно реалізована схема суміщення послідовної і змішаної схем приводу (Parallel-Seriell-Hybrid) дозволяє перехід на підключення ДВЗ до приводу коліс тільки у зоні

відповідних швидкостей, рис.4 (патент Honda EP 2944495 від 11.01.2013р.). (Тут: 115 – зчеплення; 129 – ведучі колеса; 101 – акумулятор; 109 – ДВЗ; 111- генератор; 107 – електродвигун; INV – інвертор).

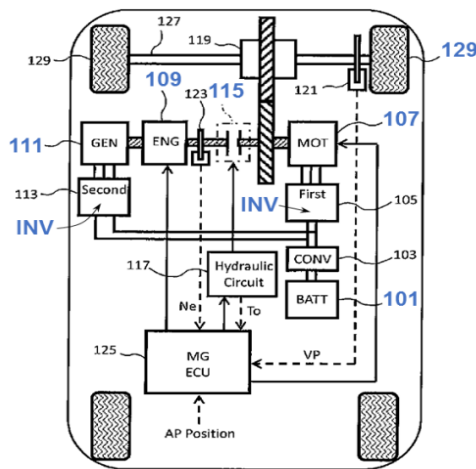


Рис.4. Схема послідовно-паралельногогібридного приводу Honda (пат. EP 2944495)

Fig. 4. Honda parallel-seriell-hybrid drive scheme (pat. EP 2944495)

Практично ця ж схема реалізована і у іншій розробці Honda – патенті EP 2792540 від 12.12.2011р. – 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 зконцентровані 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 3312036F1 від 19.10.2016р.), 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 04.12.2015р.). Окремо слід виділити Mishubishi – патенти EP 3296134 від 15.09.2016р., EP 3453551A1 від 13.06.2016р. та EP 3238971A1, а також Honda (EP 3085593A1 від 17.12.2013р., EP 3437909A1 від 29.03.2016р. та EP 3480492A1 від 30.06.2016р.).

З умов використання ВАТ, зрештою і використання в аграрній, лісгосподарській чи ремонтній сферах, на бездоріжжі дана схема роздільного приводу (combined axle) забезпечує у порівнянні з класичним послідовним (seriell) приводом забезпечує більшу живучість ходу – збереження мобільності, звично обмеженої, у

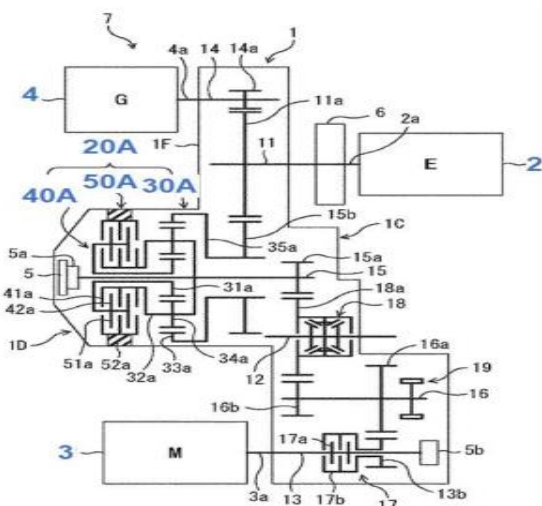
випадку виходу з ладу тягового електродвигуна за рахунок ДВЗ чи навпаки. Відповідно це обумовлює необхідність більш детального розгляду вищезазначених патентних розробок, насамперед Mitsubishi, як безпосереднього виробника ВАТ, рис.5.

Дана 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).

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.

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 не працюючому 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 – так зв. „електрокардан” повного приводу. Перевагою даної схеми є можливість стабілізації режимів роботи ДВЗ у діапазоні економних режимів за рахунок планетарної передачі.



- 2 – двигун внутрішнього згорання
- 4-генератор
- 3-тяговий електродвигун
- 20А-механіка приводу
- 30А-планетарний редуктор
- 40А-фрикціон (зчеплення)
- 50А-стрічкове гальмо

Рис. 5. Паралельно-послідовна схема приводу Mitsubishi (пат. EP 3453551)
Fig. 5. Mitsubishi parallel-serial-hybrid drive scheme (pat. EP 3453551)

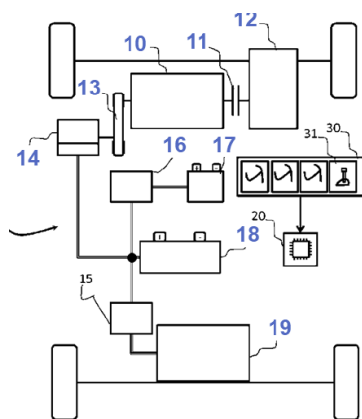


Рис.6. Схема Peugeot-Citroen (пат. EP 3312036A1)
Fig.6. Peugeot-Citroen scheme (pat. EP 3312036A1)

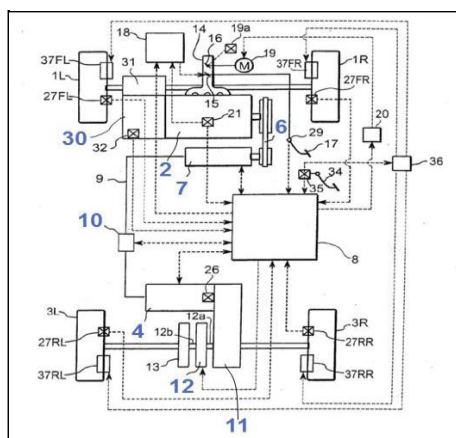


Рис.7. Схема Nissan (пат. EP 1342610AP)
Fig.7. Nissan scheme (pat. EP 1342610AP)

- 10 – двз; 11-зчеплення; 12- мех.. КП
- 13 – клиноремін. передача; 14-генератор
- 16- перетворювач напруги; 17- АКБ
- 18 – високовольтна АКБ; 19 –ел. Двигун

- 2-ДВЗ; 4- ел. двигун; 6- клиноремін. передача;
- 7-генератор; 10- АКБ; 11 – планетарна КП;
- 12-зчеплення; 30 – мех.. КП

Нещодавня розробка Mitsubishi, рис. 9, (концерн є і найбільшим виробником військової автотехніки у Японії) є розвитком змішаного (послідовно-паралельного) приводу з 2 тяговими електродвигунами, окремо на кожен вісь, та можливістю додаткового підключення і ДВЗ до приводу передньої осі, що підвищує живучість та прохідність автомобіля. На автодорогах з 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.

Відмінністю даної схеми є також відсутність класичної коробки передач між ДВЗ і ведучою 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.

Звично 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.

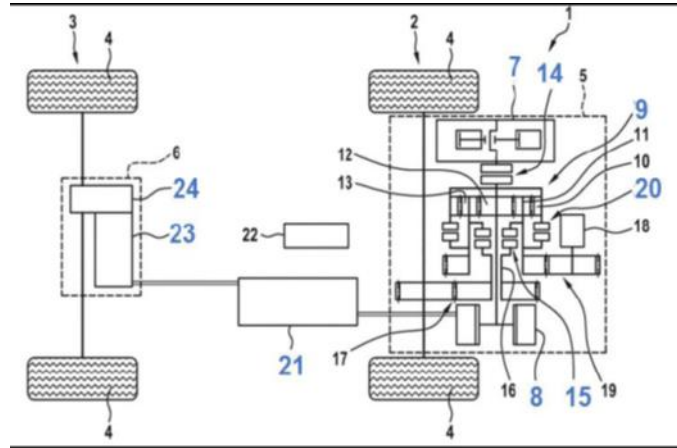


Рис. 8. Схема приводу Audi (пат. EP 3383685A1 від 04.12.2015)

Fig. 8. Audi drive scheme (pat. EP 3383685A1 from 04.12.2015)

7 – ДВЗ; 8 – генератор; 9 – планетарна КП; 14 – зчеплення; 15,20 – зєднувальні елементи; 21 – акумулятор; 23 – електродвигун; 24 – коробка передач.

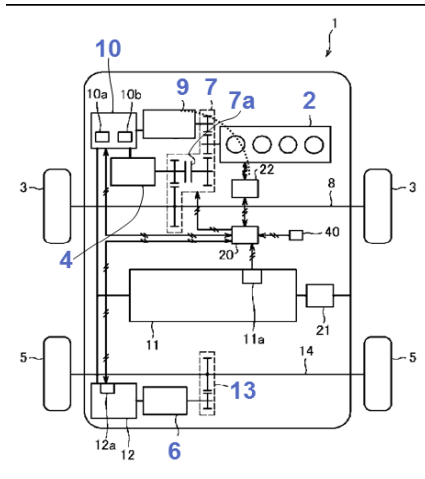


Рис.9. Схема приводу Mitsubishi (пат. EP 3296134A1)
3437909A1)

Fig.9. Mitsubishi drive scheme (pat. EP 3296134A1)

тут: 2 – ДВЗ; 4,6 – електродвигуни; 7- редуктор; 7a – зчеплення; 9-генератор; 10 – АКБ; 13 – редуктор.

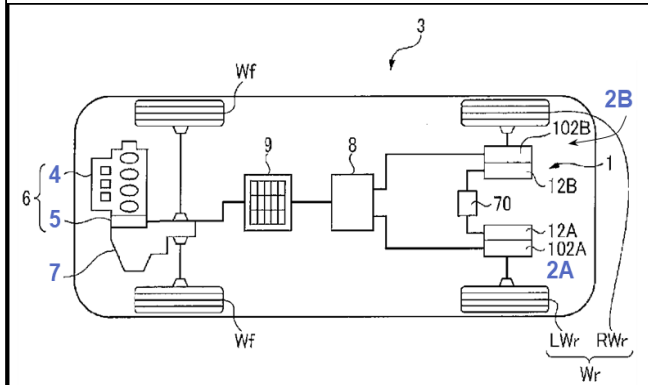


Рис. 10. Схема приводу Honda (пат. EP 3437909A1)

Fig. 10. Honda drive scheme (pat. EP 3437909A1)

тут: 2A,2B – електродвигуни; 4 – ДВЗ; 5 – зчеплення; 7 – коробка передач

Звично, що патенти по гібридному приводу нових зразків ВАТ, зокрема Oshkosh, де є 6 патентів по приводу [12], є у обмеженому доступі. Але щодо Polaris у 2017р. (рис.11), дві

спеціальні моделі якого масово використовуються в арміях НАТО, запатентована схема гібридного приводу виконана власне як combined axle – з тяговим електродвигуном 618 та ДВЗ 514.

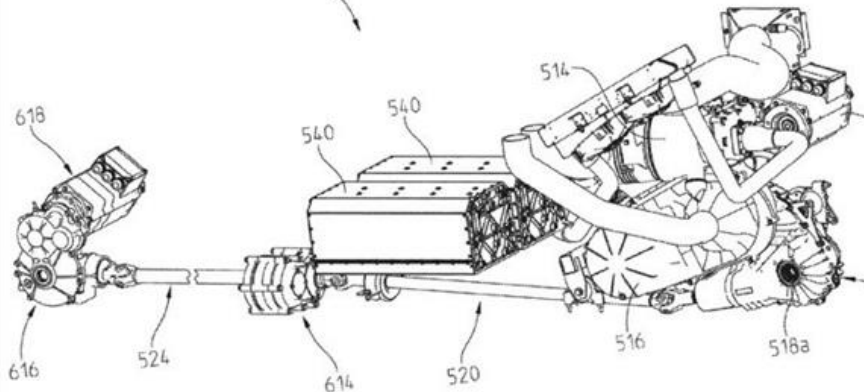


Рис.11. Схема компоновки гібридного приводу баггі Polaris (пат. USA 20170355259A1)

Fig.11. Layout scheme of the Polaris buggy hybrid drive (pat. USA 20170355259A1)

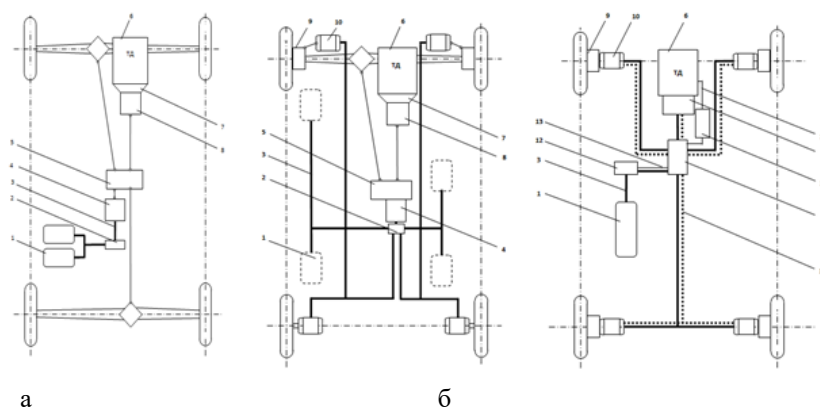


Рис. 12. Схеми гібридного приводу повнопривідного автомобіля (пат. України 116670, 114623, 119713)

Fig. 12. Layout scheme of the hybrid four-wheel drive car (pat. Ukraine 116670, 114623, 119713)

Тут: 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

Інша схема, рис.12 б, залишає привід від ДВЗ на передню вісь (з можливістю відключення від ДВЗ б через зчеплення 7) і включає 4 тягові електродвигуни 10 з приводом кожного з коліс через бортові планетарні редуктори 9. Механічний привід від ДВЗ до задньої осі замінено на відповідному виході розподільчої коробки 5 генератором 4 зарядки батарей. Схема забезпечує 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. 12в, 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 – неможливість використання ДВЗ для урухомлення при виході з ладу електроприводу.

З огляду і аналізу 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 2021-22 роках [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 непрацюючому 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 у порівнянні 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] у порівнянні з аналогічними щодо повної маси гібридними автомобілями загального призначення;

- підвищена потужність генератора з умов більш швидкої зарядки акумуляторів, відчутно більшого споживання електроенергії військовим обладнання, 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].

Вищевикладене, поряд з повним приводом і двоступеневою роздавальною коробкою, і 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 2 етапи:

- доопрацювання і випуск промислової партії легких ударних автомобілів – багті (тип KB 02H «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 (е-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);

- 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 напрацювань 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 значимість конструктивного синтезу гібридного приводу, що здійснюється у співпраці з АТ „Укравтобуспром”. Проведений 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 стільки екологія, як зазвичай, скільки мінімізація локації руху у інфрачервоному та звуковому спектрах та підвищена живучість і прохідність за рахунок наявних двох джерел приводу – ДВЗ і електродвигуна. Окрім цього реалії використання приводу машин у польових умовах як джерела електроенергії для зв'язку, ремонтних робіт і т.п. при 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 mish 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, у т.ч. при виході з ладу електротязи (або навпаки – двигуна внутрішнього згоряння, однак на обмежену дистанцію за запасом ємності батареї). Природно, що це є актуальним 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. [Електронний ресурс] <http://cradpdf.drdc-rddc.ca>PDF>unc319/>
3. Army hybrid vehicles power forward. 21 July 2021.[Електронний ресурс] 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, № 27, 2022, С. 10-18
8. Krause M. Hybridantriebe fuer Militaer-Fahrzeuge.29.05.2022.[Електронний ресурс] <https://aetrans.de/hybridantiebe-fuer-militaerfahrzeuge.>
9. Dong Hwan Choi, Seong Jun Lee, Bo-Hyung Cho, Yeo Giel Yoon. Development of DesignTool for Hybrid Power Systems of Hybrid Electric Military Combat Vehicles. [Електронний ресурс] <https://www.iri.upc.edu>VPPC10>uploads>PDF>paper>95-69838-final>
10. Oshkosh eJLTV. [Електронний ресурс] Oshkosh Defense Hybrid Electric JLTV (eJLTV).. [Електронний ресурс] <https://oshkoshdefense.com.>vehicle>
11. Scarabee [Електронний ресурс]:<https://www.arquus-defense.com>our-armored-vehicle-scarabee>
12. Frank D. Neue Patente fuer das eJLTV.[Електронний ресурс] <https://www.behorden-spiegel.de/2022/09/09/neue-patente-fuer-das-ejltv>
13. Кайдалов Р.О. Наукові основи створення автомобілів з комбінованою енергетичною установкою. Дис... д-р техн. наук, спец. 05.22.02, ХНАДУ, Харків. 2018. 394 с.
14. Khalil G., Danielson E., Barshaw E., Chait M. Power Supply and Integration in Future Combat Vehicles [Електронний ресурс] <https://www/sto.nato.int/publications/STO%962520Meeting%062520Proceedings/R>

15. Chris Mr., Masrar A. Hybrid Electric Vehicles: Principles and Application with Practical HEV Application for Military Vehicles/ 2017 [Електронний ресурс]:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10/1002/9781118970553>

16. Rizzo D.M. Military Vehicle Optimization and Control. Dissertation, Michigan TU, 2014 [Електронний ресурс] <https://doi.org/10.37099/mtu..dc.ets>

17. Hybridization of US Army Combat Vehicles. Technical Paper SAE 2022-01-0371/29.03.2022 [Електронний ресурс] <https://sae.org.>technicalpapers>content>

18. Liu Z., Marmun A.-M., Rizzo D., Onori S. Combined Battery Design Optimization and Energy Management of a Series Hybrid Military Truck [Електронний ресурс] <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/OnoriPDF/Journals/32.pdf>

19. 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 109 (2021), pp. 967–984.

Стаття надійшла 11.07.2024

УДК 631.3.05:629.1.073

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЕНТІВ ЗЧЕПЛЕННЯ ТА ОПОРУ КОЧЕННЮ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН

¹Роман Шевчук, д. с.-г. н., ¹Олег Сукач, к. т. н., ¹Олег Миронюк, к. т. н.,

²Віктор Шевчук, к. т. н., ¹Юрій Габрієль

¹Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл. Україна, e-mail:
19oleg85@ukr.net

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

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 Δt_{di} , який обмежений можливістю людини візуально спостерігати і реєструвати поточні покази динамометра. Значний елементарний інтервал Δt_{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 кочення та зчеплення коліс Debica Passio 2 175/70 R13 82T автомобіля ЗАЗ Sens для різних типів опорної поверхні. Встановлено, що для асфальтованої дороги значення ϕ_i знаходиться в межах 0,6914...0,7162 з середнім значенням 0,698. Для ґрунтової дороги значення ϕ_i знаходиться в межах 0,5754...0,6144 з середнім значенням 0,595. Для ґравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3755...0,4451 з середнім значенням 0,408. Найменші значення ϕ_i отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3275...0,3768 з середнім значенням 0,358.

Для зимових шин коефіцієнт зчеплення для асфальтованої дороги ϕ_i знаходиться в межах 0,6138...0,6514 з середнім значенням 0,6280. Для ґрунтової дороги значення ϕ_i - 0,5799...0,6045 з середнім значенням 0,5919. Для ґравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3847...0,4041 з середнім значенням 0,3945. Більші порівняно з літніми шинами значення ϕ_i отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3761...0,3908 з середнім значенням 0,3825.

Ключові слова: тяговий пристрій, коефіцієнт опору кочення, коефіцієнт зчеплення коліс, програмний модуль.

Shevchuk R., Sukach O., Muronyuk O., Shevchuk V., Habriiel Yu. Study of grip and rolling resistance coefficients of automobile tires.

Determining the traction and traction indicators of cars, in particular the coefficients of rolling resistance and traction of cars, the towing method is widely used, which can be implemented with a simple device equipped with a horizontally located dynamometer and a flexible towing belt. This method is characterized by a large inaccuracy in determining the average towing force, which is due to the variability of the interaction of the wheel drives with the supporting surface and, accordingly, the low accuracy of determining both the grip coefficient with the supporting surface and other traction-adhesion indicators, in particular the rolling resistance coefficient, by the towing method.

The standard towing device for determining the traction-coupling properties of mobile energy vehicles is characterized by a significant elementary measurement interval Δt_{di} , which is limited by the ability of a person to visually observe and record the current readings of the dynamometer. A significant elementary interval Δt_{di} causes a low accuracy in determining the towing force and, accordingly, the average value of the force, the coefficient of rolling resistance and grip. This is due to the change in the readings of the dynamometer at a significant speed due to the variability of the micro-profile of the road. Therefore, the visual method of observation during research is extremely inaccurate.

A methodology and a software complex have been developed to increase the accuracy of determining the towing effort of mobile energy vehicles, which is ensured by reducing the elementary interval of recording measurement values. The proposed software module is connected to the power tension link of the electronic dynamometer. The module is presented in the form of a microcircuit with an analog-to-digital converter, which is connected through a microcontroller with a bus for connecting external devices and a data output interface. This architecture of the module ensures the transfer of data to an electronic data carrier, a memory card or a personal computer.

The coefficients of rolling resistance and adhesion of Debica Passio 2 175/70 R13 82T wheels of the ZAZ Sens car for different types of support surface were determined. It was established that for an asphalt road, the value of φ_i is within 0,6914...0,7162 with an average value of 0,698. For a dirt road, the value of φ_i is within 0,5754...0,6144 with an average value of 0,595. For the gravel section of the road, the values range from 0,3755 to 0,4451 with an average value of 0,408. The smallest values of φ_i were obtained for a wet dirt road – 0,3275...0,3767 with an average value of 0,358.

For winter tires, the adhesion coefficient for an asphalt road φ_i is in the range of 0,6138...0,6514 with an average value of 0,6280. For a dirt road, the value of φ is 0,5799...0,6045 with an average value of 0,5919. For the gravel section of the road, the values range from 0,3847 to 0,4041 with an average value of 0,3945. Compared to summer tires, the values of φ_i obtained for a wet dirt road are 0,3761...0,3908 with an average value of 0,3825.

Key words: towing device, rolling resistance coefficient, coefficient of wheel, software module.

Постановка проблеми. Опір коченню автомобілів визначається втратами енергії в колісному русії, зокрема в шинах коліс [2], 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, даний коефіцієнт позначається f_0 . Теоретичне визначення коефіцієнта опору коченню є складним й дозволяє отримати наближені результати, які потребують експериментального уточнення [7].

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 коливаннями навантаженнями та доповнюються неточністю дій оператора під час вимірювань.

Експериментальне визначення тягово-зчіпних властивостей автомобілів також характеризується значним елементарним інтервалом вимірювання Δt_{di} , який обмежений можливістю людини візуально спостерігати і реєструвати поточні покази динамометра. Значний елементарний інтервал Δt_{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.

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 [6], [9]. Вказаний спосіб характеризується великою похибкою визначення середнього зусилля буксирування, яке зумовлене мінливістю взаємодії колісних русіїв з опорною поверхнею і, відповідно – низькою точністю визначення способом буксируванням 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 [4], [5], [8], 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

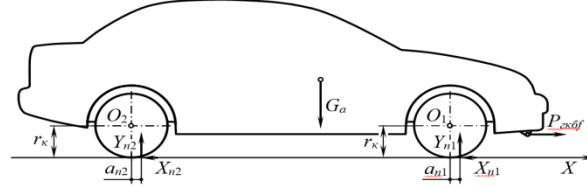


Рис. 1. Схема сил, що діють на автомобіль з розгальмованими колесами під час буксирування
Fig. 1. Diagram of forces acting on a car with unlocked wheels during towing

В 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 в зонах контакту [11] виникають, зумовлені зміною динамічного радіуса коліс r_k , зміщення повздовжніх дотичних реакції 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 проекцій на цю вісь сил, що діють на автомобіль під час буксирування з постійною невеликою швидкістю:

$$\sum X = P_{екbf} - X_{n1} - X_{n2} = 0. \quad (1)$$

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:

$$\begin{aligned} \frac{a_{n1}}{r_k} &= f_{0n1}; \\ f_{0n1} Y_{n1} &= P_{fn1}; \\ a_{n1} Y_{n1} &= M_{fn1}, \end{aligned}$$

де f_{0n1} – коефіцієнт опору коченню з невеликою швидкістю передніх коліс; P_{fn1} , M_{fn1} – сила і момент опору коченню цих коліс.

Тоді:

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 [14]. Перпендикулярно до опорної поверхні, тобто – експериментальної ділянки, діє сила ваги автомобіля G_a . Паралельно до цієї поверхні прикладається зусилля буксирування $P_{екbf}$, яке передається буксирним пасом.

$$X_{n1} = f_{0n1} Y_{n1} = P_{fn1} = \frac{M_{fn1}}{r_k}. \quad (3)$$

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:

$$\begin{aligned} \frac{a_{n2}}{r_k} &= f_{0n2}; \\ f_{0n2} Y_{n2} &= P_{fn2}; \\ a_{n2} Y_{n2} &= M_{fn2}, \end{aligned}$$

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) в рівняння (1), отримуємо:

$$P_{fn1} + P_{fn2} = f_{0n1} Y_{n1} + f_{0n2} Y_{n2} = P_{екbf}. \quad (6)$$

Позначимо:

$$\begin{aligned} P_{fn1} + P_{fn2} &= P_f; \\ f_{0n1} &= f_{0n2} = f_0; \\ X_{n2} &= f_{0n2} Y_{n2} = P_{fn2} = \frac{M_{fn2}}{r_k}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здійснивши підстановку співвідношень (3) і (5) в рівняння (1), отримуємо:

$$P_{fn1} + P_{fn2} = f_{0n1} Y_{n1} + f_{0n2} Y_{n2} = P_{екbf}. \quad (6)$$

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 в рівняння (6):

$$P_f = f_0(Y_{n1} + Y_{n2}) = P_{зкбф}.$$

Оскільки $Y_{n1} + Y_{n2} = G_a$, то в підсумку:

$$P_f = f_0 G_a = P_{зкбф}, \quad (7)$$

звідки:

$$f_0 = \frac{P_f}{G_a} = \frac{P_{зкбф}}{G_a}. \quad (8)$$

На підставі зареєстрованих значень зусилля буксирування $P_{зкбfi}$ (Н) розраховується ряд значень коефіцієнта опору коченню f_{0i} :

$$f_{0i} = \frac{P_{fi}}{G_a} = \frac{P_{зкбfi}}{G_a}, \quad (9)$$

де P_{fi} – значення сили опору коченню (Н), які дорівнюють $P_{зкбfi}$; i – індекс повторності реєстрації зусилля буксирування, становить $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (n – число повторностей); G_a – вага автомобіля, Н.

Під коефіцієнтом зчеплення ϕ 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 ϕ відповідає повздовжньому зчепленню коліс.

Коефіцієнт зчеплення ϕ визначається переважно експериментально способом ковзання окремого колеса чи способом буксирування автомобіля із загальмованими ковзними колесами [6]. 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 дана частина перестає взаємодіяти з дорогою. Поява підйомної сили спричиняє істотне зменшення коефіцієнта зчеплення ϕ 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. В 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 цього, 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 [2], 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 й 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 ϕ може визначатись способом буксирування, аналогічно як і коефіцієнт опору кочення. Буксирування відбувається з невеликою швидкістю автомобіля із загальмованими ковзними колесами, використовуючи розроблений пристрій для визначення тяговозчіпних показників мобільних засобів [9].

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 $M_{\max 2}$ й не обертаються навколо осі O_2 , а ковзають. Сила тяжіння автомобіля G_a діє перпендикулярно до

опорної поверхні, тобто експериментальної ділянки.

Паралельно до даної поверхні прикладається зусилля буксирування $P_{\text{екбф}}$ автомобіля, яке передається пасом розробленого пристрою для визначення тягово-зчіпних показників [9].

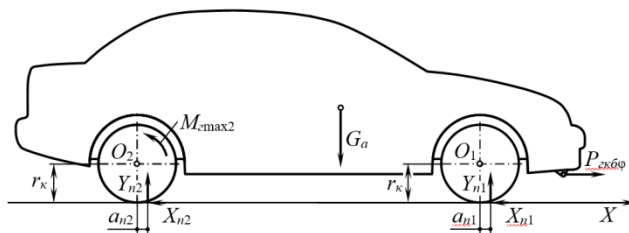


Рис. 2. Схема сил і моментів, що діють на автомобіль із задніми загальмованими ковзними колесами під час буксирування

Fig. 2. Diagram of forces and moments acting on a car with rear locked sliding wheels during towing

В 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 в 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 проекцій на цю вісь сил, що діють під час буксирування з постійною невеликою швидкістю автомобіля із загальмованими ковзними колесами:

$$\sum X = P_{\text{екбф}} - X_{n1} - X_{n2} = 0. \quad (10)$$

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:

$$\begin{aligned} \frac{a_{n1}}{r_{\kappa}} &= f_{0n1}; \\ f_{0n1} Y_{n1} &= P_{fn1}; \\ a_{n1} Y_{n1} &= M_{fn1}, \end{aligned}$$

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 [14] відносно осі O_2 задніх загальмованих ковзних коліс:

$$\sum M_{O2} = Y_{n2} a_{n2} + M_{\epsilon\max2} - X_{n2} r_{\kappa} = 0, \quad (13)$$

звідки:

$$X_{n2} = \frac{a_{n2}}{r_{\kappa}} Y_{n2} + \frac{M_{\epsilon\max2}}{r_{\kappa}}.$$

Введемо позначення:

$$\begin{aligned} \frac{a_{n2}}{r_{\kappa}} &= f_{0n2}; \\ f_{0n2} Y_{n2} &= P_{fn2}; \\ a_{n2} Y_{n2} &= M_{fn2}; \end{aligned}$$

$$\frac{M_{\varepsilon \max 2}}{r_{\kappa}} = P_{\varphi n 2} = \varphi Y_{n 2},$$

де f_{0n2} – коефіцієнт опору коченню з невеликою швидкістю задніх загальмованих ковзних коліс; P_{fn2} , M_{fn2} – сила і момент опору коченню цих коліс; $P_{\varphi n 2}$ – сила зчеплення загальмованих ковзних коліс з опорною поверхнею; φ – коефіцієнт зчеплення.

Тоді:

$$X_{n 2} = f_{0n 2} Y_{n 2} + \varphi Y_{n 2} = P_{fn 2} + P_{\varphi n 2}. \quad (14)$$

Здійснивши підстановку співвідношень (12) і (14) в рівняння (10), отримуємо:

$$P_{fn 1} + P_{fn 2} + P_{\varphi n 2} = f_{0n 1} Y_{n 1} + f_{0n 2} Y_{n 2} + \varphi Y_{n 2} = P_{\text{зкб}\varphi}. \quad (15)$$

Позначимо:

$$P_{fn 1} + P_{fn 2} = P_f;$$

$$f_{0n 1} = f_{0n 2} = f_0,$$

де P_f – сила опору коченню автомобіля, коефіцієнт опору коченню якого – f_0 .

Після підстановки цих позначень в рівняння (15):

$$P_f + P_{\varphi n 2} = f_0(Y_{n 1} + Y_{n 2}) + \varphi Y_{n 2} = P_{\text{зкб}\varphi}.$$

Нормальна реакція опорної поверхні на задні загальмовані колеса автомобіля $Y_{n 2} = G_{a 2}$, де $G_{a 2}$ – частина сили тяжіння автомобіля, що припадає на ці колеса і встановлюється зважуванням задньої осі. Сума нормальних реакцій $Y_{n 1} + Y_{n 2} = G_a$, то в підсумку:

$$f_0 G_a + \varphi G_{a 2} = P_{\text{зкб}\varphi}, \quad (17)$$

звідки:

$$\varphi = \frac{P_{\text{зкб}\varphi} - f_0 G_a}{G_{a 2}}. \quad (18)$$

Під час визначення коефіцієнта зчеплення встановлюється значення зусилля буксирування за допомогою електронного динамометра розробленого пристрою [15] для визначення тягово-зчіпних показників мобільних засобів (рис. 3 а, б).

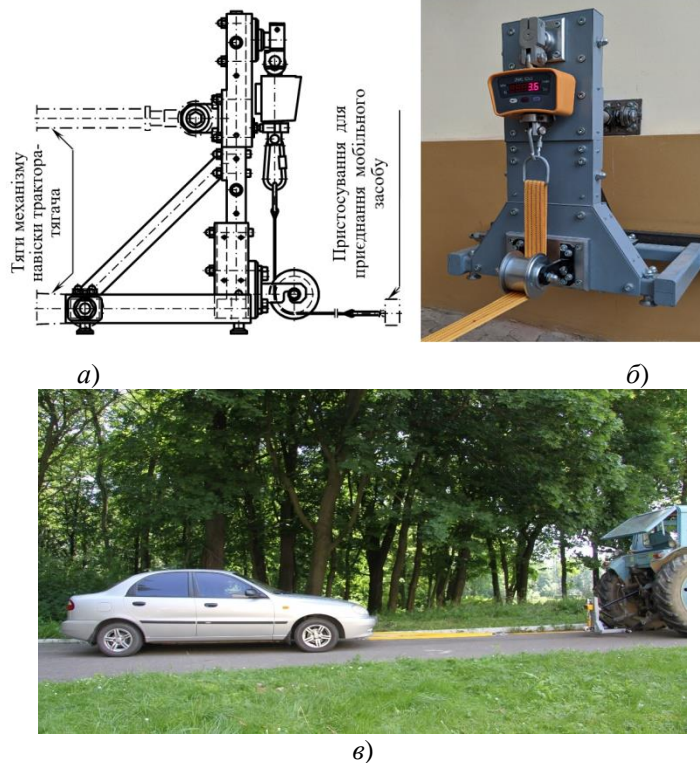


Рис. 3. Визначення зусилля буксирування автомобіля за допомогою пристрою для визначення тягово-зчіпних показників

Fig. 3. Determining the towing force of a car using a device for determining traction and grip indicators

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 $P_{\text{кб}\phi_i}$ (Н) зусилля буксирування на початку ковзання задніх загальмованих коліс, а на підставі цього зусилля розраховується ряд значень ϕ_i коефіцієнта зчеплення:

$$\phi_i = \frac{P_{\text{кб}\phi_i} - f_{0i} G_a}{G_{a2}}, \quad (19)$$

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 тяжіння G_a (Н), частина G_{a2} (Н) якої припадає на задні загальмовані колеса.

Для підвищення точності визначення зусилля буксирування мобільних засобів необхідне зменшення елементарного інтервалу реєстрації значень вимірювання [12]. З цією метою запропоновано використовувати програмний модуль (рис. 4а), який приєднується за допомогою аналогово-цифрового перетворювача до силової тензоланки електронного динамометра [13]. Даний модуль представлений у вигляді мікросхеми з аналогово-цифровим перетворювачем, що з'єднується через мікроконтролер з шиною підключення зовнішніх пристроїв та інтерфейс виводу даних [3]. Така архітектура модуля забезпечує передачу даних на електронний носій інформації чи персональний комп'ютер (рис. 4б).



а)



б)

Рис. 4. Схема під'єднання програмного модуля до електронного динамометра тягового пристрою
Fig. 4. The scheme of connecting the software module to the electronic dynamometer of the traction device

Тенозометрична ланка, що застосовується в електронному динамометрі характеризується частотою реєстрації даних в межах 10 – 80 Гц, що є значно меншим від досяжного для дослідника елементарного інтервалу вимірювання Δt_{ni} . Під

час використання програмного модуля можна встановити невеликий елементарний інтервал Δt_{ni} (дискретність реєстрації даних), завдяки чому знижується загальна похибка вимірювання [10].

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 [1].



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 [13] 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 випадку 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, у 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 враховується під час вимірювання. Отримані таким чином дані вимірювань зберігаються у вигляді окремого csv-файлу з можливістю його подальшого імпорту та експорту між різними програмами чи текстовими редакторами.

Зусилля буксирування розраховується програмою автоматично за допомогою перевідних 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.



Рис. 6. Рисунок протектора досліджуваних шин літніх та зимових шин
Fig. 6. Tread pattern of summer and winter tires

Коефіцієнт опору коченню f_{0i} та зчеплення φ_i (рис. 7 а, б) коліс автомобіля визначено на основі зусилля буксирування $P_{зкб\varphi i}$ на типових поверхнях доріг (табл. 1, табл. 2). Для автомобілів загального призначення – асфальтованої, гравійної, ґрунтової сухої і після дощу [2], [7].

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 $P_{зкб\varphi i}$, Н	Коефіцієнт опору коченню f_{0i}	Середнє значення f_0	Зусилля буксирування $P_{зкб\varphi i}$, Н	Коефіцієнт зчеплення φ_i	Середнє значення φ
	G_a , 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	
Ґрунтова	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 ґрунтова	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	

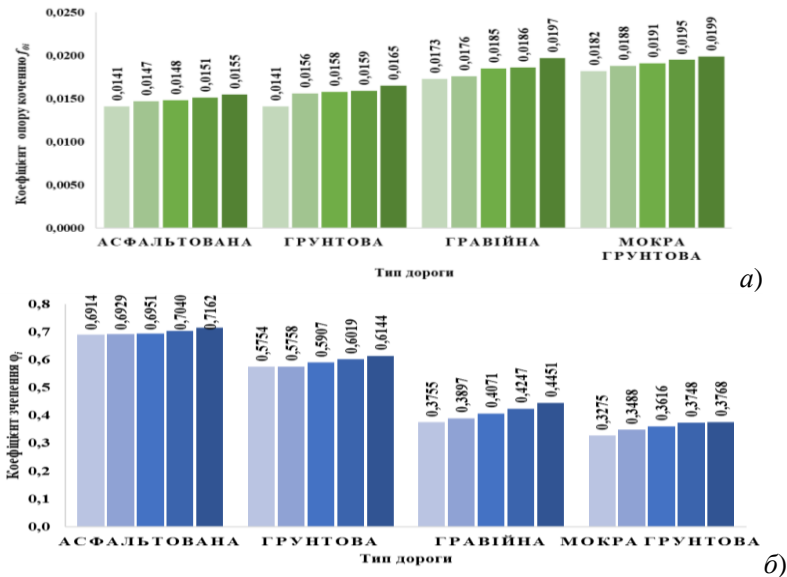


Рис. 7. Результати дослідження коефіцієнтів опору коченню і зчеплення літніх шин на різних типах доріг
Fig. 7. The results of the study of coefficients rolling resistance and wheel grip of summer tires on different types of roads

За допомогою програмного модуля отримано значення зусилля буксирування для експериментальних ділянок асфальтованої, ґрунтової, гравійної й мокрої ґрунтової доріг [7]. Значення f_{0i} встановлені на етапі попередніх досліджень й на їх основі визначено коефіцієнти зчеплення для вказаних умов.

Як видно із графіків (рис. 7 б) для асфальтованої дороги коефіцієнт зчеплення ϕ_i за питомого тиску в шинах 0,2 МПа знаходиться в

межах 0,6914...0,7162 з середнім значенням 0,698.

Для ґрунтової дороги значення ϕ_i - 0,5754...0,6144 з середнім значенням 0,595. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3755...0,4451 з середнім значенням 0,408. Найменші значення ϕ_i отримано для мокрої ґрунтової дороги - 0,3275...0,3768 з середнім значенням 0,358.

Таблиця 2. Результати дослідження коефіцієнта опору коченню та зчеплення коліс Fulda Kristall Montero 3 175/70 R13 82T автомобіля ЗАЗ Sens

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 $P_{\text{кб}i}$, Н	Коефіцієнт опору коченню f_{0i}	Середнє значення f_0	Зусилля буксирування $P_{\text{кб}i\phi_i}$, Н	Коефіцієнт зчеплення ϕ_i	Середнє значення ϕ
	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	
Ґрунтова	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 ґрунтова	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	

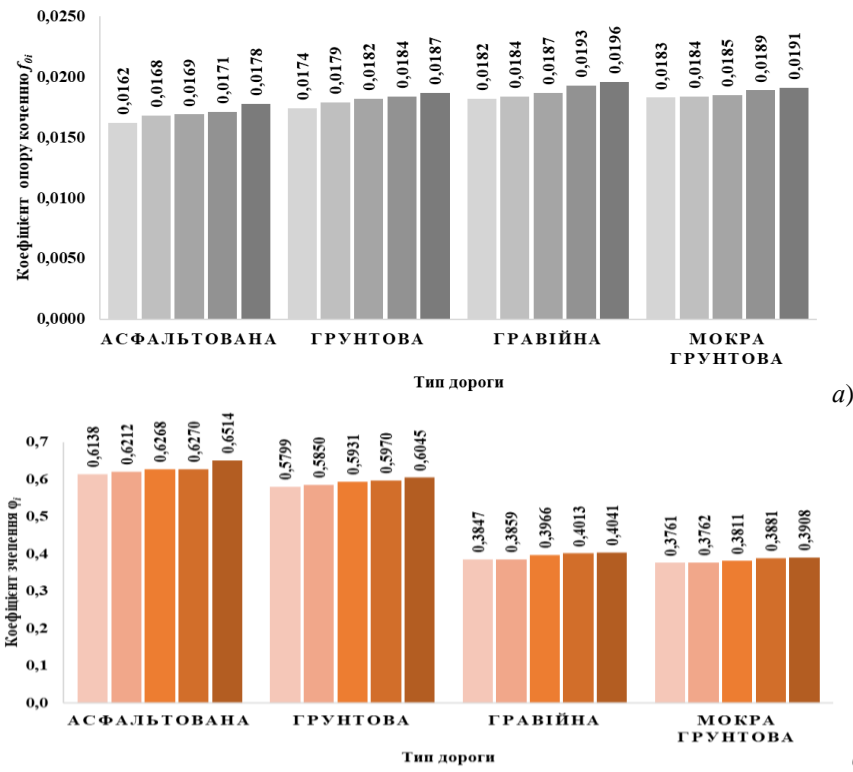


Рис. 8. Результати дослідження коефіцієнтів опору коченню і зчеплення зимових шин на різних типах доріг
Fig. 8. The results of the study of coefficients rolling resistance and wheel grip of winter tires on different types of roads

Як видно із 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 ϕ_i знаходиться в межах 0,6138...0,6514 з середнім значенням 0,6280 та є меншим на 7% (рис. 8 б).

Для ґрунтової дороги значення ϕ_i - 0,5799...0,6045 з середнім значенням 0,5919. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3847...0,4041 з середнім значенням 0,3945. Більші порівняно з літніми шинами значення ϕ_i отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3761...0,3908 з середнім значенням 0,3825.

Висновки. Стандартний тяговий пристрій для визначення тягово-зчіпних властивостей мобільних енергетичних засобів характеризується значним елементарним інтервалом вимірювання Δt_{di} , який обмежений можливістю людини 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 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 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 ϕ_i знаходиться в межах в межах 0,6914...0,7162 з середнім значенням 0,698. Для ґрунтової дороги значення ϕ_i - 0,5754...0,6144 з середнім значенням 0,595. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3755...0,4451 з середнім значенням 0,408. Найменші значення ϕ_i отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3275...0,3768 з середнім значенням 0,358.

Для зимових шин Fulda Kristall Montero 3 коефіцієнт зчеплення для асфальтованої дороги ϕ_i знаходиться в межах 0,6138...0,6514 з середнім значенням 0,6280. Для ґрунтової дороги значення ϕ_i - 0,5799...0,6045 з середнім значенням 0,5919. Для гравійної ділянки дороги значення коливаються в межах 0,3847...0,4041 з середнім

значенням 0,3945. Більші порівняно з літніми шинами значення φ_i отримано для мокрої ґрунтової дороги – 0,3761...0,3908 з середнім значенням 0,3825.

Бібліографічний список

1. Open Source Arduino Learner Kit V2. URL: <https://www.instructables.com/Open-Source-Arduino-Learner-Kit-V2/> (дата звернення: 15.03.2023).
2. Pacejka H. B. Tyre Mechanics and Vehicle Dynamics. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2002. 621 p.
3. Tom Denton. Automobile mechanical and electrical systems. New York, NY: Routledge, 2018. 379 p.
4. Вікович І. А. Теорія руху транспортних засобів: підручник / Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 672 с.
5. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля: підручник / Суми: Університетська книга, 2010. 320 с.
6. Макаров В. А. Моделювання руху автомобіля з урахуванням тягової сили й перерозподілу маси. *Автомобільний транспорт*. 2013, 32. С. 23-28.
7. Мармут І. А., Кашканов В.А., Зуєв В.О. Експериментальне дослідження опору кочення коліс автомобіля на роликовому стенді. *Вісник машинобудування та транспорту: науковий журнал ВНТУ*. Вінниця, 2020. № 2 (12). С. 68 – 75.
8. Подригало М. А., Волков В. П., Бобошко В. П. Динаміка автомобіля / за ред. М. А. Подригала. Харків: ХНАДУ, 2008. 424 с.
9. 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.
10. 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.
11. Сахно В. П., Вербицький В.Г., Белевцова Н.Л., Єфименко А.М., Костенко А.В. Вплив стабілізуючого моменту шин на курсову стійкість руху автомобіля. *Вісник Національного транспортного університету*. Київ, 2010. Вип. 21, № 1. С. 180 – 183.
12. Тищенко К. В., Ткач О. П. Програмування систем збору і аналізу даних: навч. посібник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 168 с.
13. Цирульник С. М. Програмно-апаратний комплекс «Arduino learner kit». *Електронне наукове фахове видання “Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету”*. 2021, № 10. С. 231–240. <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2021.1019>.
14. Шевчук Р. С. Експлуатаційні показники тракторів і автомобілів: практикум з розрахунку показників. Львів: Львівський національний аграрний університет, 2018. 173 с.
15. Шевчук Р. С., Сукач О. М., Шевчук В. В. Модернізований пристрій для визначення тягово-зчіпних показників мобільних енергетичних засобів. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: матеріали XIV міжн. наук.-практ. конф. (Кропивницький, 8-10 лист. 2023 р.)*. Кропивницький: ЦНТУ. 2023. С. 41 – 42.

Стаття надійшла 27.05.2024

УДК 629.001

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*

Крайник Т., Ковалишин С. Мобільність та керованість руху автомобіля бездоріжжям: формування нормативної бази

Проведено огляд та аналіз методик та нормативних баз передових країн щодо вимог та оцінки мобільності – максимальних швидкостей руху та керованості - стійкості руху автомобілів бездоріжжям і ґрунтовими дорогами. Звично це опрацьовано насамперед щодо військової автотехніки (ВАТ), автомобілі для аграрної та лісогосподарської сфер здебільшого це відповідні модифікації (напр. самоскиди, лісовози) повнопривідної ВАТ так зв. другої лінії – забезпечення переднього краю. Окремою вимогою у цій сфері є дотримання агроекологічних вимог щодо допустимих тисків у контакт шин з ґрунтою *emantics of the steering drive under the condition of maximum alignm* з умов агроекології. Перепади висот нерівностей бездоріжжя формують особливі вимоги щодо кінематик 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 методіку експериментальної оцінки мобільності руху автомобілів бездоріжжям та пропозиції щодо формування відповідної вітчизняної нормативної бази (з врахуванням і Правил ЄЕК ООН щодо сертифікації конструкцій для допуску до експлуатації і на автодорогах з твердим покриттям).

Ключові слова: автомобілі, бездоріжжя, кінематика підвіски та кермового приводу, мобільність, керованість, нормативні вимоги

Kraynyk T., Kovalyshyn S. Mobility and controllability of car movamend off-road: formation of a regulatory framework

A review and analysis of the methods and regulatory bases of advanced countries regarding the requirements and evaluation of mobility - maximum speeds of movement and controllability - stability of the movement of cars on off-road and dirt roads was carried out. Usually, this is worked out first of all in relation to military vehicles (MV), cars for the agricultural and forestry spheres are mostly appropriate modifications (e.g. dump trucks, timber trucks) of the so-called all-wheel drive MV. of the second line - provision of the front edge. A separate requirement in this area is compliance with agro-ecological requirements regarding permissible pressures in contact of tires with the soil due to agro-ecology conditions. Differences in the heights of off-road irregularities form special requirements for the suspension and steering kinematics and, accordingly, for the controllability and stability of the cars. The increased amplitudes of the off-road suspension strokes lead to the formation of the corresponding kinematics of the steering drive under the condition of maximum alignm condition of maximum alignment. High-speed driving modes are limited by the permissible vibration loads on the driver, which differ significantly from the driving conditions on paved roads.

The method of experimental evaluation of the mobility of off-road vehicles and proposals for the formation of the relevant national regulatory framework (taking into account the UN/ECE Rules on the certification of structures for admission to operation on paved roads as well) were developed.

Key words: cars, off-road, suspension and steering kinematics, mobility, controllability, regulatory requirements

Постановка проблеми. Проблема кардинального оновлення парку ВАТ у ЗС України та існуючого, практично замортованого 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 очевидною є і необхідність переходу на якісно вищий етап автомобілів даних сфер використання, як щодо гармонізації ВАТ з нормативними базами країн НАТО, так і щодо екології та безпечності

конструкцій в аграрній та лісогосподарській галузях (у т.ч. з умов відповідності прийнятим в Україні вимогам сертифікації – Правил ЄЕК ООН щодо допуску до експлуатації на автодорогах загального призначення). У країнах НАТО існують національні стандарти що вимог та оцінки відповідності ВАТ, що охоплюють не тільки прохідність, але і мобільність руху бездоріжжям (на відміну від відповідних ГОСТ В СССР та сучасних ГОСТ Р В, де охоплено тільки прохідність) [1-4 і інш.]. Очевидно також, що вимоги щодо вантажівок для аграрної та

лісогосподарської сфер є найближчими до сучасної ВАТ так зв. другої лінії – забезпечення переднього краю, однак з іншими типами забудови шасі (самоскиди, лісовози і т.п.).

Постановка завдання. Об'єктивна необхідність оновлення вітчизняного парку автомобілів для бездоріжжя обумовлює необхідність опрацювання відповідної нормативної бази щодо необхідних технічних характеристик та оцінки відповідності, насамперед стосовно прохідності та мобільності руху, що значним чином формуються підвіскою та кермовим управлінням.

Метою роботи є опрацювання базових засад формування вітчизняної нормативної бази щодо вимог та оцінки мобільності руху автомобілів для бездоріжжя.

Виклад основного матеріалу. 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 13.12.2014р. [5]. Останні однак не входять у перелік обов'язкових при проведенні сертифікації – схвалення типу нових моделей автомобілів, як умови допуску до руху на автодорогах загального призначення, зрештою як і чинний з 1996р. ДСТУ 3310-96, як аналог обов'язкового ГОСТа СРСР щодо оцінки стійкості руху [6,7]. (У РФ вдосконалена версія 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. Разом з тим для ВАТ в країнах НАТО діючою є окрема нормативна база [1,2,5], що передбачає ряд 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 з фактично фіксованими значеннями коефіцієнтів зчеплення та опору коченню шин. Очевидна певна пропорційність погіршення отриманих показників пропорційно зміні зчеплення та опору кочення на реальних ґрунтових та піщаних ОП.

В цьому плані випробувальні тести для оцінки максимально можливих, критичних швидкостей здійснення маневру з умов збереження стійкості руху, як нормативна база [6-8], представляють практичний інтерес – у т.ч. 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.

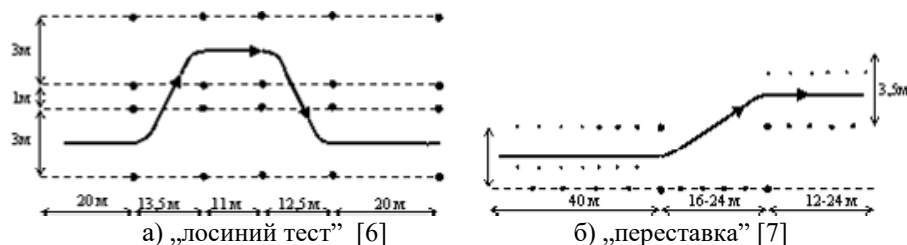


Рис.1. Схеми випробувальних тестів оцінки критичних швидкостей маневру автомобілів з умов стійкості/керованості руху

Fig. 1. Schemes of tests for evaluating the critical speeds of maneuvering cars from the conditions of stability of traffic controllability

Більша складність, розповсюдженість використання в країнах ЄС та наближеність до реалій руху власне маневру „лосиний тест” (рис. 1а) зумовлює доцільність власне його використання, у т.ч. і з умов оцінки максимально можливих швидкостей об'їзду перешкод, мобільності в умовах бездоріжжя.

Остання однак в умовах бездоріжжя при існуючих високих питомих потужностях обмежується насамперед гранично допустимими віброколивними навантаженнями на водія/екіпаж, що зумовило появу і зростаюче розповсюдження в усіх класах ВАТ, включно надважкі

автомобілі, так зв. довгоходових підвісок з збільшеною у 1,5-2 рази амплітудою ходів (Timoney, Oshkosh TAK-4 і інш. [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 поздовжніх лонжеронів каркасу 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 – так зв. „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 – багі ТУР КВ 02 „Мамай”)

Fig. 2. Front long-travel suspension on traverse A-similar levers (light strike vehicle- military buggy TUR KB 02 “Mama”)

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 різними амплітудами ходів (на прикладі військового джипа НММВВ моделей М998 з амплітудою

ходів підвіски 216 мм та вдосконаленого М1114 з амплітудою 355 мм) підтверджена і у 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). Разом з тим 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 4т) 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 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

Тут: ММР – максимально допустимий тиск у контакті шини з опорною поверхнею при завантаженому автомобілі.

Експериментальна оцінка вібронанвантажень базується на апробованому вимірювальному комплексі [16], рис.3, з використанням датчиків вібрації та програмного забезпечення Arduino [17], що дозволяють провести оцінку в рамках вимог нормативних актів [18,19]. Порогові, гранично допустимі значення віброприскорень (частота 0-20 Гц технічно – коливання, більше 20Гц – для автомобілів до 84 Гц – вібрації) формуються для автомобілів загального призначення 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 як насамперед від тривалості дії (часу руху певним бездоріжжям чи дорогою), так і від частоти збурень /швидкості руху. Рух впродовж 1 години – це діапазон віброприскорень 0,8-6 m/s^2 (менші значення у зоні частот 4-8 Гц), впродовж 4 годин – це вже 0,35-1,8 m/s^2 [10], однак згідно [18] для оцінки вібронанвантажень приймаються значення, найбільші з трьох ординат, для автомобілів загального призначення на асфальтобетоні це звично вертикальні, поздов

жні та поперечні коливання тоді з оцінки виключаються. Очевидно, що в умовах без доріжжя вагомість поперечних та поздовжніх коливань значно зростає і для оцінки плавності руху ВАТ у Великобританії та США та інш. країн [11,12] частіше використовується британський стандарт оцінки вібронантажень [20], в якому сумарна оцінка вібронантажень враховує всі три напрямки дії (з врахуванням вагомості частот коливань/вібрацій, що дещо відрізняється від ISO

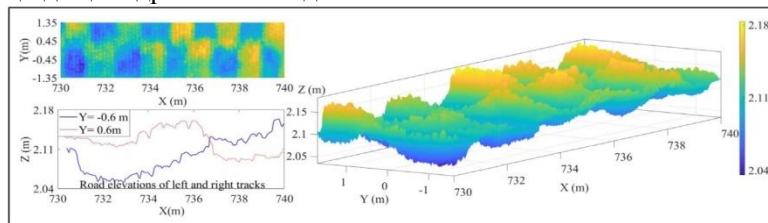


Рис.3. Характеристика тестової ділянки „бельгійська бруківка” концерну Daimler AG [21].
Fig.3. Characteristics of the test site “Belgian cobblestones” of the Daimler concern [21].

Практично слід констатувати, що нормативна оцінка ефективності підвісок автомобілів у практиці ЄС проводиться на твердих опорних поверхнях з вбудованими елементами штучних перешкод різних висот [10-12, 14 і інш.], у т.ч. і вищезгадана «бельгійська бруківка». У цьому плані більш звичні для офіційних вітчизняних та

[18]). Експериментальну оцінку плавності руху – вібронантажень на екіпаж, у т.ч. повнопривідних багатоцільових автомобілів, що використовуються і у військовій сфері, Daimler AG проводить 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 проектуванні та модернізації підвісок.

європейських автодилерів випробувальну ділянку для підвіски кросоверів (рис.4). Ділянка включає в себе послідовно розміщені викладені з бруківки три пороги, так зв. „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 підчас випробувань - оцінки плавності руху на спеціальній тестовій ділянці.

Fig.4. All-terrain vehicles TUR KB 022 “Mamaj” and UAS 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 організму 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 з 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 так зв. „пробій” підвіски та критичні, недопустимі для організму людини ударні віброколивні навантаження. Явище „пробою” підвіски формується не тільки амплітудою ходів, але й пружно-демпфуючими характеристиками підвіски, тому проста процедура заміру ходів підвіски є недостатньою. З проведеного аналізу можливих варіантів для оцінки амплітуди ходів підвіски – оцінки швидкості руху, при якій наступає так зв. пробій, було використано і уже стандартну і в Україні (згідно 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 даного ДСТУ), рис. 5 та 6.

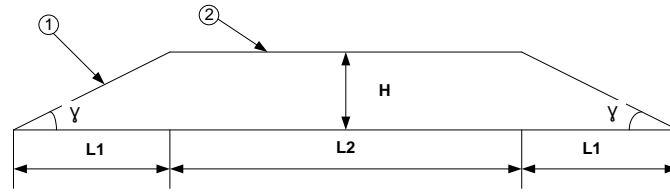


Рис. 5. Поперечний переріз підвищеного пішохідного переходу згідно ДСТУ 4123:2020.
Fig. 5. Cross-section of an elevated pedestrian crossing according to the standard DSTU 4123:2020



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 вищезазначених автомобілів для бездоріжжя (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 м/с²). Очевидні відмінності вібронавантажень при звичній залежній ресорній підвісці (УАЗ), ще до сьогодні домінуючій у парку ВАТ, та незалежній, з збільшеною у 1,6-1,7 рази

амплітудою ходів (Мамай). Порогове, максимальне значення швидкості руху, при якій відбувся „пробій” підвіски, склало 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), в функції частот збурень / швидкості руху.

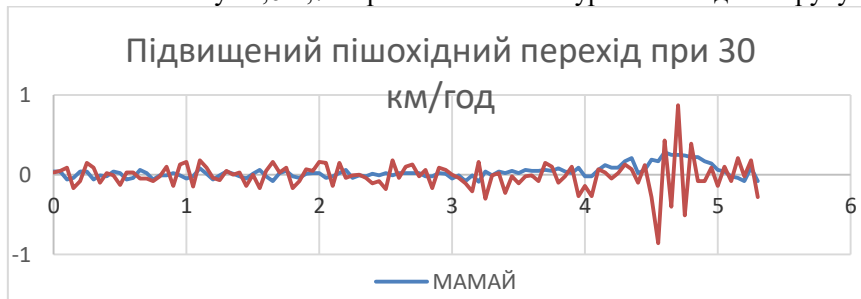


Рис. 7. Запис вертикальних прискорень сидіння водія (м/с²) при проїзді пішохідного переходу з швидкістю 30 км/год (4-5 секунди запису)

Fig. 7. Recording of vertical accelerations of the drivers seat (m/s²) 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, важливою є також оцінка ущільнення ґрунту у контакті з колесами, що регламентується нормативною базою [23-25] та є особливо актуальною для України у період весняно-польових робіт та пізньої осені [26]. Але допустимі норми питомого тиску у контакті шини з ґрунтом є диференційованими залежно від твердості ґрунту і вітчизняна нормативна база у плані оцінки твердості ґрунту є громіздкою і явно застарілою [27] у порівнянні з сучасними приладами – пенетрометрами [28,29], що вже знаходять застосування і у вітчизняних дослідженнях [30] та загальноприйнятті у країнах

ЄС [31]. У цьому плані очевидна актуальність прийняття в Україні як ДСТУ міжнародного стандарту ISO 22476 [32].

Висновки. Очевидна необхідність 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. Звично для автотехніки у аграрному секторі необхідно додатково враховувати і вимоги агроекології щодо допустимого ущільнення ґрунту, але водночас і спрощені вимоги щодо прохідності на рівні підвищеної або середньої (табл..1). Форму-

вання вітчизняної нормативної бази щодо вимог і оцінки прохідності та мобільності руху автотехніки для бездоріжжя, насамперед ВАТ, з аналізу відповідних стандартів провідних промислових країн, включає в себе і 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 так зв. „пробою” підвіски та мобільність руху бездоріжжям з умов допустимих вібронавтажень 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. – С.61. ISBN 978-617-607-925-5
6. ДСТУ – ISO 3888-1:2014. Автомобілі легкові пасажирські. Випробувальний шлях для рвучкого зміння 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., Kraynyk T., Kovalyshyn S. Development of structures and basis of structural synthesis of independent suspensions of off-road vehicles. / *ТЕКА*, 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” / *Автомобілівник України*, № 3, 2022. 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. Paderborn. BRD. 2014. 172 S.
13. Кайдалов Р.О., Баштовой В.М., Ларін О.О., Водка О.О., Баркалов В.Г. Математичне моделювання коливань спеціалізованого транспортного засобу з дворівневою системою підресорювання при переїзді одиначної дорожньої нерівності / *Системи озброєння і військової техніки*. № 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”*, № 27, Львів, 2023. 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*, НУ „Львівська політехніка”, Львів, 2020. 151 с.
17. Механічний вплив – [Arduino.ua](http://arduino.ua) / [https://arduino.ua / cat147 – mechanischeskie-vozdejstviya](https://arduino.ua/cat147-mechanischeskie-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. (2005), "Road Profiles: Mobile Measurement, Data Processing for Efficient Simulation and Assessment of Road Properties.", *VDI-Report No 1912*, Düsseldorf(Germany), pp. 335–352
23. ДСТУ 4521:2006. Техніка сільськогосподарська мобільна. Норми дії ходових систем на ґрунт / Київ, Держспоживстандарт, 2006. 8с.

24. ДСТУ 4977:2008. Техніка сільськогосподарська мобільна. Методи визначення максимального напруження в ґрунті під дією ходових систем/ Київ, Держспоживстандарт, 2008. 10с.

25. ДСТУ 4428:2005. Техніка сільськогосподарська 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»*, № 27, 2018. Харків, С.110-116.

27. ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначення твердості ґрунту твєрдоміром Рєвякіна. 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 лісостєпу України / *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. Вип.. 27, 2017, Подільський ДАТУ. С. 146 -158.

31. Richter R., Hoffmann B. Probleme des Einsatzes von Fahrzeugen auf landwirtschaftlich genutzten Boden / *Agrartechnik* 31 (9).1981. – S.419-421.

32. ISO 22476-1:2012. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.

Стаття надійшла 10.06.2024

Розділ 4

ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 621.384 / 534.232

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ ВОДООЧИСТКИ ТА ВОДОПІДГОТОВКИ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

*Вадим Пташник^{1,2}, к.т.н., Віктор Чумакевич^{3,4}, к.т.н., Ігор Пулеко^{4,5}, к.т.н.,
Юрій Бондаренко⁴, к.т.н., Вікторія Чумакевич³, Михайло Бабич¹, к.т.н.*

¹ Львівський національний університет природокористування, вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівська обл., Україна, e-mail: ptashnykproject@gmail.com (В.П.)

² Львівський національний університет ім. Франка, вул. Університетська, 1, м. Львів, Україна,

³ Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, e-mail: victoriachu21@gmail.com (В.Ч.)

⁴ 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.)

⁵ Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, e-mail: pulekoigor@ztu.edu.ua (І.П.)

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

У статті розглянуто питання удосконалення системи керування електроприводом насосу водоочисної системи цукрового заводу. На прикладі протічного діафрагмового електролізера зі споживаною потужністю 5 кВт та продуктивністю по аноліту 4,5-5 м³/год розглянуто роботу промислової водоочисної системи. Спираючись на відомі методики розрахунку проаналізовано дросельний та частотний метод керування електроприводом насосного агрегату. Зокрема, розраховано спожиту потужність, коефіцієнт корисної дії, момент, швидкість обертання валу, 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 у 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 секунди.

Ключові слова: система керування електроприводу, насосний агрегат, частотне керування.

Ptashnyk V., Chumakevych V-r., Puleko I., Bondarenko Yu., Chumakevych V-ia., Babych M. Justification of the Electric Drive Control System for Pump Unit of Water Treatment and Water Conditioning Choice Based on Computer Modeling.

The article deals with the issue of improving the control system of the electric drive of the pump of the water treatment system of the sugar factory. Using the example of a flow diaphragm electrolyzer with a power consumption of 5 kW and an anolyte productivity of 4.5-5 m³/h, the operation of an industrial water treatment system is considered. Based on the known calculation methods, the throttle and frequency control method of the electric drive of the pumping unit was analyzed. In particular, the consumed power, efficiency factor, torque, shaft rotation speed were calculated as functions of water flow with the provision of a given pressure. The efficiency coefficients of the installation with different control methods are calculated and the energy advantages of the frequency control method of the pumping unit are shown. At the same time, it was established that in the mode of frequency control of the engine, an increase in the hydraulic resistance of the system leads to a decrease in electricity savings. A nonlinear MathCAD model was used to study an asynchronous motor during direct start with a fan torque of a static load. According to the simulation results, it was found that during the start of the asynchronous drive of the pump, the engine very quickly enters the nominal mode of operation, but the moment constantly

pulsates. With the help of a mathematical model of the automatic control system, a comparison of the operation of open and closed systems was made. Analysis of the obtained Nyquist diagrams, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics showed an increase in the stability of operation for the closed system. Simulation of the use of P-, PI- and PID-regulators was carried out. All considered schemes initially provide good stabilization, but over time, P- and PI-regulators cause unstable operation of the system. And in a system with a PID controller, the selection of parameters made it possible to obtain a transient process lasting about 0.2 seconds.

Keywords: electric drive control system, pump unit, frequency control.

Постановка проблеми. Українське виробництво планомірно впроваджує європейські стандарти в області харчових технологій. Однією із важливих складових частин виробництва є його екологічна складова. Бурякоцукрове виробництво є в Україні традиційним, але, на жаль, досі використовує технології ХХ сторіччя. Сьогодні спостерігається впровадження нових систем очищення води на цукровому виробництві. З поміж багатьох установок для очищення [3, 7, 11] було обрано протічний діафрагмовий електролізер «ХЕКОМ-5» зі споживаною потужністю 5 кВт/год, блоком стабілізації та продуктивністю по аноліту 4,5 – 5 м³/год. Для надійної роботи таких систем [4, 15] необхідно стабілізувати потік води через очисні пристрої. Згідно характеристик пристрою необхідно забезпечити швидкість надходження рідини у електролізер на рівні 130 – 150 л/хв, або 7,8 – 9 м³/год. На об'єкті встановлено насоси з електричним приводом, тому досліджували питання удосконалення системи керування електроприводом насосу водоочисної установки на цукровому виробництві.

Мета дослідження полягає у 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 насосу. 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 факторів. Основними з них, ми вважаємо, є енергетичні показники. Ми повинні забезпечити подання необхідної кількості води при мінімальних витратах енергії. Розглянемо енергетичні показники при використанні дросельного та частотного способу керування насосними агрегатами.

Проілюструємо роботу водонасосних систем з регулювання подачі води

дросельованням. Насос споживає потужність P (Вт), яка визначається за формулою:

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta}, \quad (1)$$

де H – повний напір; Q – продуктивність (подача); ρ – щільність рідини; g – прискорення вільного падіння; η – 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 не змінний (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 $OECS$). Необхідно відмітити, що також зменшується і тиск в системі, а відповідно, і витрата води.

Розглянемо методику математичного обґрунтування енергоспоживання при різних способах регулювання напору насосу [1, 4, 15]:

$$H = H_{0н} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - C \cdot Q^2, \quad (2)$$

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.

В свою чергу конструктивний коефіцієнт насоса можна обчислити за формулою:

$$C = \frac{H_{0н} - H_{ном}}{Q_{ном}^2}. \quad (3)$$

Якщо позначити протитиск (статичний опір) 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:

$$P_1 = \frac{P_{мех}}{\eta_1} \quad 6)$$

де η_1 – 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:

$$\eta_1 = \frac{(1 - S_{ном})}{(a \cdot S_{ном} + 1)} \quad 7)$$

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 в сталі та втрат неробочого

ходу, а також незмінному номінальному ковзанні коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна насоса можна знайти за формулою:

$$\eta_1 = \frac{I}{I + \frac{\omega_{ном}}{\omega} \cdot \frac{S_{ном}}{1 - S_{ном}} \cdot (1 + a)} \quad 8)$$

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:

$$\mu = \mu_{0c} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 + (1 - \mu_{0c}) \cdot \frac{\omega}{\omega_{ном}} \cdot \sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - h_c} \quad 10)$$

де μ_{0c} – статичний відносний момент на валу при закритій заслінці ($Q_* = 0$).

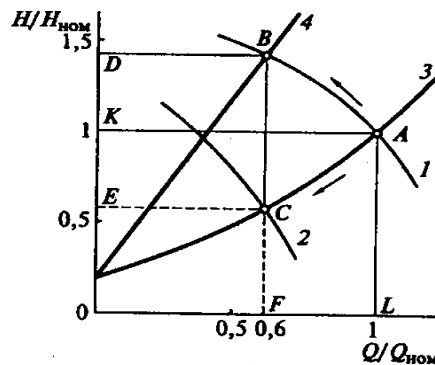


Рис. 1. Характеристика продуктивності відцентрового насоса при дросельному і частотному регулюванні [15]: 1 – характеристика нерегульованого електроприводу насоса при номінальній швидкості обертання; 2 – характеристика регульованого електроприводу; 3 – графік, що характеризує роботу магістралі при мінімальному гідравлічному опорі; 4 – графік, який характеризує роботу магістралі при збільшеному гідравлічному опорі; A – початкова точка дослідження, засувка повністю відкрита; B – нерегульований електропривод, засувка частково закрита; C – 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 [15]: 1 is a characteristics of the non-regulated electric drive of the pump at the nominal speed of rotation; 2 is a characteristics of the adjustable electric drive; 3 is a graph characterizing the operation of the main line at minimum hydraulic resistance; 4 is a graph characterizing the operation of the pipeline with increased hydraulic resistance; A is the starting point of the study, the latch is fully open; B is a non-regulated electric drive, the latch is partially closed; C is a decrease in the speed of rotation of the electric drive of the pump motor, the valve is open; D is a maximum relative pressure; E is a minimum relative pressure; F is a point on the abscissa axis corresponding to the minimum relative productivity; K is a point on the ordinate axis corresponding to unit relative pressure; L is a point on the abscissa axis corresponding to unit relative productivity

Вирази (9) та (10) дозволяють визначити основні характеристики (спожиту потужність, коефіцієнт корисної дії, момент, швидкість обертання) у функції витрати води при заданому тиску. Для зручності порівняння виразимо потужність P_I у відносних одиницях в залежності від витрати рідини Q . Базовою величиною оберемо номінальну потужність $P_{ном}$ та номінальний момент $M_{ном}$. Запишемо вирази для дросельного:

$$P_{I*} = \frac{(\mu_{0c} + (1 - \mu_{0c}) \cdot Q_*) (1 + a \cdot S_{ном})}{1 - S_{ном}} \quad (11)$$

та частотного керування:

$$P_{I*} = (\mu_{0c} \cdot A^3 + (1 - \mu_{0c}) \cdot A^2 \cdot Q_*) \left(1 + \frac{S_{ном} \cdot (1 + a)}{(1 - S_{ном}) \cdot A} \right) \quad (12)$$

Результати проведених розрахунків для $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,04$ наведено в Табл. 1 та Табл. 2, а також на Рис. 2 та Рис. 3.

Таблиця 1. Споживана електроприводом відцентрового насоса потужність при дросельному і частотному керуванні в залежності 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 написати в умовних одиницях при постійному коефіцієнті корисної дії двигуна:

$$Q_* = \frac{Q}{Q_{ном}} = \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \quad (13)$$

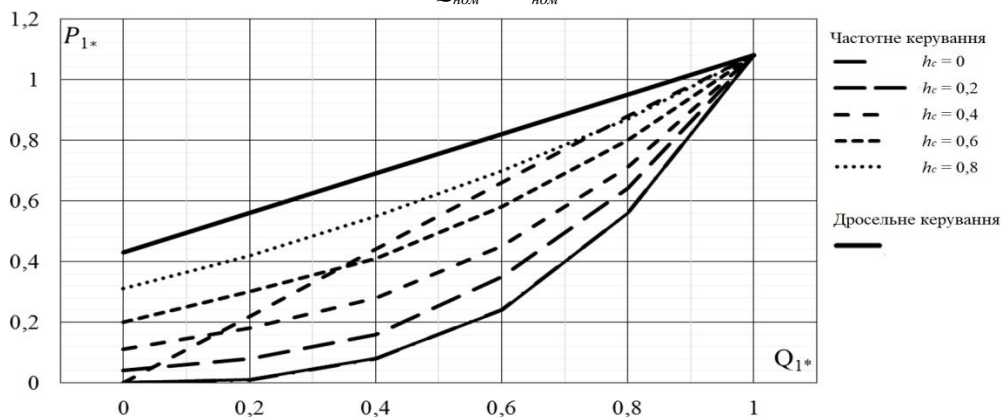


Рис. 2. Залежність $P_{I*} = f(Q_*)$ у режимі дросельного і частотного керування при $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,04$

Fig. 2. Dependence $P_{I*} = f(Q_*)$ in throttle and frequency control mode at $\mu_{0c} = 0,4$; $a = 1$; $S_{ном} = 0,04$

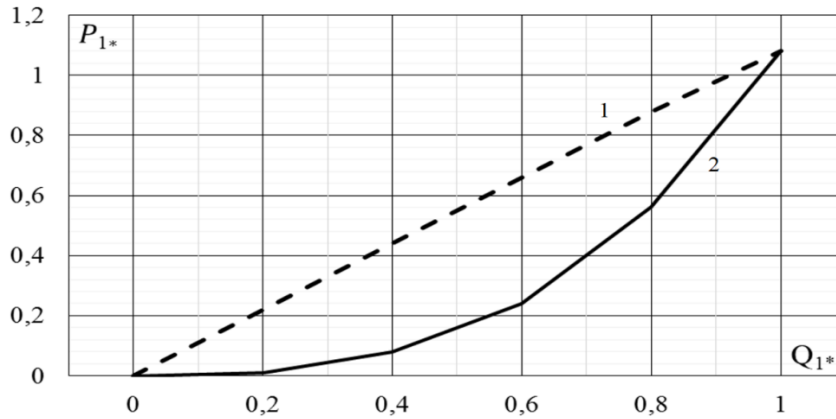


Рис. 3. Залежність $P_{1*} = f(Q_{1*})$ при дросельному (крива 1) і частотному (крива 2) керуванні при $\mu_{0c} = 0,4$; $H_c = 0$

Fig. 3. Dependence $P_{1*} = f(Q_{1*})$ with throttle (curve 1) and frequency (curve 2) control at $\mu_{0c} = 0,4$; $H_c = 0$

$$H_* = \frac{H}{H_{\text{ном}}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2; \quad (14)$$

$$M_* = \frac{M}{M_{\text{ном}}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2; \quad (15)$$

$$P_{\text{мех}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{ном}}} = \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{мех}}} \right)^3. \quad (16)$$

де $\omega_{\text{ном}}$ – номінальна швидкість обертання двигуна; $M_{\text{ном}}$ – номінальний момент двигуна; $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність двигуна.

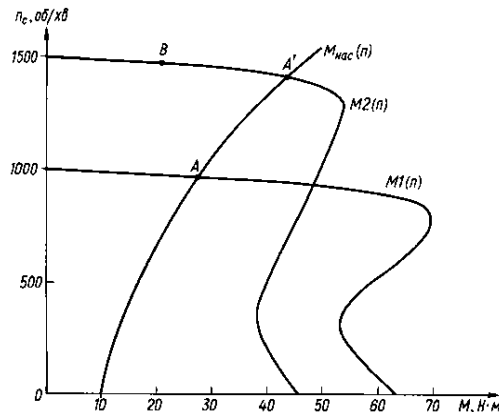


Рис. 4. Механічні характеристики асинхронних двигунів з рівними швидкостями обертання $M_1(n)$, $M_2(n)$ та статичний момент вентиляторного навантаження $M_{\text{нас}}(n)$

Fig. 4. Mechanical characteristics of asynchronous motors with equal rotation speeds $M_1(n)$, $M_2(n)$ and static fan load moment $M_{\text{нас}}(n)$

Виклад основного матеріалу. Згідно відомих методик визначимо потужність електродвигуна для перекачування води об'ємом 150 л/хв ($9\text{ м}^3/\text{год}$):

$$P_0 = \frac{K_s \cdot Q_p \cdot H_p \cdot \rho \cdot g \cdot 10^{-3}}{3600 \cdot \eta_p}, \quad (17)$$

де K_s – коефіцієнт запасу; H_p – робоча точка насоса; η_p – К.К.Д.; ρ – щільність води; g – прискорення вільного падіння.

Згідно вихідних даних ($K_s = 1,1$; $\eta_p = 0,73$; $H_p = 540$ м; $\rho = 997$ кг/м³) розрахункова потужність складає $P_0 = 19,9$ кВт.

Двигуни, які встановлюються у приміщення водонасосних станцій [2, 3, 12, 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 U2. Виходячи з отриманого значення P_0 та накладених обмежень обираємо найближчу більшу стандартну потужність двигуна P_n , орієнтуючись на трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим

ротором [6, 9, 10, 14, 16]. 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 приведено у Табл. 3.

Діючий струм двигуна (А) визначимо за формулою:

$$I_\phi = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} \quad (18)$$

Коефіцієнт завантаження двигуна визначаємо за формулою:

$$K_z = \frac{P_\phi}{P_n} = \frac{19,96}{22} = 0,91. \quad (19)$$

Перерахуємо табличні значення ряду параметрів у фактичні з використанням коефіцієнта завантаження $K_z = 1$; $\cos \varphi_\phi = 0,81$; $\eta_\phi = 82,1\%$. Для розрахунку фактичного струму двигуна (А) використаємо формулу:

$$I_\phi = \frac{K_z \cdot P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi_\phi \cdot \eta_\phi} \quad (20)$$

Здійснимо перерахунок решти параметрів, а результати занесемо до Табл. 3.

Таблиця 3. Технічні характеристики асинхронного двигуна типу АИР-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 К.К.Д., η_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 ²	0,063	0,063
Маса, m	кг	160	160

В літературі [1, 5, 8, 14, 16, 17] 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 вийти на номінальний режим під час пуску, але момент постійно пульсує. Коливання моменту є не значними, але для надійної роботи очисних пристроїв бажано мати сталу швидкість та момент на валу двигуна.

Для проведення дослідження використаємо математичну модель системи автоматичного керування наведено на Рис. 7. Проведено порівняння роботи розімкненої (Рис. 8) та замкненої (Рис. 9) систем. Зокрема аналіз отрима-

них 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, в той час як у замкненій системі спад амплітуди відбувається на частоті понад 10 Гц.

Комп'ютерне моделювання використання П- (Рис. 10,а) та ПІ-регуляторів (Рис. 10,б) спочатку показує гарну стабілізацію контрольованого параметру, але з часом відбувається його значне розхитування, що спричинить нестійку роботу усієї системи, причому проведений авторами підбір параметрів інтегральної складової регулятора не дозволить повністю усунути отримані коливання контрольованого параметру.

Розрахунок режиму прямого пуску асинхронної машини за нелінійною моделлю основи формули Клосса з вентиляторним моментом навантаження

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} s \leftarrow \frac{\omega_0 - y_1}{\omega_0} \\ M \leftarrow \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \\ T_e \leftarrow \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k} \\ \frac{M - y_0}{T_e} \\ y_0 - \left[\frac{50 + 0.058 \cdot (y_1)^2}{J} \right] \end{bmatrix}$$

Вектор-функція правих частин системи диференціальних рівнянь

$y_0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ Вектор початкових умов

$M_k(\omega) := 50 + 0.058 \cdot \omega^2$
Модель вентиляторного моменту статичного навантаження

$\text{Rez3} := \text{Rkadapt}(y, 0, 5, N, D)$ $t := \text{Rez3}^{(0)}$ $M := \text{Rez3}^{(1)}$ $\omega := \text{Rez3}^{(2)}$

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

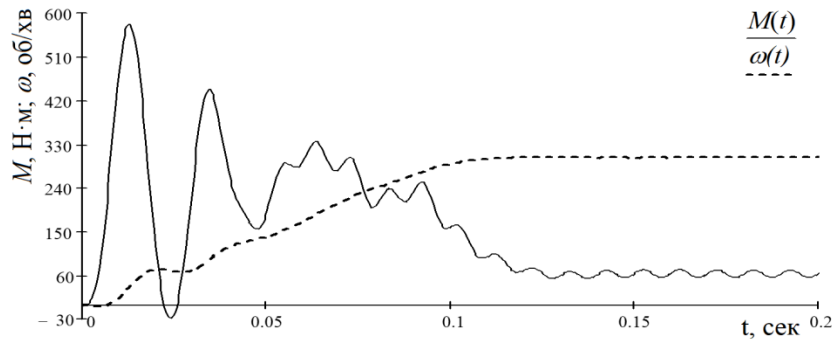


Рис. 6. Результати моделювання моменту $M(t)$ та кутової швидкості $\omega(t)$ під час пуску асинхронного приводу насоса

Fig. 6. Results of simulation of moment $M(t)$ and angular velocity $\omega(t)$ during start-up of asynchronous pump drive

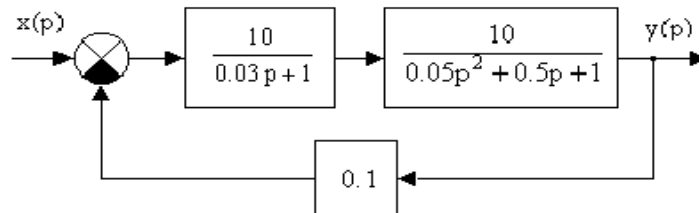


Рис. 7. Математична модель асинхронного приводу
Fig. 7. Mathematical model of asynchronous drive

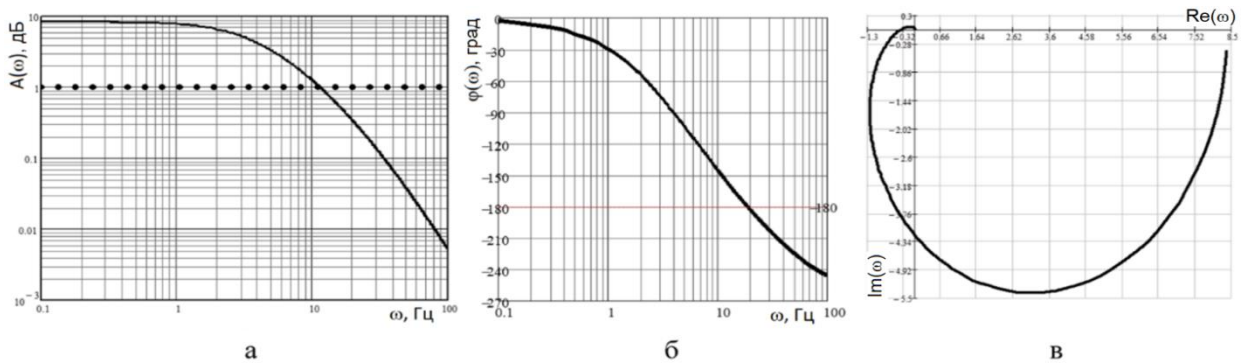


Рис. 8. Логарифмічна амплітудно-частотна (а), фазо-частотна (б) характеристики та діаграма Найквіста (в) розімкненої системи

Fig. 8. Logarithmic amplitude-frequency (a), phase-frequency (б) characteristics and Nyquist diagram (в) of the open system

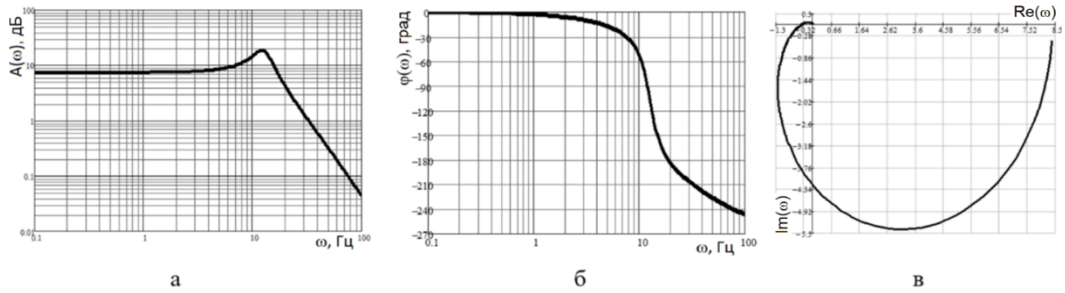


Рис. 9. Лагорифмічна амплітудно-частотна (а), фазо-частотна (б) характеристики та діаграма Найквіста (в) замкненої системи

Fig. 9. Logarithmic amplitude-frequency (a), phase-frequency (б) characteristics and Nyquist diagram (в) of the close system

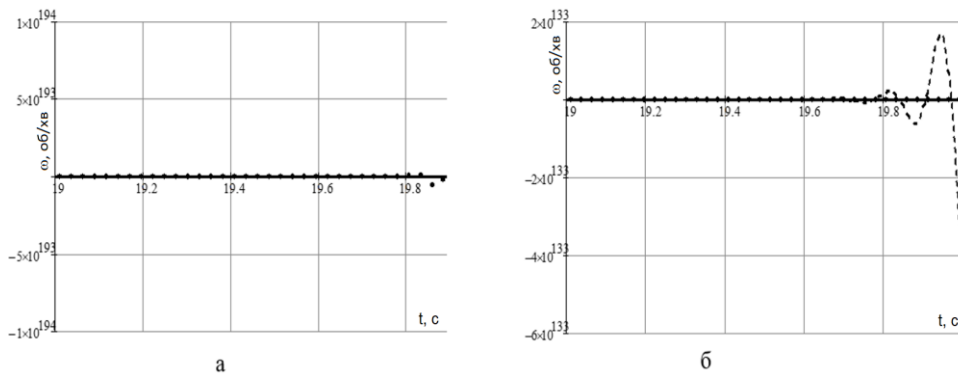


Рис. 10. Перехідні процеси при використанні П-регулятора (а), ПІ-регулятора (б)
Fig. 10. Transient processes when using the P-controller (a), PI-controller (b)

Під час моделювання роботи ПІД-регулятора, проведено підбір параметрів моделі з метою пришвидшення впливу регулятора на систему та скороченню загального часу стабілізації системи. Результати моделювання (Рис. 11) з різними параметрами показали ефективність підбору та

підтвердили можливість забезпечити тривалість перехідного процесу близько 0,2 секунд. Крім того результати моделювання показують, що стабілізація системи розпочинається одразу після зміни сигналу керування.

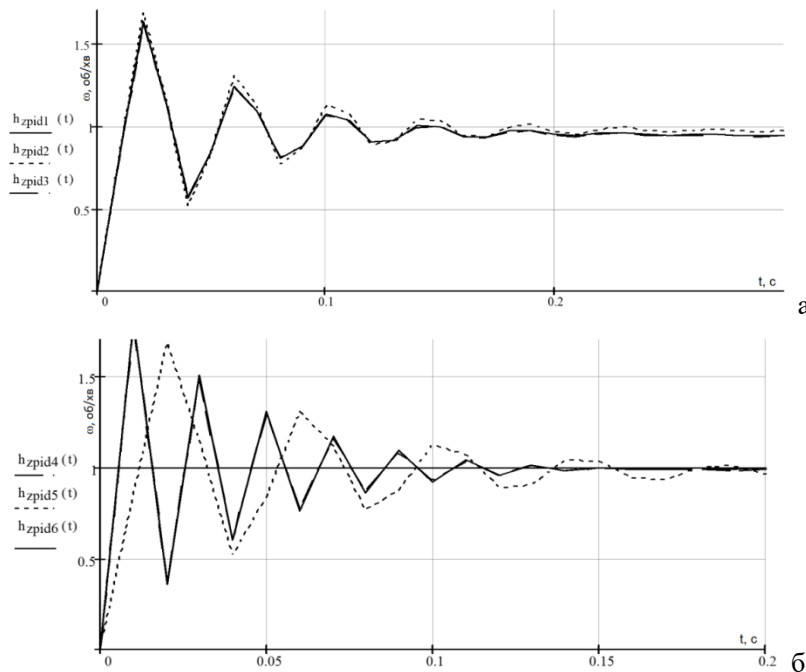


Рис. 11. Перехідні процеси при використанні ПІД-регулятора з різними параметрами
Fig. 11. Transient processes when using a PID-controller with different parameters

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, коефіцієнту корисної дії, моменту та швидкості обертання валу, 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 заслонкою. Так спожита потужність відрізняється у 1,57-22 рази, залежно від рівня споживання води. Водночас встановлено, що у 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». У той же час використання ПІД регуляторів дозволяє отримати перехідні процеси тривалістю до 0,2 секунди.

Бібліографічний список

1. Aayushi A., Aayushi S., Aditya M., Bhavnesh 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.
2. Ferdiansyah I., Raharja L., Yanaratri D., Purwanto E. Design of PID Controllers for Speed Control of Three Phase Induction Motor Based on Direct-Axis Current Coordinate Using IFOC. *4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering*. Yogyakarta, Indonesia, 2019. P. 369-372.
3. Janisz K., Bordun I., Ptashnyk V., Pohrebennyk V. Role of Ionic Transport in the Electrochemical Activation of Water Solutions. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014. Vol. 90, № 1. P. 80-83.
4. Noh M., Najib M., Abdullah N. S. Simulator of Water Tank Level Control System Using PID-Controller. *Int. Conf. On Water Resources, Hydraulics & Hidrology*. University of Cambridge, 2008. P. 168-171.
5. Paranchuk Y., Evdokimov P., Kuznyetsov O., Electromechanical positioning system with a neuro-fuzzy corrector. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96, № 9. P. 52-55.
6. 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.
7. Patel R. K., Shankar R., Khare P., Mondal P. Treatment of sugar processing industry wastewater using copper electrode by electrocoagulation: Performance and economic study. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2022. Vol. 99, № 8. P. 100563.
8. Sakhara S, Brahimi M, Nacib L, Layadi T. Application of a wavelet neural network approach to detect stator winding short circuits in asynchronous machines. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023. Vol. 2023, № 3. P. 21-27.
9. 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, № 2. P. 308-317.
10. Spooner J., Maggiore M., Ordenez R. Passino K. Stable Adaptive Control and Estimation for Nonlinear Systems, A John Wiley & Sons, 2002. 539 p.
11. 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.
12. Грабко В. В., Мошноріз М. М. Методи та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання. Вінниця: ВНТУ, 2011. 138 с.
13. Жулай Є. Л. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній. Київ: Вища освіта, 2001. 288 с.
14. Костинюк Л. Д., Мороз В. І., Паранчук Я. С. Моделювання електроприводів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2004. 428 с.
15. Марченко О. С., Лаврінченко Ю. М., Савченко П. І., Жулай Є. Л. Електропривід. Київ: Урожай, 1995. 260 с.
16. Толочко О. І. Моделювання електро механічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
17. 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: збірник наукових праць*. Житомир, 2009. №2. С. 140-147.

Стаття надійшла: 15.05.24.

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 żółkowski,
obwód lwowski, Ukraina,
e-mail: vitaliy_levoniuk@ukr.net*

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 dystrybucji 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 przeanalizowane 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.

Analysis of transient processes in a part of the ultra-high voltage electrical network that contains shunt reactors

The article analyzes scientific publications related to the study of transient processes in elements of electrical networks, the key elements of which are long power lines with distributed parameters and shunt reactors, during normal and emergency modes of operation. The analysis showed that the issue of researching transient processes in long power transmission lines is relevant, but insufficiently disclosed regarding transient processes involving shunt reactors. On the basis of a generalized interdisciplinary modeling method, which is based on a modification of the integral Hamilton-Ostrogradski variational principle, a mathematical model of a fragment of the electrical network is built, the main elements of which are long power lines with distributed parameters, which includes air chokes. The model is presented in a single-line version. The developed mathematical model is based on the equation of a long line with partial derivatives of the second order. It is proposed to use the Neumann and Poincaré boundary conditions to solve the mentioned equation. The object model was implemented using numerical methods by distretization of line equations by the straight line method. The search for the voltage in the fictitious node of the power transmission line was carried out and its appearance was presented. On the basis of the developed mathematical model, a program code was written in the algorithmic programming language Visual Fortran, with the help of which numerical experiments were carried out. Using this model, electromagnetic transient processes in the power system in the state of a symmetrical three-phase fault were analyzed. The results of the computer simulation are presented in the form of drawings that have been analyzed. Also provided recommendations for potential users.

Key words: transient electromagnetic processes, shunt reactor, long line, mathematical model, boundary conditions, the 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 znany, że najbardziej niebezpiecznym z punktu widzenia przewodów linii jest stan symetrycznego trójfazowego zwarcia, co daje nam podstawę dla modelowania linii zasilania w jednofazowym wariancie. A znaczy pominąć matematyczne operacji dla równań macierzowo-wektorowych [1].

Jest jasnym, że analiza procesów nieustalonych 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 pomoc metody napięć węzłowych, a ich rozwiązanie przeprowadzono za pomoc metod numerycznych. Wyniki symulacji procesów nieustalonych 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

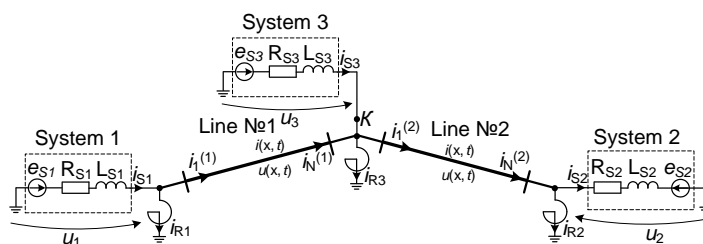
oprogramowania *MathCad*. Model matematyczny pozwala odtworzyć charakter zmiany prądu zwarciowego w czasie oraz analizę przejściowych procesów elektromagnetycznych zachodzących się w sieci elektrycznej.

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.



Rys. 1. Fragment otwartej sieci elektrycznej
Fig. 1. Fragment of an open electrical network

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].

Rozszerzona funkcjonalność operacji matematycznej dla badanego układu według

$$L^* = \tilde{T}^* - P^* + \Phi^* - D^*, \quad (2)$$

gdzie L^* – rozszerzona funkcja Lagrange'a, \tilde{T}^* – energia kinetyczna, P^* – energia potencjalna, Φ^* –

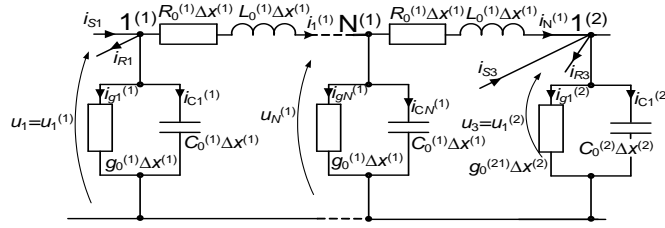
Hamiltona-Ostrogradskiego będzie podobna do tej przedstawionej w [5], [6]:

$$S = \int_0^t L^* dt + \int_0^t \int_l L_l dl dt, \quad I = \int_l L_l dl, \quad (1)$$

gdzie S – akcja według Hamiltona-Ostrogradskiego, L^* – rozszerzona funkcja Lagrange'a, L_l – gęstość liniowa zmodyfikowanej funkcji Lagrange'a, I – energia funkcjonalna.

rozpraszanie energii, D^* – energia zewnętrznych sił niepotencjalnych.

Przedstawimy schemat połączeń elementów analizowanego fragmentu sieci elektrycznej.



Rys. 2. Schemat zastępczy połączeń elementów analizowanego fragmentu sieci elektrycznej
Fig. 2. Equivalent diagram of connecting elements of the analyzed part of the electrical network

Zapisać elementy rozszerzonej funkcji Lagrange'a [5]

$$T^* = \frac{L_{S1} i_{S1}^2}{2} + \frac{L_{S2} i_{S2}^2}{2} + \frac{L_{S3} i_{S3}^2}{2} + \frac{L_{R,m} i_{R,m}^2}{2}, \quad (3)$$

$$m = 1, 2, 3;$$

$$\Phi^* = \frac{1}{2} \int_0^t (R_{S1} i_{S1}^2 + R_{S2} i_{S2}^2 + R_{S3} i_{S3}^2 + R_{R,m} i_{R,m}^2) dt, \quad (4)$$

$$m = 1, 2, 3;$$

$$D^* = \int_0^t (e_{S1} i_{S1} + e_{S2} i_{S2} + e_{S3} i_{S3}) dt; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T^{(k)}}{\partial x} \equiv T_l^{(k)} = \frac{I_0^{(k)} Q_t^{2(k)}(x,t)}{2},$$

$$\frac{\partial P^{(k)}}{\partial x} \equiv P_l^{(k)} = \frac{1}{2C_0^{(k)}} Q_x^{2(k)}(x,t), \quad (6)$$

gdzie

$$Q_t^{(k)} \equiv \frac{\partial Q^{(k)}(x,t)}{\partial t} = i^{(k)}(x,t),$$

$$Q_x^{(k)} \equiv \frac{\partial Q^{(k)}(x,t)}{\partial x}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(k)}}{\partial x} \equiv \Phi_l^{(k)} = \Phi_{I3}^{(k)} - \Phi_{IB}^{(k)}$$

$$= \int_0^t \left(\frac{R_0^{(k)}}{2} Q_t^{2(k)}(x,t) - \frac{g_0^{(k)}}{2C_0^{2(k)}} Q_x^{2(k)}(x,t) \right) dt, \quad (8)$$

$$k = 1, 2.$$

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; Φ_{I3} – gęstość liniowa zewnętrznego rozpraszania energii; Φ_{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], [8], [9]. Dlatego do syntezy syntetycznej proponujemy skończone równania stanu elektromagnetycznego obiektu, rys.1.

$$\frac{\partial v^{(k)}}{\partial t} = \left(C_0^{(k)} L_0^{(k)} \right)^{-1} \left(\frac{\partial^2 u^{(k)}}{\partial x^2} - \left(g_0^{(k)} L_0^{(k)} + C_0^{(k)} R_0^{(k)} \right) v^{(k)} - g_0^{(k)} R_0^{(k)} u^{(k)} \right), \quad \frac{\partial u^{(k)}}{\partial t} = v^{(k)}; \quad (9)$$

$$\frac{di_{S1}}{dt} = \frac{1}{L_{S1}} (e_{S1} - R_{S1} i_{S1} - u_1),$$

$$\frac{di_{S2}}{dt} = \frac{1}{L_{S2}} (u_2 - R_{S2} i_{S2} - e_{S2}); \quad (10)$$

$$\frac{di_{S3}}{dt} = \frac{1}{L_{S3}} (e_{S3} - R_{S3} i_{S3} - u_3); \quad (11)$$

$$\frac{di_{R,m}}{dt} = \frac{1}{L_{R,m}} (u_m - R_{R,m} i_{R,m}),$$

$$m = 1, 2, 3,$$

tutaj u_1, u_2, u_3 – napięcia w obwodach podstacyjnych 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

$$u_1^{(k)} = u(x, t)|_{x=0}, \quad u_N^{(k)} = u(x, t)|_{x=l}, \quad u_1^{(1)} \equiv u_1, \quad u_1^{(2)} \equiv u_3, \quad u_N^{(1)} \neq u_3, \quad u_N^{(2)} \neq u_2; \quad (15)$$

$$-\frac{u_{j+1}^{(k)} - u_{j-1}^{(k)}}{2\Delta x^{(k)}} = R_0^{(k)} i_j^{(k)} + L_0^{(k)} \frac{di_j^{(k)}}{dt}; \quad (16)$$

$$\frac{du_j^{(k)}}{dt} = v_j^{(k)}, \quad j = 1, \dots, N,$$

$$k = 1, 2. \quad (17)$$

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):

$$i_{S1} - i_1^{(1)} - i_{g1}^{(1)} - i_{C1}^{(1)} - i_{R1} = 0,$$

$$i_{g1}^{(1)} = \Delta x^{(1)} g_0^{(1)} u_1^{(1)}; \quad (18)$$

$$i_{C1}^{(1)} = \Delta x^{(1)} C_0^{(1)} \frac{du_1^{(1)}}{dt} = \Delta x^{(1)} C_0^{(1)} v_1^{(1)}. \quad (19)$$

Różniczkując w czasie (18) i (19), otrzymujemy

$$\frac{di_{S1}}{dt} - \frac{di_1^{(1)}}{dt} - \frac{di_{g1}^{(1)}}{dt} - \frac{di_{C1}^{(1)}}{dt} - \frac{di_{R1}}{dt} = 0,$$

$$\frac{di_{g1}^{(1)}}{dt} = \Delta x^{(1)} g_0^{(1)} v_1^{(1)}; \quad (20)$$

$$\frac{di_{C1}^{(1)}}{dt} = \Delta x^{(1)} C_0^{(1)} \frac{dv_1^{(1)}}{dt}. \quad (21)$$

Teraz, na podstawie (16) i rys. 2, zapiszemy:

$$\frac{di_1^{(1)}}{dt} = \frac{1}{L_0^{(1)}} \left(\frac{u_0^{(1)} - u_2^{(1)}}{2\Delta x^{(1)}} - R_0^{(1)} i_1^{(1)} \right); \quad (22)$$

$$\frac{di_N^{(1)}}{dt} = \frac{1}{L_0^{(1)}} \left(\frac{u_{N-1}^{(1)} - u_{N+1}^{(1)}}{2\Delta x^{(1)}} - R_0^{(1)} i_N^{(1)} \right); \quad (23)$$

$$\frac{di_N^{(1)}}{dt} = \frac{1}{L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}} \left(u_N^{(1)} - R_0^{(1)} \Delta x^{(1)} i_N^{(1)} - u_1^{(2)} \right). \quad (24)$$

Podstawiając w pierwsze równanie wzoru (20) pierwsze równanie z (10), drugie równanie z (20) ze względem (12), (23) przy $m = 1$, otrzymujemy:

$$\frac{1}{L_{S1}} (e_{S1} - R_{S1} i_{S1} - u_1) - \frac{1}{L_0^{(1)}} \left(\frac{u_0^{(1)} - u_2^{(1)}}{2\Delta x^{(1)}} - R_0^{(1)} i_1^{(1)} \right) -$$

$$-\Delta x^{(1)} g_0^{(1)} v_1^{(1)} - \Delta x^{(1)} C_0^{(1)} \frac{dv_1^{(1)}}{dt} - \frac{1}{L_{R1}} (u_1 - R_{R1} i_{R1}) = 0. \quad (25)$$

Zastępując (14) do (25), który jest napisany dla pierwszego węzła dyskretyzacyjnego dla pierwszej linii i czerpiącego z niego napięcie, otrzymamy:

$$u_0^{(1)} = \frac{2\Delta x^{(1)} L_0^{(1)}}{3} \left[\frac{1}{L_{S1}} (e_{S1} - R_{S1} i_{S1} - u_1^{(1)}) - \frac{1}{L_{R1}} (u_1 - R_{R1} i_{R1}) + \left(\frac{\Delta x^{(1)} g_0^{(1)} R_0^{(1)}}{L_0^{(1)}} + \frac{2}{L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}} \right) u_1^{(1)} - \frac{1}{2L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}} u_2^{(1)} - \left[\Delta x^{(1)} g_0^{(1)} - \frac{\Delta x^{(1)} (g_0^{(1)} L_0^{(1)} + C_0^{(1)} R_0^{(1)})}{L_0^{(1)}} \right] v_1^{(1)} + \frac{R_0^{(1)}}{L_0^{(1)}} i_1^{(1)} \right]. \quad (26)$$

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 węzle $u_{N+1}^{(1)}$ wynosi:

$$u_{N+1}^{(1)} = -2(u_N^{(1)} - u_1^{(2)}) + u_{N-1}^{(1)}. \quad (28)$$

Ze względu na ograniczenia przestrzenne nie dostarczymy wyników dla napięcia w fikcyjnych węzłach drugiej linii, ale zapewnimy wyrażen skończonych:

$$u_0^{(2)} = \frac{2\Delta x^{(2)} L_0^{(2)}}{3} \left[\frac{(u_N^{(1)} - R_0^{(1)} \Delta x^{(1)} i_N^{(1)} - u_1^{(2)})}{L_0^{(1)} \Delta x^{(1)}} + \frac{1}{L_{S3}} (e_{S3} - R_{S3} i_{S3} - u_1^{(2)}) - \frac{1}{L_{R3}} (u_3 - R_{R3} i_{R3}) + \left(\frac{\Delta x^{(2)} g_0^{(2)} R_0^{(2)}}{L_0^{(2)}} + \frac{2}{L_0^{(2)} \Delta x^{(2)}} \right) u_1^{(2)} + \frac{R_0^{(2)}}{L_0^{(2)}} i_1^{(2)} - \frac{1}{2L_0^{(2)} \Delta x^{(2)}} u_2^{(2)} - \left[\Delta x^{(2)} g_0^{(2)} - \frac{\Delta x^{(2)} (g_0^{(2)} L_0^{(2)} + C_0^{(2)} R_0^{(2)})}{L_0^{(2)}} \right] v_1^{(2)} \right]; \quad (29)$$

$$u_{N+1}^{(2)} = \frac{2L_0^{(2)} \Delta x^{(2)} L_{R2} L_{S2}}{L_{R2} L_{S2} + L_0^{(2)} \Delta x^{(2)} (L_{S2} + L_{R2})} \left[\frac{u_N^{(2)}}{L_0^{(2)} \Delta x^{(2)}} - \frac{R_0^{(2)}}{L_0^{(2)}} i_N^{(2)} + \frac{R_{R2}}{L_{R2}} i_{R2} + \frac{(R_{S2} i_{S2} + e_{S2})}{L_{S2}} \right] + u_{N-1}^{(2)} - 2u_N^{(2)}. \quad (30)$$

Obecny w linii można znaleźć poprzez dyskretyzację (13) metodą skończonej różnicy, używając pojęcia odpowiedniej pochodnej [5]:

$$\frac{di_j^{(k)}}{dt} = \frac{1}{L_0^{(k)} \Delta x^{(k)}} (u_j^{(k)} - u_{j+1}^{(k)}) - \frac{R_0^{(k)}}{L_0^{(k)}} i_j^{(k)}, \quad j = 1, \dots, N,$$

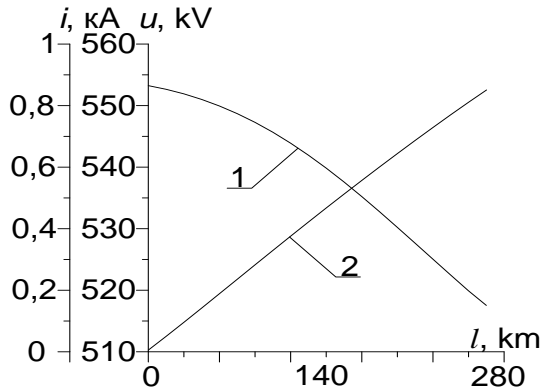
$$k = 1, 2. \quad (31)$$

Wspólnemu całkowaniu podlega: (10) – (12), (14), (17), (31) z uwzględnieniem (26), (28) – (30).

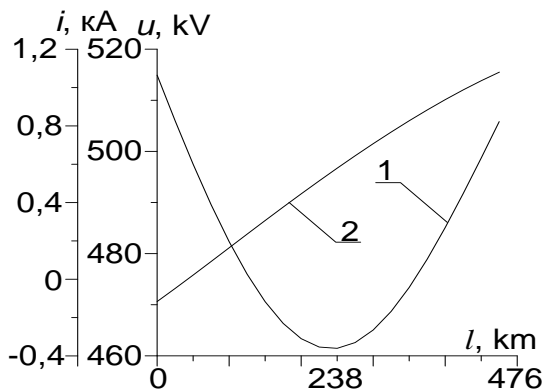
Wyniki symulacji komputerowej. Przeprowadzono symulację komputerową w celu analizy procesów nieustalonych podczas wyjścia systemu w stan ustalony i pracy w stanie zwarciovym. W chwili $t = 0$ s wszystkie siły elektromotoryczne zostały włączone, po wejściu układu w stan

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, $R_{S1} = 2,35$ Om, $R_{S2} = 2,6$ Om, $R_{S3} = 2,1$ Om, $L_{S1} = 0,2$ H, $L_{S2} = 0,15$ H, $L_{S3} = 0,17$ H.: $R_0 = 1,9 \cdot 10^{-5}$ Om/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.

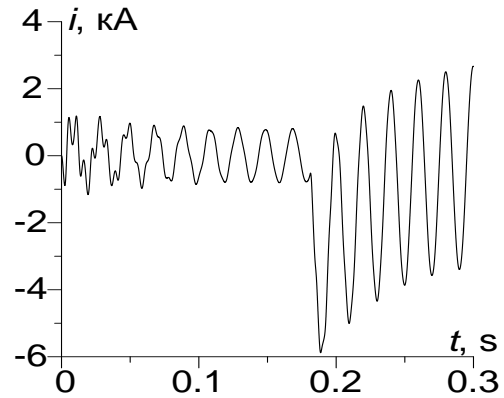


Rys. 3. Rozkład przestrzenny napięcia (1) i prądu (2) na linii Nr 1 w czasie $t = 0.006$ s
Fig. 3. Spatial distribution of voltage (1) and current (2) on line No. 1 at time $t = 0.006$ s

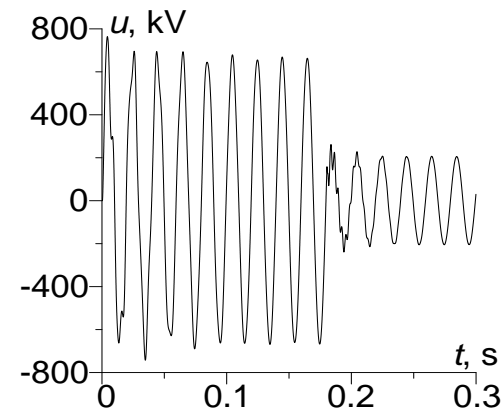


Rys. 4. Rozkład przestrzenny napięcia (1) i prądu (2) na linii Nr 2 w czasie $t = 0.006$ s
Fig. 4. Spatial distribution of voltage (1) and current (2) on line No. 2 at time $t = 0.006$ s

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.

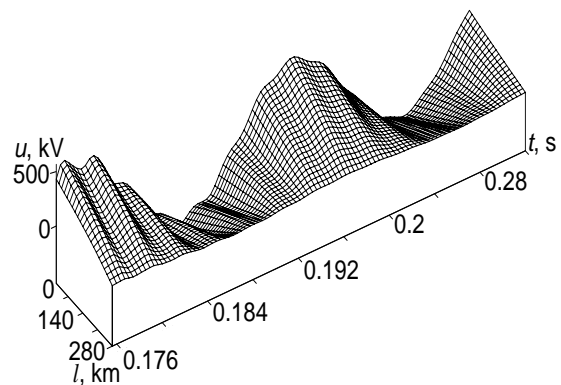


Rys. 5. Prąd w końcu linii Nr 2
Fig. 5. Current at the end of line No. 2

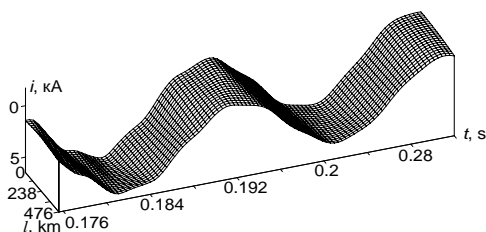


Rys. 6. Napięcie w połowie linii Nr 1
Fig. 6. Voltage in the middle of line No. 1

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 uderowy 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 bierniej.

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 rodzaju do równania długiej linii elektroenergetycznej.

Lista bibliograficzna

1. Lezhniuk P., Kulyk V., Natrebskiy 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

УДК 621.313

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*

Гречин Д., Дробот І., Гошко М., Філіпович В. Дослідження відхилення напруги від номінального значення у системі електропостачання підприємства Під якістю електроенергії розуміється ступінь відповідності фактичних значень параметрів електроенергії значенням, зазначеним в ГОСТ 13109-97. У нашому дослідженні мова йде про відхилення напруги, нормальні значення яких становлять +5 або -5%, а граничні +10 або -10% по ГОСТ 13109-97. Коливання напруги в мережі залежать від потужності джерела живлення, потужності, що втрачається під час передачі електроенергії 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 викликає 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 величини напруги. З підвищенням напруги ККД лампи зростає, але термін її служби зменшується.

Дана робота присвячена актуальним питанням експлуатації електромережі підприємства. Сучасні дослідницькі та аналітичні методи дозволили досягти чудових результатів у різних сферах. Зокрема, програмне забезпечення MATLAB/Simulink дозволяє аналізувати параметри роботи електромереж у різних режимах та з різними параметрами роботи. Для розрахованого електропостачання підприємства побудувати модель системи електропостачання і на ній дослідити відхилення напруги від номінального значення.

В 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 у межах від $0,2S_n$ до $1,2S_n$. Дослідження проведено на предмет відхилення напруги у 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 в основному відхилення знаходяться у 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.

Ключові слова: електропостачання, модель, напруга, гранично допустиме значення відхилення напруги.

Grechyn D., Drobot I., Hoshko M., Filipovych V. Study of voltage deviation from the nominal value in the electrical supply systems of the enterprise

The quality of electricity means the degree of conformity of the actual values of the parameters of electricity with the values specified in GOST 13109-97. In our study, we are talking about voltage deviations, the normal values of which are +5 or -5%, and the limit values are +10 or -10% according to GOST 13109-97. Voltage fluctuations in the network depend on the power of the power source, the power lost during transmission and the power of the electrical equipment. The most common consumers of electricity are asynchronous motors, the power of which is proportional to the square of the voltage, so the losses are much greater. When the voltage is lost, the speed of rotation of the motor also decreases, which causes an increase in slippage. Current also increases, efficiency decreases, and insulation wears out faster. When the voltage drops, the engine's starting torque and mechanical characteristics deteriorate.

In electrical equipment, voltage losses lead to a decrease in power, an increase in time spent on technical and production processes, and therefore to a deterioration in productivity and product quality. In the case of a decrease in voltage, the lighting also deteriorates, since the luminous flux depends on the value of the voltage. As the voltage increases, the efficiency of the lamp increases, but its service life decreases.

The efficiency of converting electrical energy into other types depends to some extent on the quality of the electricity

itself. Research is aimed at analyzing processes in electrical networks, power losses, oscillatory processes, voltage level, etc. remain relevant. Modern research methods are based in most cases on the use of modeling

This work is devoted to the actual issues of operation of the company's power grid. Modern research and analytical

methods have made it possible to achieve excellent results in various fields. In particular, the MATLAB/Simulink software allows you to analyze the operation parameters of power networks in different modes and with different operation parameters.

The article presents a built model of the calculated power supply system of the enterprise in the MATLAB/Simulink environment. A study of the operation of the power supply system was carried out on this model. The simulation was carried out when the load varied from $0.2S_n$ to $1.2S_n$. The study was carried out on the subject of voltage deviation at different points of the circuit from the nominal value, for three cases, when the transformation ratio on the transformer is 10/0.4 kV, for the values of 400 V, $400 \cdot 1.025$ V, $400 \cdot 1.05$ V.

The analysis of the obtained results showed that the scheme is designed at the proper level, since mainly the deviations are within the maximum allowable norm, however, to ensure more accurate compliance with the voltage level, it is possible to adjust the voltage on the transformer by switching the winding, or in the first line, increase the cross-section of the power wire.

Key words: power supply, model, voltage, maximum allowable value of voltage deviation.

Постановка проблеми. Під якістю електроенергії розуміється ступінь відповідності фактичних значень параметрів електроенергії значенням, зазначеним в ГОСТ 13109-97. У нашому дослідженні мова йде про відхилення напруги, нормальні значення яких становлять +5 або -5%, а граничні +10 або -10% по ГОСТ 13109-97. Коливання напруги в мережі залежать від потужності джерела живлення, потужності, що втрачається під час передачі 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 викликає 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 зниженні напруги освітлення також погіршується, оскільки світловий потік залежить від величини напруги. З підвищенням напруги ККД лампи зростає, але термін її служби зменшується.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність перетворення електричної енергії у інші види, певною мірою залежить від якості самої електроенергії. Дослідження спрямовані на аналіз процесів у електричних мережах, втрати електроенергії, коливні процеси, рівень напруги та ін. зберігають актуальність. Сучасні методи дослідження ґрунтуються у більшості випадків на використанні моделювання [1-8].

Зміни режиму роботи характерні для енергетичних процесів, 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 навантажен-

ня. 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. Дана робота присвячена актуальним питанням експлуатації електромережі підприємства. Сучасні дослідницькі та аналітичні методи дозволили досягти чудових результатів у різних сферах. Зокрема, програмне забезпечення MATLAB/Simulink дозволяє аналізувати параметри роботи електромереж у різних режимах та з різними параметрами роботи. 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 та чотирьох ліній електропостачання із споживачами електроенергії. Згідно розрахованих значень 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, джерело живлення. Для проведення вимірів у моделі використовуємо вольтметри, зокрема напруги на навантаженні,

спадів напруги в лініях живлення та 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 таблиці 1.

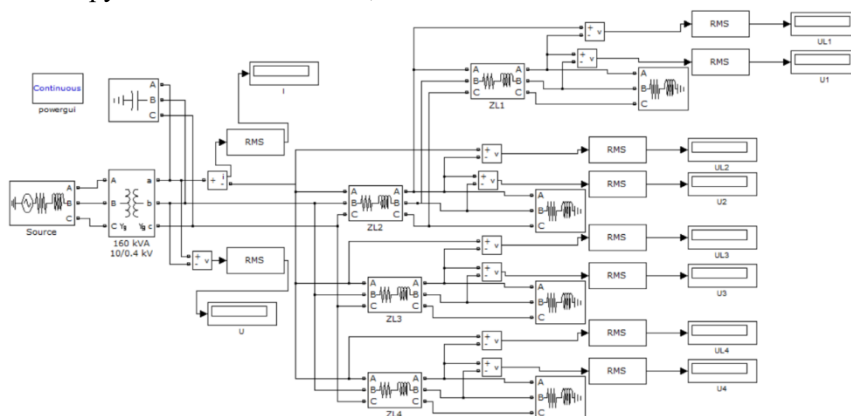


Рис. 1. Модель мережі електропостачання підприємства в середовищі MATLAB/Simulink

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 таблиці 3 та рисунок 2 слід відмітити наступне, що при зміні навантаження від $0,2S_n$ до $1,2S_n$, похибка відхилення напруги знаходиться у 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 у різних місцях схеми лежать кучно, відповідно в загальному мережа розрахована 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 даної характеристики з іншими кривими. Це передбачає збільшення вартості мережі. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги знаходиться у межах від -1,58 % до -7,89 % - знаходиться у 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 значення напруги на 2,5%.

Результат моделювання показано у таблиці 2. Після проведеного дослідження, аналізуючи значення таблиці 6 та рисунок 3 слід відмітити наступне, що при зміні навантаження від $0,2S_n$ до $1,2S_n$, похибка відхилення напруги знаходиться у межах від 6,05 % до - 9,21 %. Всі відхилення напруги лежить у гранично допустимих межах. Криві які описують похибки у різних місцях

схеми лежать кучно, відповідно в загальному мережа розрахована добре. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги знаходиться у межах від 0,53 % до -6,05 % - знаходиться у допустимих межах. Загальний діапазон відхилення напруги від номінальної становить 15,21%, а в номінальному режимі 6,58 %, що є більше ніж у попередньому випадку.

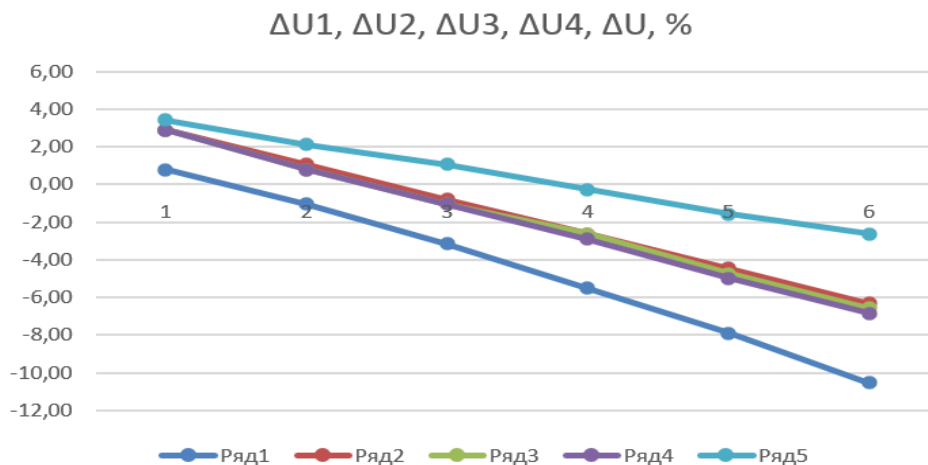


Рис. 2. Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при напрузі 400 В

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 у таблиці 3.

Після проведеного дослідження, аналізуючи значення таблиці 9 та рисунок 4 слід відмітити наступне, що при зміні навантаження від $0,2S_n$ до $1,2S_n$, похибка відхилення напруги знаходиться у межах від 8,68 % до - 6,84 %. Всі відхилення напруги лежить у гранично допустимих межах.

Криві які описують похибки у різних місцях схеми лежать кучно, відповідно в загальному мережа розрахована добре. При номінальному навантаженні (точка 5) відхилення напруги знаходиться у межах від 2,63 % до -4,21 % - знаходиться у 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 у різних точках схеми від номінального значення. Аналіз отриманих результатів показав, що схема спроектована на належному рівні, оскільки в основному відхилення знаходяться у 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.

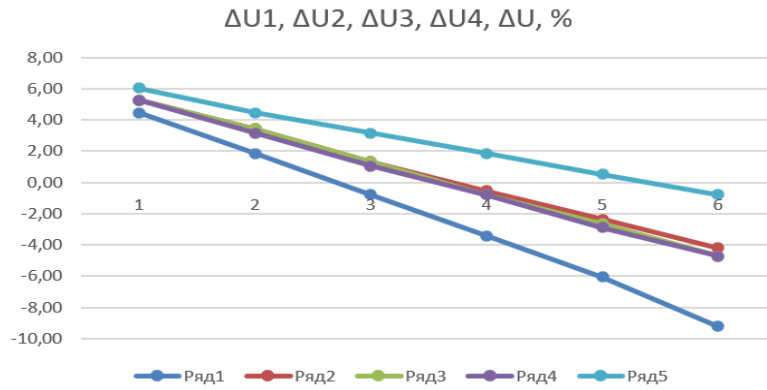


Рис. 3. Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при нарузі 400•1,025 В

Fig. 3. Graphical dependence of the simulation result of the voltage deviation from the nominal value at a voltage of 400•1.025 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 _н	0,4S _н	0,6S _н	0,8S _н	1,0S _н	1,2S _н
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

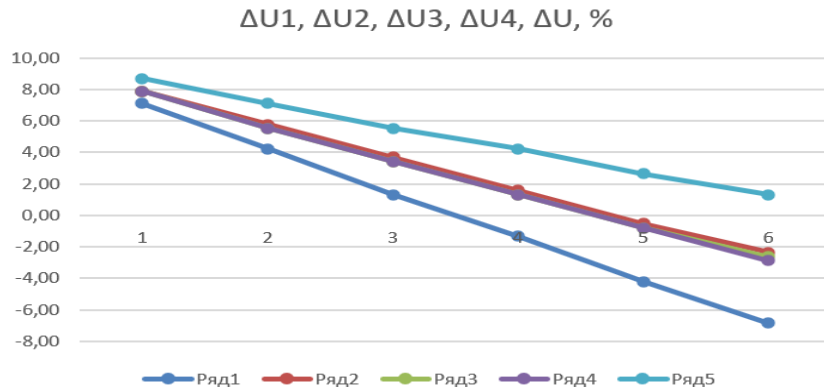


Рис. 4. Графічна залежність результату моделювання відхилення напруги від номінального значення при нарузі 400•1,05 В

Fig. 4. Graphical dependence of the simulation result of the voltage deviation from the nominal value at a voltage of 400•1.05 V

Бібліографічний список

1. Воротицкий В.Э., Загорский Я.Т., Апрыткин.В.Н Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Электрические станции, 2000 г. 154 с.
2. Галанов В.П., Галанов В.В. Влияние качества электроэнергии на уровень ее потерь в сетях. Электрические станции, 2001 г. 63 с.
3. Гоголюк О.П. Дослідження електропередачі в сучасних комп'ютерних

середовищах. Вісник Національного університету «Львівська політехніка», 2010 р. № 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. Дурняк Б.В., Чумакевич В.О., Лях І.М., Яцун А.М Основи електропостачання

агропромислового комплексу : Навч. посіб. Львів: Українська академія друкарства, 2017 р. 544 с.

6. Золотарев М. В., Обозный А. Л. Новые отечественные разработки в области силовых кабелей. Вісник НТУ ХП. 2006. Вип. 34. С. 129–132.

7. Золотарев В.В., Карпушенко В. П., Науменко А. А., Бузько С. В. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей. 82 Физические и компьютерные технологии: Труды 12 МНТК. Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. С. 239–240.

8. Лях В. В., Молчанов В. М., Судакова И. В., Павличенко И. В. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины. Электрические сети и системы. 2009. № 3. С. 16–21.

9. Левонюк В. Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних електромагнітних процесів в елементах електроенергетичних систем. Вісник Львівського національного аграрного університету, агроінженерні дослідження. 2016 р. № 20. С. 155–161.

10. Чабан А. В., Левонюк В. Р., Дробот І. М., Герман А. Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу. Електротехніка і електромеханіка. 2016 р. № 3. С. 30 – 35.

11. Чабан А., Левонюк В. Аналіз неусталених електромагнітних процесів у фрагменті електроенергетичної системи на основі класичних підходів до моделювання. Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження. № 21. 2017 р. С. 167-177.

12. Чабан А., Федів Є, Сівакова О., Дробот І. Стабілізація напруги вузла електричного навантаження за допомогою двоопераційних тиристорів. Вісник Львівського національного університету природокористування: агроінженерні дослідження, 2022. № 26. С. 101-108.

13. Chaban A., Popenda A., Szafraniec A., Levoniuk V. Including shield wires in the analysis of transient processes occurring in HVAC transmission lines. Energies. 2023. Vol. 16. Is. 23. P. 7870 – 7889. <https://doi.org/10.3390/en16237870> (Індексується у Scopus та WoS).

14. 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. <https://doi.org/10.3390/s23010298> (Індексується у Scopus та WoS).

15. 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. P. 8255 – 8273. <https://doi.org/10.3390/en15218255> (Індексується у Scopus та WoS).

16. 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. <https://doi.org/10.3390/en15031126> (Індексується у Scopus та WoS).

17. Chaban A., Perzyński T., Popenda A., Figura R., Levoniuk V. Mathematical Modeling of Transient Processes in the Susceptible Motion Transmission in a Ship Propulsion System Containing a Shaft Synchronous Generator. Energies. 2022. Vol. 15. Is. 9. P. 3266 – 3274.

18. Шестеренко В.Є Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств : підручник. Вінниця: Нова книга, 2004 р. 656 с.

19. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. Техн. электродинамика. 2013. № 1. С. 9–15.

Стаття надійшла 15.07.2024.

УДК 593.3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЗМІНИ СТУПЕНЯ СТИСКУ В БЕЗШАТУННОМУ ДВИГУНІ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

*Тетяна Колеснікова¹, к. т. н., Олександр Лиходій¹, к. т. н.,
Тетяна Махоркіна², к. ф.-м. н.*

*¹ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури.,
вул. Чернишевського 24 а, м. Дніпро, Україна,
e-mail: tnk1403@ukr.net*

*² Національний університет "Львівська Політехніка",
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Львівська обл., Україна,
e-mail: mechanic@ua.fm*

Колеснікова Т., Лиходій О., Махоркіна Т. Теоретичні дослідження механізму зміни ступеня стиску в безшатунному двигуні внутрішнього згоряння

Встановлено, що одним з 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 по застосуванню 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 існуючі 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. Таким чином, дослідження впливу конструкції механізму зміни ступеня стиску на швидкість зміни ступеня стиску в залежності від параметрів робочого процесу - один з важливих напрямків наукової роботи по створенню двигуна зі змінним ступенем стиску. В роботі теоретично 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 pistonless 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, which overall improves 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.

Key words: uncondrod engine, variable compression ratio, mechanism of compression ratio variation, hydraulic locks, research, calculations.

Постановка проблеми. В сучасних умовах світової економічної кризи питання раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів набуває нових обертів. Екологічна ситуація в 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 з 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 ресурсосбереження є для неї особливо актуальними.

У зв'язку з цим протягом останніх десятиліть двигунобудівництво вирішує дві основні задачі: підвищення паливної економічності двигунів і зниження токсичності відпрацьованих газів. До рішення цих задач не можна підходити роздільно, тому що зниження питомої витрати палива призводить в більшості випадків 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 зв'язаний з принциповими змінами в конструкції двигунів. Це підтверджують останні розробки і результати досліджень ведучих фірм і організацій в області двигунобудівництва (Mitsubishi Motors, DaimlerChrysler, Toyota, Saab, Orbital та ін.).

Одним з напрямків поліпшення економічних і екологічних показників ДВЗ є регулювання ступеня стиску (ϵ) на часткових режимах роботи двигуна.

Очевидно, що найбільш перспективне застосування ДВЗ зі змінним ступенем стиску доцільно на автомобілях, що постійно експлуатуються в міських умовах, де їх двигуни відносно невеликий час працюють з повним навантаженням.

Метою роботи є дослідження механізму зміни ступеня стиску (МЗСС) в безштанному двигуні з визначенням шляхів забезпечення ефективної динаміки спрацьовування механізму зміни ступеня стиску. Одним з основних критеріїв оцін-

ки, 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 зробити наступні висновки:

а) поліпшити економічні й одночасно токсичні показники бензинового двигуна можливо удосконалюванням процесу згоряння на часткових режимах шляхом регулювання ступеня стиску. У цьому випадку розширюються межі ефективного збіднення суміші і поліпшується робота двигуна на холостому ході і малих навантаженнях;

б) перспективною конструкцією двигуна зі змінним ступенем стиску є безштанний 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 безштанному ДВЗ простіше й ефективніше реалізується зміна ступеня стиску, що в цілому підвищує показники двигуна;

в) існуючі зразки двигунів мають невелику швидкість зміни ступеня стиску. Це призводить до значного часу роботи двигуна з ознаками детонації і знижує його надійність і довговічність. Таким чином, дослідження впливу конструкції механізму зміни ступеня стиску на швидкість зміни ϵ в залежності від параметрів робочого процесу - один з важливих напрямків наукової роботи по створенню двигуна з ϵ = var.

У більшості конструкцій ДВЗ із змінним ступенем стиску максимальне значення $\epsilon_{\text{х}}$, 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 з можливих конструктивних варіантів двигуна, що забезпечує реалізацію змінного ступеня стиску, є безштанний ДВЗ (рис. 1), у якому замість звичайного кривошипно-штанного механізму застосовується кривошипно-кулісний механізм [9].

У безштанному двигуні механізм перетворення зворотно-поступального руху поршня в обертальний рух валу включає два колінчастих

валів: 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 знаходяться в 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° . 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 достоїнства зв'язані з тим, що в безшатунному 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 безшатунного 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.

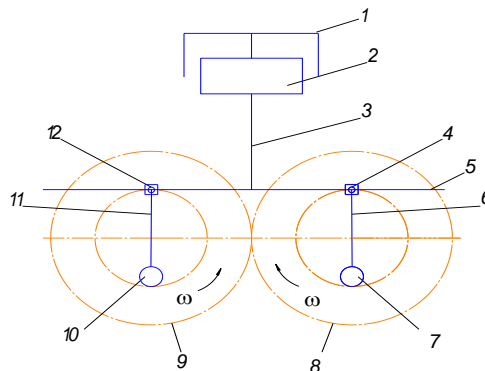


Рис. 1. Схема безшатунного ДВЗ зі змінним ступенем стиску:

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 pistonless 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. Завданням теоретичного дослідження є удосконалення МЗСС шляхом визначення його раціональних параметрів та встановлення їх впливу на швидкодію механізму при різних режимах роботи двигуна.

Очевидно, що вирішити поставлену задачу 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 та ін. Отже, є очевидним, що методика розрахунку двигуна повинна 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. Так як в поршні знаходиться масляні канали, в яких знаходиться масло, це призводить до збільшення інерційних сил, щоб

зменшити інерційні сили поршень роблять меншим по висоті, обрізаючи до кільця. Температура олії в поршні відповідає температурі рідини, що охолоджує, і становить близько 90°C .

Переміщення рухомого корпусу (рис. 3) відбувається під дією прикладених до нього газових ΔP_{Γ} та інерційних сил $P_{j\Sigma}$, а також сил тертя між поршневыми кільцями і стінками циліндру $P_{\text{тр.к}}$ та тиску масла $P_{\text{м}}$.

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 ΔP_{Γ} (рис. 3) поршень двигуна разом із рухомим 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 рухомим стаканом за допомогою гідрозамків за командою сигналу від датчика детонації.

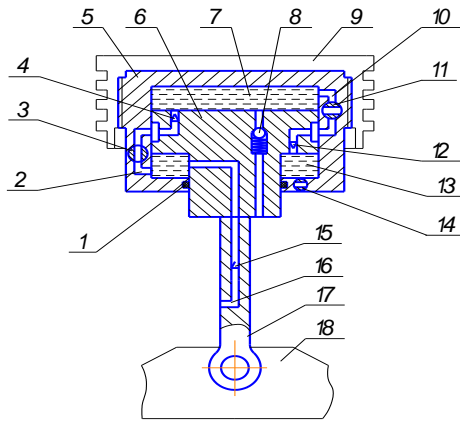


Рис. 2. Конструктивна схема механізму зміни ступеня стиску:

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, 14 - 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.

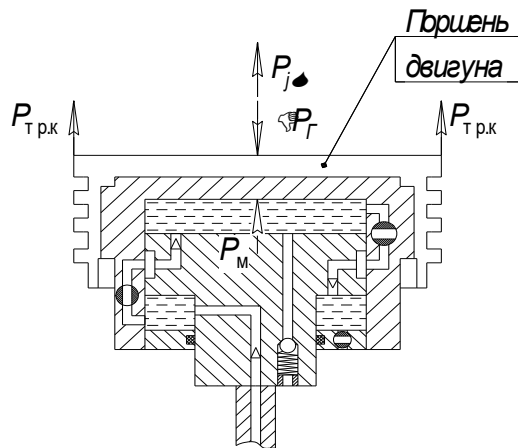


Рис. 3. Схема сил, що діють в механізмі зміни ступеня стиску.

Fig. 3. Diagram of forces acting in the mechanism of compression ratio adjustment.

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 ΔS_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^3 ;

V_c – об'єм камери згоряння, м^3 .

$$V_h = F_{\text{п.д}} S_h, \quad (3)$$

де S_h – повний хід поршня двигуна, м;

$F_{\text{п.д}}$ – площа поршня двигуна, м^2 .

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 $v_{\varepsilon c}$

Робочий об'єм циліндра

$$v_{\varepsilon c} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t}, \quad (5)$$

або з врахуванням (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

$$\Delta S_c = \frac{V_{c2} - V_{c1}}{F_{п.д}} \quad (7)$$

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 $v_{\varepsilon c}$. Як відомо, один цикл у чотиритактному двигуні відбувається за два оберти колінчастого валу і тому

$$v_{\varepsilon c} = \frac{720 v_{\varepsilon c}}{n}, \quad (9)$$

де $n = 5400$ – частота обертання колінчастого валу двигуна, хв^{-1} .

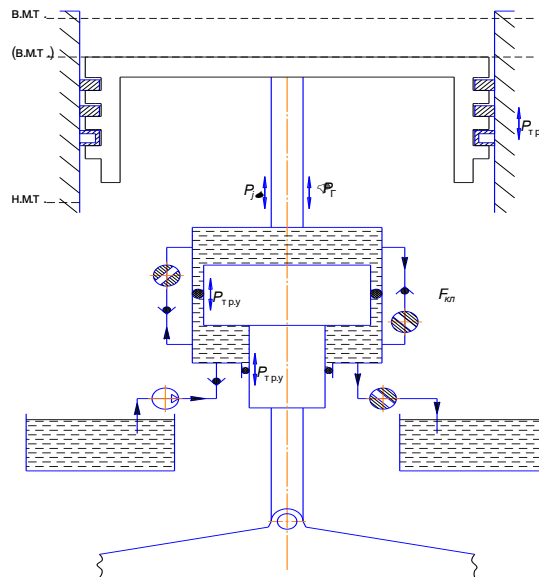


Рис. 4. Схема до розрахунку МЗСС.

Fig. 4. Scheme for the calculation of the compression ratio adjustment mechanism.

Таким чином, для отримання часу спрацьовування МЗСС необхідно визначити швидкість переміщення рухомого корпусу $v_{\text{мех}}$ на величину ΔS_c . Для вирішення цієї задачі було складено рівняння руху МЗСС, яке являє собою рівняння другого закону Ньютона у диференціальній формі і складене з урахуванням газових сил з боку двигуна, сил інерції, сил тертя поршневих кілець та гумових ущільнень механізму, а також гідрравлічних втрат в гідрозамках, клапанах та каналах механізму

$$m_M \frac{d}{dt} v_{\text{мех}} = \Delta P_{\Gamma} + P_{j\Sigma} + P_T - P_{\text{тр.к}} - P_{\text{гідр}} - P_{\text{тр.у}}, \quad (10)$$

де m_M – маса рухомої частини механізму, кг;

ΔP_{Γ} – сила тиску газів у циліндрі двигуна, Н;

$P_{j\Sigma}$ – сумарна сила інерції механізму, Н;

P_T – сила тяжіння рухомої частини механізму, Н;

$P_{\text{тр.к}}$ – сила тертя поршневих кілець, Н;

$P_{\text{гідр}}$ – сила, що характеризує гідрравлічні втрати в механізмі, Н;

$P_{\text{тр.у}}$ – сила тертя в ущільненнях механізму, Н.

Маса рухомої частини механізму

$$m_M = m_{\Pi} + m_K + m_{\text{КМ}} + m_{\text{кр}} + m_{\Gamma} + m_{\text{П.В}}, \quad (11)$$

де m_{Π} – маса поршня двигуна, кг;

$m_{\text{К}}$ – маса поршневих кілець, кг;

$m_{\text{КМ}}$ – маса рухомого корпусу механізму, кг;

$m_{\text{Кр}}$ – маса кришки, кг;

m_{Γ} – маса гайки, кг;

$m_{\text{П.В}}$ – маса поворотної втулки, кг.

Сила тиску газів знаходиться за відомою з курсу ДВЗ залежністю [10] з використанням розгорнутої індикаторної діаграми

$$\Delta P_{\Gamma} = (p_{\Gamma} - p_0) F_{\text{П.Д}}, \quad (12)$$

де p_{Γ} – тиск газів в циліндрі двигуна у довільний проміжок часу, МПа;

p_0 – атмосферний тиск, МПа.

Сила тиску газів ΔP_{Γ} враховує вплив наступних 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

$$P_{j\Sigma} = P_{j\text{М}} + P_{j\text{мас}}, \quad (13)$$

де $P_{j\text{М}}$ – сила інерції від рухомих мас МЗСС, Н;

$P_{j\text{мас}}$ – сила інерції від масла в МЗСС, Н.

Для класичного двигуна, сила інерції від мас, що здійснюють зворотно-поступальний рух, має вигляд [10]

$$P_{j\text{М}} = -m_{\text{М}} j = -m_{\text{М}} R \omega^2 (\cos\varphi + \lambda \cos 2\varphi). \quad (14)$$

Конструктивні особливості безштанунного двигуна обумовлюють значення $\lambda = R/L = \infty$, тому вираз (14) приймає наступний вигляд

$$P_{j\text{М}} = -m_{\text{М}} R \omega^2 \cos\varphi, \quad (15)$$

де R – радіус кривошипу, м;

ω – кутова швидкість колінчастого валу, с⁻¹;

φ – кут повороту кривошипа, град.

На рис. 5 наведений графік сили інерції $P_{j\text{М}} = f(\varphi)$.

Вираз для визначення сили інерції від масла в механізмі складено до аналогії з (15)

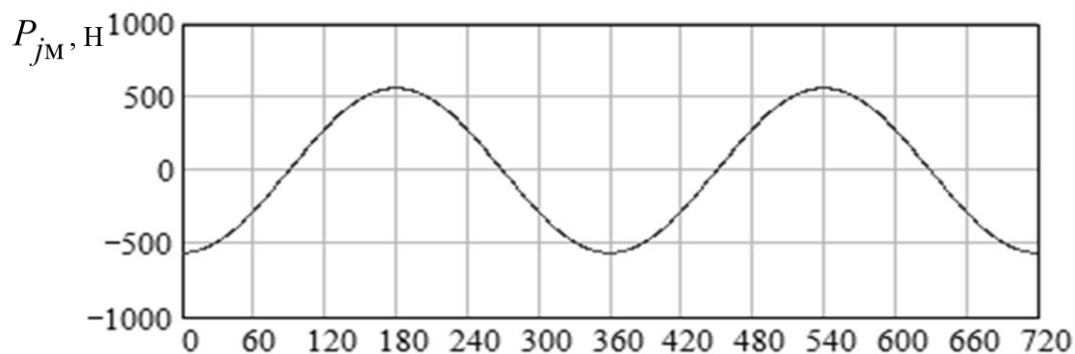
$$P_{j\text{мас}} = -(m_{\text{М.Н}} + m_{\text{М.В}}) R \omega^2 \cos\varphi, \quad (16)$$

де $m_{\text{М.Н}}$, $m_{\text{М.В}}$ – маса масла відповідно в нижній та верхній порожнині механізму, кг.

При прямому ході $m_{\text{М.Н}} = 0$, а при зворотному $m_{\text{М.В}} = 0$. Виходячи з того, що об'єм верхньої та нижньої порожнин механізму змінюється при переміщенні рухомого корпусу механізму, можна зробити висновок, що кількість масла в порожнинах змінюється за наступними виразами

$$m_{\text{М.В}} = f(x), \quad m_{\text{М.Н}} = f(x).$$

На рис 6 і 7 представлені графіки сил інерції $P_{j\text{мас}} = f(\varphi)$ та $P_{j\Sigma} = f(\varphi)$.



φ , °п.к.в.

Рис. 5. Залежність сили інерції рухомих частин МЗСС P_{jM} від кута повороту колінчастого валу φ .
 Fig. 5. Dependence of the inertia force of the moving parts of the compression ratio adjustment mechanism

P_{jM} on the crankshaft rotation angle φ .

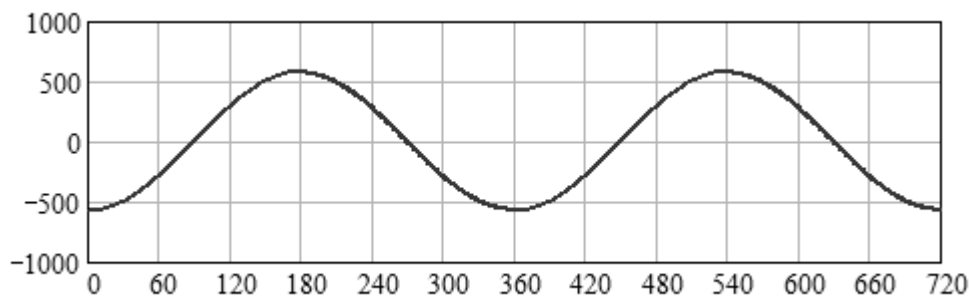


Рис. 7. Залежність сумарної сили інерції $P_{j\Sigma}$ від кута повороту колінчастого валу φ .

Fig. 7. Dependence of the total inertia force $P_{j\Sigma}$ on the crankshaft rotation angle φ .

Для визначення кількості мастила в кожній порожнині механізму будемо використовувати наступні залежності:

для верхньої -

$$m_{м.в}(x) = \left(\frac{\pi D_{п.м}^2}{4} x + \Delta V_B \right) \rho_M, \quad (17)$$

де $D_{п.м}$ – діаметр поршня механізму, м;

ΔV_B – залишковий об’єм масла в верхній порожнині МЗСС, м³;

ρ_M – густина масла, кг/м³;

для нижньої -

$$m_{м.н}(x) = \left(\frac{\pi (D_{п.м}^2 - d_{вт}^2)}{4} (\Delta S_c - x) + \Delta V_H \right) \rho_M, \quad (18)$$

де $d_{вт}$ – діаметр втулки механізму, м;

ΔV_H – залишковий об’єм масла в нижній порожнині МЗСС, м³.

Формула для визначення сили тертя комплексу поршневих кілець [11] дозволяє врахувати швидкість поршня, тиск газів, температуру масла та розмір циліндра

$$P_{\text{тр.к}} = \left(-\text{sign}(v) c_1 \sqrt{|v|} \right) \left(1 - c_2 \frac{t - t_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}}} \right) \left(1 + c_3 \frac{p_z - p_0 + \sigma - \sigma_{\text{пр}}}{p_0} \right) \left(\frac{d}{d_{\text{пр}}} \right)^2, \quad (19)$$

де c – сталі коефіцієнти, значення яких, згідно до [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] $t_{\text{пр}} = 40^\circ \text{C}$;

t – температура стінки циліндра, °С;

σ – радіальна напруга кільця, МПа;

$\sigma_{\text{пр}}$ – приведена радіальна напруга кільця, МПа. Згідно з [16] $\sigma_{\text{пр}} = 0,1$ МПа;

$d_{\text{пр}}$ – приведений діаметр циліндра, мм. Згідно з [11] $d_{\text{пр}} = 165$ мм.

У двигуна з кривошипно-шатунним механізмом, швидкість переміщення поршня є величиною змінною і при постійній частоті обертання колінчастого валу 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 вище наведене зауваження щодо конструктивних особливостей безшатунного двигуна, вираз (20) в нашому випадку прийме вигляд

$$v = R \omega \sin \varphi. \quad (21)$$

На рис. 8 показано графік швидкості поршня в безшатунному двигуні.

З теоретичних і експериментальних досліджень теплообміну у ДВЗ витікає, що температура поверхні робочої порожнини циліндра істотно змінюється по висоті дзеркала циліндра. Різниця в значеннях температури поверхні циліндра у верхній частині (в районі в.м.т.) і нижньої частини (в районі н.м.т.) становить від 330 К [16] до 415 К [16, 20].

У математичній моделі, що розглядається, враховується розподіл температури по висоті 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, 13, 14, 17]

$$T_{\text{цн}}(\varphi) = T_{\text{вмт}} - (T_{\text{вмт}} - T_{\text{нмт}}) (\bar{s}(\varphi))^z, \quad (22)$$

де $T_{\text{цн}}$ – температура по висоті циліндра, К;

$T_{\text{вмт}}$ – температура стінки циліндра в районі верхньої мертвої точки, К;

$T_{\text{нмт}}$ – температура стінки циліндра в районі нижньої мертвої точки, К;

z – емпіричний показник ступеню. Приймається згідно емпіричних даних $z = 2,8$;

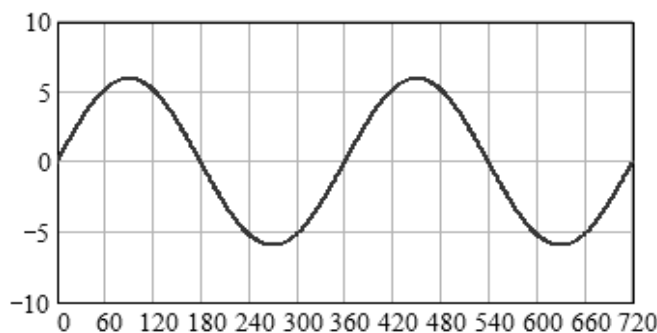


Рис. 8. Залежність швидкості поршня безшатунного двигуна v від кута повороту колінчастого валу φ .

Fig. 8. Dependence of the piston speed in the crankless 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 по відомому рівнянню

$$s = 0,5S_h \sigma(\varphi), \quad (24)$$

де $\sigma(\varphi)$ – кінематична функція переміщення поршня, що для різних типів двигунів має свій вид.

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

$$\sigma(\varphi) = 1 - \cos\varphi + \frac{1}{\lambda} (\cos\alpha - \cos\beta) - \sin\alpha, \quad (27)$$

де φ – поточний кут повороту колінчастого валу, відлічуваний від в.м.т.

З урахуванням (24) вираз (23) приймає вигляд

$$\bar{s} = 0,5\sigma(\varphi) \quad (28)$$

Осереднену температуру циліндра $T_{ц}$ по переміщенню поршня $S(\varphi)$ можна визначити, користуючись рівняннями (29) та рис. 9.

$$\left. \begin{aligned} T_{ц} &= \frac{1}{\varphi} \int_0^{\varphi} T_{цн}(\varphi) d\varphi, & 0 < \varphi \leq 180^\circ; \\ T_{ц} &= \frac{1}{360^\circ - \varphi} \int_{\varphi}^{360^\circ} T_{цн}(\varphi) d\varphi, & 180^\circ \leq \varphi < 360^\circ; \\ T_{ц} &= \frac{1}{\varphi - 360^\circ} \int_{360^\circ}^{\varphi} T_{цн}(\varphi) d\varphi, & 360^\circ \leq \varphi < 540^\circ; \\ T_{ц} &= \frac{1}{720^\circ - \varphi} \int_{\varphi}^{720^\circ} T_{цн}(\varphi) d\varphi, & 540^\circ \leq \varphi < 720^\circ. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

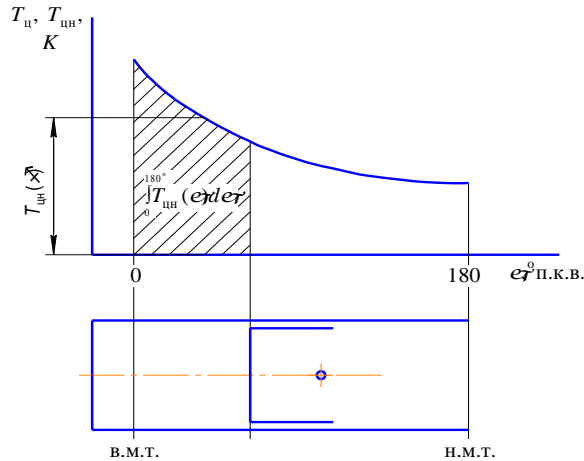


Рис. 9. До визначення середньоінтегральної температури $T_{ц}$ робочої поверхні дзеркала циліндра в залежності від кута повороту колінчастого валу φ .

Fig. 9. Determining the average integral temperature $T_{ц}$ of the working surface of the cylinder mirror depending on the crankshaft rotation angle φ .

Як видно, величина $T_{ц}$ являє собою середньоінтегральну температуру поверхні дзеркала циліндра при поточному робочому об'ємі циліндра.

Сила гідравлічних втрат $P_{гдр}$ враховує втрати на перетікання масла через канали $R_{кан}$, зворотні клапани $R_{кл}$ і гідрозамки $R_{гз}$, що виникають при русі масла у корпусі механізму

$$P_{гдр} = \rho g a_i Q_i^2 F_{п.м}, \quad (30)$$

де g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ;

a_i – гідравлічний опір прямого або зворотного каналів, $\text{с}^2/\text{м}^5$;

Q_i – витрата масла при прямому або зворотному русі корпуса механізму, $\text{м}^3/\text{с}$;

$F_{\text{П.М}}$ – активна площа поршня механізму, м^2 .

Гідравлічний опір прямого й зворотного каналів визначається за формулами Дарсі [15]

$$a_{\text{пр}} = \left(\lambda \frac{l_{\text{пр}}}{d_{\text{пр}}} + \xi_{\text{пр}} \right) \frac{8}{\pi^2 d_{\text{пр}}^4 g}; \quad (31)$$

$$a_{\text{зв}} = \left(\lambda \frac{l_{\text{зв}}}{d_{\text{зв}}} + \xi_{\text{зв}} \right) \frac{8}{\pi^2 d_{\text{зв}}^4 g}, \quad (32)$$

де λ – коефіцієнт Дарсі, що характеризує опір по довжині каналу;

$l_{\text{пр}}, l_{\text{зв}}$ – довжина каналу відповідно при прямому й зворотному ході, м;

$d_{\text{пр}}, d_{\text{зв}}$ – діаметр каналу відповідно при прямому й зворотному ході, м;

$\xi_{\text{пр}}, \xi_{\text{зв}}$ – сумарний коефіцієнт місцевих опорів при прямому й зворотному ході.

Коефіцієнт ураховує 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

$$Q_{\text{пр}} = F_{\text{П.д}} v_{\text{мех}}; \quad (33)$$

для зворотного ходу

$$Q_{\text{зв}} = (F_{\text{П.М}} - F_{\text{ШТ}}) v_{\text{мех}}; \quad (34)$$

де $F_{\text{ШТ}}$ – площа штока поршня двигуна, м^2 .

Сила тертя гумових ущільнень при русі корпуса механізму визначається по формулі

$$P_{\text{тр.у}} = \mu \text{sign}(v_{\text{мех}}) (|p_1 - p_2| F_{\text{тр1}} + p_2 F_{\text{тр2}}); \quad (35)$$

де μ – коефіцієнт тертя пари сталь- гума в маслі.

Приймаємо згідно [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^2 ;

$$F_{\text{три}} = \pi d_i h_i; \quad (36)$$

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

$$P_1 = \left(\Delta P_T + P_{\Sigma j} \right) \frac{F_{П.Д.}}{F_{П.М.}} \quad (37)$$

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

$$P_{\Sigma} = \Delta P_T + P_{j\Sigma} + P_T - P_{\text{тр.к}} - P_{\text{гідр}} - P_{\text{тр.у}} \quad (39)$$

Вигляд залежності сумарної сили від кута повороту колінчастого валу показаний на рис. 10.

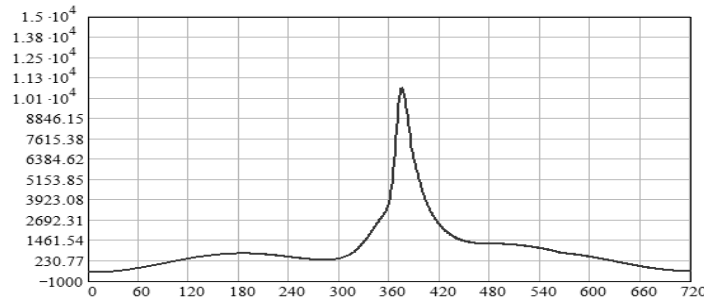


Рис. 10. Залежність сумарної сили P_{Σ} від кута повороту колінчастого валу φ .

Fig. 10. The dependence of the total force on the crankshaft rotation angle φ .

Висновки. В результаті проведених теоретичних досліджень механізму зміни ступеня стиску отримані наступні результати:

1. Отримано залежності, які зв'язують швидкість зміни ступеня стиску з параметрами робочого процесу двигуна;

2. Розроблено методику 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. Available <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 Kolbenzig Verhaltens in Motorbetrieb Teil 1. „*MTZ: Motortechn. Z.*“ 1989. № 11. 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 Entwicklungarbeiten 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. 451-456.
15. Федоров В.Г., Мамелюк Н.С., Кепко О.І., Пушка О.С. Гідравліка і гідропривод. Умань. Видавничополіграфічний 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. ISSN 1896-0596. 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, 104, 69-83. ISSN: 0209-3324
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 р., С. 14-20.
20. Serrano, J.R. & Arnau, F.J. & Bares, P. & Gomez-Vilanova, A. & Garrido-Requena, J. & Luna-Blanca, M.J. & Contreras-Anguita, F.J., 2021. "Analysis of a novel concept of 2-stroke rod-less opposed pistons engine (2S-ROPE): Testing, modelling, and forward potential," *Applied Energy*, Elsevier, vol. 282(PA).

Стаття надійшла: 12.04.2024

УДК 539.3.01

РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНЬ В ПІВПЛОЩИНІ З КРУГОВИМ ОТВОРОМ ПРИ РОЗТЯГУ ПІД КУТОМ ДО ПРЯМОЛІНІЙНОГО КРАЮ

Олександр Пономаренко¹, к. ф.-м. н., Віктор Семерак¹, к. т. н.,
Олексій Бурнаєв¹, к. ф.-м. н., Орест Гавриляк²

¹Львівський 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

²ВСП "Автомобільно-дорожній коледж" Національного університету "Львівська політехніка", вул. Личаківська 2, м. Львів, Україна, e-mail: orestgavrilak@gmail.com

Пономаренко О., Семерак В., Бурнаєв О., Гавриляк О. Розподіл напружень в півплощині з круговим отвором при розтягу під кутом до прямолінійного краю

У сучасній промисловості і 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 несприятливо 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. У даній праці отримано розв'язок задачі теорії пружності про концентрацію напружень в 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 в 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 фактору, як орієнтування краю півплощини відносно поля навантажень у вигляді розтягу. Розв'язок задачі наводиться в біполярних координатах. Отримано формули для напружень по контуру отвору та на прямолінійному краю, а також відомий результат для розтягу півплощини з круговим отвором вздовж 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 провести теоретичне визначення коефіцієнта концентрації напружень біля отворів і можуть бути використані в інженерній практиці під час проектування деталей у кораблебудуванні, авіабудуванні та машинобудуванні.

Ключові слова: концентрація напружень біля отворів, бігармонічні функції напружень, біполярні координати.

Ponomarenko O., Semerak V., Burnaev O., Havryliak O. Distribution of stresses in semi infinite plate with circular hole by the tension under corner to straightforward edge.

In modern industry and building by project construction and machines in aircraft industry, shipbuilding, machine-building loose application find elastic details in the form of thin plates, which from different considerations loosen different kind holes. By loading such details near the holes, concentration of strains arises causing unfavourable effect on the durability of detail. Strains on the contours of holes are distributed uneven: there is small sections, which are subjected to the impact of high strains. These are the sections, where fragile cracks or plastic deformations appear, development which may result in destruction of construction.

Therefore, the study of distribution of strains near curve holes is important both from theoretical and engineering point of view.

In this work, a solution to the problem of the theory of elasticity about stress concentration in a half-plane with a circular hole during stretching at an arbitrary angle to a rectilinear edge is obtained. The problem is solved on the basis of the main stress function corresponding to the stress state in the half-plane not weakened by the hole, and to this stress function a second biharmonic function is added, which corresponds to the additional stress state arising due to the presence of the hole. The task boils down to finding a biharmonic stress function that satisfies the boundary conditions on the contour of the hole, on the rectilinear edge, and at infinity. The scientific novelty lies in the fact that the solution of this problem provides information on the influence of such a factor as the orientation of the edge of the half-plane relative to the field of tensile loads on the stress concentration. The solution of the problem is given in bipolar coordinates. The formulas for the stresses along the contour of the hole and on the rectilinear edge are obtained, as well as the known result for the tension of a half-plane with a circular opening along the rectilinear edge. Obtained stress values for some partial cases for characteristic points on the contour of the hole and on the straight edge.

Result presented in the paper allow conducting theoretical substantiation of the coefficient of strain concentration near the holes and may be used in engineering practice in the time of work out details in aircraft industry, shipbuilding, machinebuilding.

Key words: 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 їх якості можливе лише в разі врахування дійсних умов роботи цих конструкцій в області пружних деформацій.

У сучасній промисловості і 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 несприятливо 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 присвячене вивченню концентрації напружень у півплощині з круговим отвором при розтягу під довільним кутом до прямолінійного краю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надзвичайно різноманітні проблеми концентрації напружень розглянуто в 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.

В 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.

В монографії [11] описано застосування методу функції комплексної змінної і конформних відображень стосовно до 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].

В публікації [20] проведено дослідження динамічної поведінки ортотропних пластин з отворами та включеннями.

В праці [21] проведено скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану тонких пластин, циліндричних і конічних оболонок з отворами і стрічковими включеннями.

Постановка завдання. Метою нашого 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.

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 їх якості можливе лише в разі врахування дійсних умов роботи цих конструкцій в області пружних деформацій.

У сучасній промисловості і 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 несприятливо 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 присвячене вивченню концентрації напружень у півплощині з круговим отвором при розтягу під довільним кутом до прямолінійного краю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надзвичайно різноманітні проблеми концентрації напружень розглянуто в 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.

В 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.

В монографії [11] описано застосування

методу функції комплексної змінної і конформних відображень стосовно до 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].

В публікації [20] проведено дослідження динамічної поведінки ортотропних пластин з отворами та включеннями.

В праці [21] проведено скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану тонких пластин, циліндричних і конічних оболонок з отворами і стрічковими включеннями.

Постановка завдання. Метою нашого 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.

що утворюють кут φ з віссю OX . Визначимо картину напруженого стану в півплощині.

Напружений стан в 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 в цьому випадку має 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 виду:

$$x + i y = a \operatorname{cth}(a - i\beta)/2$$

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 з граничних умов (6):

$$\sigma_\alpha|_{\alpha=0} = \tau_{\alpha\beta}|_{\alpha=0} = 0,$$

отримуємо:

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

Розглянемо задачу по розтяг півплощини з круговим отвором, контур якого вільний від зовнішніх зусиль. Нехай напружений стан на нескінченності являє собою розтяг зусиллями p ,

що утворюють кут φ з віссю OX . Визначимо картину напруженого стану в півплощині.

Напружений стан в 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 в цьому випадку має 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 виду:

$$x + i y = a \operatorname{cth}(a - i\beta)/2$$

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 з граничних умов (6):

$$\sigma_\alpha|_{\alpha=0} = \tau_{\alpha\beta}|_{\alpha=0} = 0,$$

отримуємо:

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 по розтяг півплощини з круговим отвором, контур якого вільний від зовнішніх зусиль. Нехай напружений стан на нескінченності являє собою розтяг зусиллями p , що утворюють кут φ з віссю OX . Визначимо картину напруженого стану в півплощині.

Напружений стан в 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 в цьому випадку має 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 виду:

$$x + i y = a \operatorname{cth}(a - i\beta)/2$$

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 $U_{1,i}$ шукаємо у вигляді:

$$gU_{1,i}(\alpha, \beta) = G_i(\operatorname{ch} \alpha - \cos \beta)\alpha + (\mathcal{A}_{1,i} \operatorname{ch} 2a + \mathcal{B}_{1,i} + C_{1,i} \operatorname{sh} 2a) \cos \beta + \sum_{n=2}^{\infty} f_{n,i}(a) \cos n\beta, \quad (i=1,2) \quad (7)$$

$$gU_{1,3}(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{\infty} f_{n,i}(a) \sin n\beta, \quad (8)$$

де

$$f_{n,i}(a) = \mathcal{A}_{n,i} \operatorname{ch}(n+1)a + \mathcal{B}_{n,i} \operatorname{ch}(n-1)a + C_{n,i} \operatorname{sh}(n+1)a + \mathcal{D}_{n,i} \operatorname{sh}(n-1)a, \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

Використовуючи першу з граничних умов (6):

$$\sigma_\alpha|_{\alpha=0} = \tau_{\alpha\beta}|_{\alpha=0} = 0,$$

отримуємо:

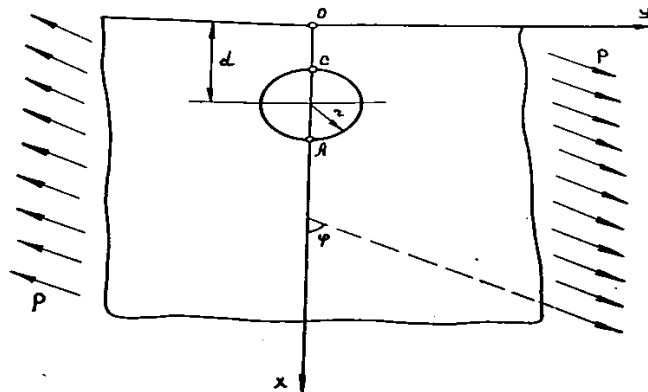


Рис. 1. Схема навантаження напівплощини.
Fig. 1. Schema of semiinfinite plate loading.

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{n,i} + \mathcal{B}_{n,i} &= 0 \\ (n+1)\mathcal{C}_{n,i} + (n-1)\mathcal{D}_{n,i} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

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) запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} g\mathcal{U}_{1,i}(\alpha, \beta) &= G_i(ch\alpha - \cos\beta)\alpha + (\mathcal{A}_{1,i}ch2a - 1)\cos\beta + \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} \{ \mathcal{A}_{n,i}[ch(n+1)a - ch(n-1)a] + E_{n,i}[(n-1)sh(n+1)a - \\ &-(n+1)sh(n-1)a] \} \cos n\beta, \end{aligned} \quad (i=1,2) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} g\mathcal{U}_{1,3}(\alpha, \beta) &= \mathcal{A}_{1,3}(ch2a - 1)\sin\beta + \sum_{n=2}^{\infty} \{ \mathcal{A}_{n,3}[ch(n+1)a - \\ &-ch(n-1)a] + E_{n,3}[(n-1)sh(n+1)a - (n+1)sh(n-1)a] \} \sin n\beta. \end{aligned} \quad (13)$$

З граничних умов:

$$\sigma_\alpha|_{\alpha=c} = \tau_{\alpha\beta}|_{\alpha=c} = 0,$$

після перетворень отримаємо систему, розв'язками якої є наступні величини:

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{2}{ch2c}, & \mathcal{A}_{1,1} &= \frac{e^{-2c}}{2ch2c} \\ \Delta \cdot \mathcal{A}_{n,1} &= -n^2sh^2c + nshcchc - e^{-nc}shnc, \\ \Delta \cdot E_{n,1} &= nsh^2c, & \Delta &= 2(sh^2nc - n^2sh^2c) \\ G_2 &= \frac{-2}{ch2c}, & \mathcal{A}_{1,2} &= \frac{-e^{-2c}}{2ch2c}, \\ \Delta \cdot \mathcal{A}_{n,2} &= n^2sh^2c - nshcchc + e^{-nc}shnc, \\ \Delta \cdot E_{n,2} &= -nsh^2c, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{1,3} &= \frac{-e^{-2c}}{2ch2c}, \\ \Delta \cdot \mathcal{A}_{n,3} &= n^2sh^2c - nshcchc + e^{-nc}shnc, \\ \Delta \cdot E_{n,3} &= -nsh^2c. \end{aligned} \quad (15)$$

Тоді для функцій напружень маємо:

$$\mathcal{U}(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^3 \mathcal{U}_i(\alpha, \beta), \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \\ \frac{g\mathcal{U}_1}{\alpha p \cos^2\varphi} &= \frac{1}{ch2c} [\alpha(ch\alpha - \cos\beta) + ch(2c - \alpha)sh\alpha \cos\beta] + \\ &+ \frac{1}{2}sh\alpha + \sum_{n=2}^{\infty} [nshcsh(\alpha - c)shn\alpha - \\ &-sh\alpha shn(\alpha - c)shnc] \frac{\cos n\beta}{sh^2nc - n^2sh^2c}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{g\mathcal{U}_2}{\alpha p \sin^2\varphi} &= \frac{1}{ch2c} [\alpha(ch\alpha - \cos\beta) + sh\alpha ch(2c - \alpha)\cos\beta] + \\ &+ \frac{1}{2}e^{-\alpha} + \frac{1}{2}\cos\beta - \sum_{n=2}^{\infty} [nshcsh(\alpha - c)shn\alpha - \\ &-sh\alpha shncshn(\alpha - c)] \frac{\cos n\beta}{sh^2nc - n^2sh^2c}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{g\mathcal{U}_3}{\alpha p \sin 2\varphi} &= -\frac{1}{sh2c} sh(2c - \alpha)sh\alpha \sin\beta + \sum_{n=2}^{\infty} [nshcsh(\alpha - c)shn\alpha - \\ &-sh\alpha shn(\alpha - c)shnc] \frac{\sin n\beta}{sh^2nc - n^2sh^2c}. \end{aligned} \quad (19)$$

Для напружень на контурі отвору маємо:

$$\sigma_{\beta|\alpha=c} = \sum_{i=1}^3 p\sigma_{\beta,i}, \quad (21)$$

де

$$\sigma_{\beta,1} = 2\cos^2\varphi\left\{1 - 2\left(\frac{sh\ c\ \sin\ \beta}{ch\ c - \cos\ \beta}\right)^2\right\} + (ch\ \alpha - \cos\ \beta)\left(\frac{sh\ c}{ch\ 2\ c} + 2e^{-2c}\cos\ \beta + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \cos\ n\ \beta\right\} \quad (22)$$

$$\sigma_{\beta,2} = -2\sin^2\varphi\left\{1 - \frac{2sh^2\ c\ \sin^2\ \beta}{(ch\ c - \cos\ \beta)^2}\right\} + (ch\ \alpha - \cos\ \beta)\left(\frac{sh\ c}{ch^2\ c} + 2e^{-2c}\cos\ \beta + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \cos\ n\ \beta\right), \quad (23)$$

$$\sigma_{\beta,3} = -\sin\ 2\ \varphi\left\{\frac{8\ sh\ c\ \sin\ \beta\ (ch\ c\ \cos\ \beta - 1)}{(ch\ c - \cos\ \beta)^2} + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \sin\ n\ \beta + e^{-2c}\sin\ \beta\right\} \cdot 4(ch\ c - \cos\ \beta), \quad (24)$$

$$R_n = \frac{1}{sh^2nc - n^2sh^2c} (2n^4sh^3c \cdot e^{-nc} - 2n^3sh\ c\ ch\ c\ e^{-nc} + \frac{3}{2}n^2ch\ c\ e^{-nc} - \frac{1}{2}n^2sh\ c\ e^{-3nc} - \frac{1}{2}n\ ch\ c \cdot e^{-nc} + \frac{1}{2}n\ ch\ c \cdot e^{-3cn}). \quad (25)$$

На прямолинійному краю для напружень отримаємо:

$$\sigma_{\beta|\alpha=0} = p \sum_{i=1}^3 \sigma_{\beta,i}, \quad (26)$$

причому:

$$\frac{\sigma_{\beta,1}}{\cos^2\varphi} = 1 - (1 - \cos\ \beta)\left[-\frac{2e^{-2c}}{ch\ 2\ c}\cos\ \beta + 2\sum_{n=2}^{\infty} (n^3sh^2c - n^2sh\ c\ ch\ c + ne^{-nc}sh\ n\ c)\frac{\cos\ n\ \beta}{sh^2nc - n^2sh^2c}\right], \quad (27)$$

$$\frac{\sigma_{\beta,2}}{\sin^2\varphi} = (1 - \cos\ \beta)\left[-\frac{2e^{-2c}}{ch\ 2\ c}\cos\ \beta + 2\sum_{n=2}^{\infty} (n^3sh^2c - n^2sh\ c\ ch\ c + ne^{-nc}sh\ n\ c)\frac{\cos\ n\ \beta}{sh^2nc - n^2sh^2c}\right], \quad (28)$$

$$\frac{\sigma_{\beta,3}}{\sin\ 2\ \varphi} = 2(1 - \cos\ \beta)\left(-\frac{e^{-2c}}{sh\ 2\ c}\sin\ \beta + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(n^3sh^2c - n^2sh\ c\ ch\ c + ne^{-nc}sh\ n\ c)\sin\ n\ \beta}{sh^2nc - n^2sh^2c}\right). \quad (29)$$

У випадку розтягу півплощини вздовж прямолинійного краю, тобто при $\varphi = \pi/2$, маємо відомий результат [19] для напружень на контурі отвору:

$$\frac{\sigma_{\beta}}{p} = 2\left\{1 - 2\left(\frac{sh\ c\ \sin\ \beta}{ch\ c - \cos\ \beta}\right)^2\right\} + (ch\ \alpha - \cos\ \beta)\left(\frac{sh\ c}{ch\ 2c} + 2e^{-2c}\cos\ \beta + \sum_{n=2}^{\infty} R_n \cos\ n\ \beta\right\} \quad (30)$$

а також на прямолинійному краю:

$$\frac{\sigma_{\beta}}{p}\Big|_{\alpha=0} = 1 - (1 - \cos\ \beta)\left[-\frac{2e^{-2c}}{ch\ 2c}\cos\ \beta + 2\sum_{n=2}^{\infty} (n^3sh^2c - n^2sh\ c\ ch\ c + ne^{-nc}sh\ n\ c)\frac{\cos\ n\ \beta}{sh^2nc - n^2sh^2c}\right]. \quad (31)$$

В таблиці 1 наведено значення напружень σ_{β}/p в точках 0,С (рис.1) для деяких значень кута φ і для деяких віддалей центру отвору від краю.

Значення напружень σ_{β}/p в точці А (рис.1) подано в таблиці 2.

В таблиці 3 наведено значення напружень σ_{β}/p в точках О, С, А (рис.1) при значенні кута $\varphi = 10^\circ$.

Таблиця 1. Значення напружень σ_β/p в точках O, C .Table 1. Values stresses σ_β/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
∞	∞	1,00	1,00	0,54	3,01	2,95	1,54

Таблиця 2. Значення напружень σ_β/p в точках A .Table 2. Values stresses σ_β/p in points A .

c	$\lambda = \frac{d}{r} = \text{chc}$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_A$		
		$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 5^\circ$	$\varphi = 30^\circ$
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
∞	∞	3	2,95	1,54

Таблиця 3. Значення напружень σ_β/p в точках O, C, A при значенні кута $\varphi = 10^\circ$.Table 3. Values stresses σ_β/p in points O, C, A by value corner $\varphi = 10^\circ$.

α	$\lambda = \frac{d}{r}$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_O$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_C$	$\left[\frac{\sigma_\beta}{p}\right]_A$
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
∞	∞	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. Із цього розв'язку отримано відомий результат для розтягу півплощини з круговим отвором вздовж прямолінійного краю. Аналіз та підрахунки показують, що значення максимального коефіцієнта концентрації напружень досягається в тій точці контуру, яка найближча до прямолінійного краю, тобто в точці С (рис.1) і прямує до 3 при віддаленні отвору від краю півплощини, а в точці О прямує до 1. Як видно з таблиці 1, при $c = 0,60$, $\lambda = 1,19$, $\varphi = 0^\circ$ значення максимального коефіцієнта концентрації напружень рівне 5,06, при $\varphi = 5^\circ$ рівне 5,03, при $\varphi = 30^\circ$ рівне 2,07. При $c = 0,80$, $\lambda = 1,34$ значення максимального коефіцієнта концентрації

напружень відповідно при $\varphi = 0^\circ$ рівне 4,37, при $\varphi = 5^\circ$ рівне 4,35, при $\varphi = 30^\circ$ рівне 2,23.

Як видно з таблиці 3, при $c = 0,60$, $\lambda = 1,185$, $\varphi = 10^\circ$ значення максимального коефіцієнта концентрації напружень рівне 4,912.

При наближенні отвору до краю півплощини коефіцієнт концентрації напружень в точці С прямує до нескінченності.

Отримані результати дають змогу провести теоретичне визначення коефіцієнта концентрації напружень в 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 неосесиметричного 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. Шопа 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. Скінченное-элементный анализ 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 ІЗ 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*

Бубняк Т., Семерак В., Бурнаєв О., Пономаренко О., Шпак Л., Говда О. Напружений стан трансверсально-ізотропного середовища із сфероїдальним включенням за умов неідеального контакту.

Просторові задачі теорії пружності і термопружності є важливою частиною сучасної механіки деформівного твердого тіла. Їх актуальність визначається численним застосуванням цієї науки для вирішення важливих технічних і технологічних проблем у різних галузях виробництва. Необхідність таких досліджень обумовлена, в першу чергу, 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'язано з використанням ефективних аналітичних і чисельних 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.

В останні роки 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 в працях Улітка А.Т., Неміша Ю.М., Качаловської Н.Е. та інших 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 Підстригача Я.С., Подільчука Ю.М. 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 із 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 при різних механічних навантаженнях – стиску, розтягу, зсуві, згині та крученні.

Ключові слова: потенціальні функції, трансверсально-ізотропне середовище, неідеальний контакт, сфероїд, поля напружень і термонапружень.

Bubnyak T., Semerak V., Burnaev O., Ponomarenko O., Shpak L., Hovda O. The stress state of a transversely isotropic medium with a spheroidal inclusion under conditions of non-ideal contact.

Spatial problems of the theory of elasticity and thermoelasticity are an important part of modern mechanics of deformable solids. Their relevance is determined by the numerous applications of this science to solve important technical and technological problems in various branches of production. The need for such research is due, first of all, to knowledge of the strength of materials and structural elements. As a rule, extreme stresses are reached in the phase interface zones, since almost all structural materials are heterogeneous in their structure.

The problem of modeling the properties of the interphase boundary, taking into account the real features of its structure, is important. Obtaining reliable and complete information about stress distribution in structural elements is associated with the use of effective analytical and numerical methods for solving spatial problems of the theory of elasticity.

In the spatial problems of the theory of elasticity and thermoelasticity for transversely isotropic bodies, the solution is presented through potential functions that are harmonic in specially selected coordinate systems. This significantly reduces the mathematical difficulties that arise when solving specific boundary value problems.

In recent years, publications by both domestic and foreign scientists have appeared, in which problems of the theory of elasticity and thermoelasticity for an isotropic medium under conditions of non-ideal mechanical and thermal contacts are considered. In particular, in the works of A.T. Ulitka, Y.M. Nemish, N.E. Kachalovska. and others, axiometric

problems are considered. However, for a transversely isotropic body with inclusions of canonical forms, there are almost no solutions to such problems. In contrast to the analyzed problems for ideal contact, the solution of the latter is not obtained in a closed form, but is reduced to the solution of infinite systems of linear algebraic equations.

Important results in this direction were obtained in the works of Ya.S. Pidstrychach, Yu.M. Podilchuk. exact solutions of spatial problems of the theory of elasticity and static thermoelasticity in spherical, cylindrical, spheroidal, parabolic and other coordinate systems are constructed.

The statement of the problem of the theory of elasticity on the distribution of normal, meridional and circular stresses of a transversely isotropic medium containing an anisotropic inclusion in the form of a compressed spheroid under uniform all-round compression, depending on the geometry of the inclusion, is given.

Based on the obtained solutions of the spatial problems of the theory of elasticity and thermoelasticity for a transversely isotropic medium with a compressed spheroidal inclusion under conditions of non-ideal mechanical and thermal contacts, the distribution of thermal stresses both in the medium and in the inclusion under the action of arbitrary linear temperature and force fields was investigated. Engineering formulas for calculating stress concentration in the environment and inclusion under various mechanical loads - compression, tension, shear, bending and torsion - were obtained.

Key words : potential functions, transversally isotropic medium, contact, sphere, field of pressure.

Постановка проблеми. Просторові задачі теорії пружності і термопружності є важливою часиною сучасної механіки деформівного твердого тіла. Їх актуальність визначається численним застосуванням цієї науки для вирішення важливих технічних і технологічних проблем у різних галузях виробництва. Необхідність таких досліджень обумовлена, в першу чергу, 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'язано з використанням ефективних аналітичних і чисельних 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 [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В останні роки з'явилися публікації як

Виклад основного матеріалу. Для трансверсально-ізотропного тіла загальний розв'язок рівнянь статичної термопружності представляється через потенціальні функції

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial}{\partial x} (\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_4) + \frac{\partial \Phi_3}{\partial y} \\ v &= \frac{\partial}{\partial y} (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_4) - \frac{\partial \Phi_3}{\partial x} \\ w &= k_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial z} + k_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} + k_4 \frac{\partial \Phi_4}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

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 [8-10].

вітчизнчих так і зарубіжних вчених, в яких розглядаються задачі теорії пружності і термопружності для ізотропного середовища в умовах неідеального механічного і теплового контактів. Зокрема в працях Улітка А.Т., Неміша Ю.М., Качаловської Н.Е. та інших 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 [4-6].

Важливі результати в цьому напрямі отримані в роботах Підстригача Я.С., Подільчука Ю.М. побудовані точні розв'язки просторових задач теорії пружності і статичної термопружності у сферичній, циліндричній, сфероїдальній, параболічній та інших системах координат [1].

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 [7].

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 співпадання граничних поверхонь необхідне виконання рівностей для ($\eta_j = \eta_{j0}$):

$$a_1 \operatorname{ch} \eta_{10} = a_2 \operatorname{ch} \eta_{20} = a_3 \operatorname{ch} \eta_{30};$$

$$a_1 \sqrt{v_1} \operatorname{sh} \eta_{10} = a_2 \sqrt{v_2} \operatorname{sh} \eta_{20} = a_3 \sqrt{v_3} \operatorname{sh} \eta_{30}. \quad (4)$$

Частинний розв'язок неоднорідних рівнянь рівноваги, який відповідає дії лінійного температурного поля в середовищі $T_0 = ax + by + cz + d$, будемо у вигляді [11-12]

$$\begin{aligned} \Phi_4(x, y, z) &= \frac{1}{2} v_4 k_1 \left\{ A_0 \int_{q_4}^{\infty} (z_4 - z_4(\mu))^2 \frac{d\mu}{\Delta(\mu)} - \right. \\ &- C \left[\int_{q_4}^{\infty} z_4^2(\mu) (z_4 - z_4(\mu)) \frac{d\mu}{(\mu^2 - 1)\Delta(\mu)} - \right. \\ &\left. \left. - \frac{1}{3} \int_{q_4}^{\infty} (z_4^3 - z_4^3(\mu)) \frac{d\mu}{(\mu^2 - 1)\Delta(\mu)} \right] + \right. \\ &\left. + (Ax + By) \int_{q_4}^{\infty} (z_4 - z_4(\mu))^2 \frac{d\mu}{\mu^2 \Delta(\mu)} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{де} \quad z_4(\mu) = a_4 \sqrt{\mu^2 - 1} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2 + y^2}{a_4^2 \mu^2}}, \quad \Delta(\mu) = \mu \sqrt{\mu^2 - 1}.$$

Якщо до граничної поверхні сфероїда ($\eta_j = \eta_{j0}$) прикладено зусилля σ_{ij}^0 , то розв'язок задачі про напружено-деформований стан у трансверсально-ізотропному середовищі зі сфероїдальним включенням за діє 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 ($\eta_j = \eta_{j0}$), $j = 1, 2, 3$:

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta}^{(1)} &= \sigma_{\eta}^{(2)} + \sigma_{\eta}^{(\text{ч.н.})}; \quad \tau_{\eta\theta}^{(1)} + \tau_{\eta\theta}^{(\text{ч.н.})} = 0; \\ \tau_{\eta\theta}^{(1)} &= 0; \quad \tau_{\eta\varphi}^{(2)} + \tau_{\eta\varphi}^{(\text{ч.н.})} = 0; \quad \tau_{\eta\varphi}^{(1)} = 0; \\ u_{\eta}^{(2)} + u_{\eta}^{(0)} + u_{\eta}^{(\text{ч.н.})} &= u_{\eta}^{(1)} + u_{\eta}^!. \end{aligned} \quad (6)$$

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 $\sigma_{\eta}^{(\text{ч.н.})}$, $u_{\eta}^{(\text{ч.н.})}$ отримано на основі частинного розв'язку (5), а $u_{\eta}^{(0)}$, $u_{\eta}^!$ – 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 вигляд [13-16]:

$$\begin{aligned} \Phi_j(x, y, z_j) &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{n+1} \frac{n+m}{i(2n+1)} \left[\frac{P_{n+1}^{(m)}(p_j) Q_{n+1}^{(m)}(i\bar{q}_j)}{(n+m)(n-m+1)} - \right. \\ &\left. - \frac{P_{n-1}^{(m)}(p_j) Q_{n-1}^{(m)}(i\bar{q}_j)}{(n-m)(n-m+1)} \right] \cdot (\delta_j a_{nm}^{(j)} \cos m\varphi + b_{nm}^{(j)} \sin m\varphi), \\ (j &= 1, 2, 3, \delta_1 = \delta_2 = 1, \delta_3 = -1, i^2 = -1) \end{aligned} \quad (8)$$

де $P_n^{(m)}(p), Q_n^{(m)}(i\bar{q}_i)$ – 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 та рис.2 наведено концентрацію напружень для сфероїдального включення різної геометрії $\frac{b}{a} = 0,4; 0,6; 0,8$, коли на нескінченності задано одноосний стиск, тобто $\sigma_z^0 = -c_0$.

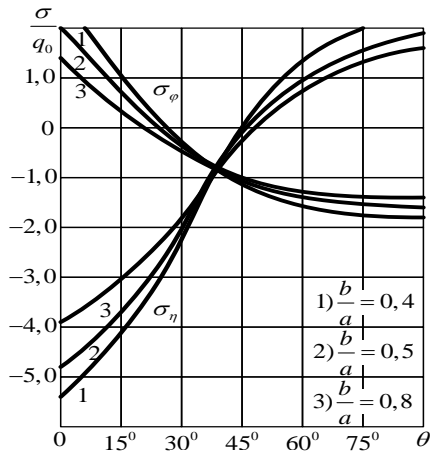


Рис.1. Характер концентрації нормальних та кругових напружень.

Fig. 1. Character of concentration of normal and circular stresses.

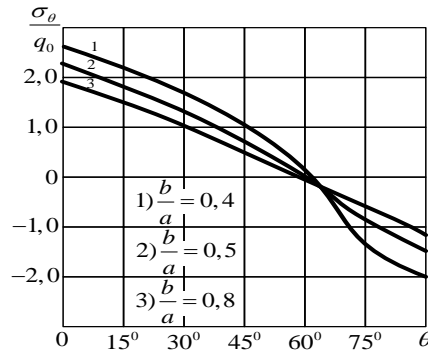


Рис.2. Характер концентрації меридіальних напружень.

Fig. 2. Character of meridional stress concentration.

Висновки. При одноосному стиску вздовж осі OZ нормальні та кругові напруження σ_η і σ_ϕ

(див. рис.1) перерозподіляються при $\theta = 35 - 36^\circ$, спостерігається перехід від розтягуючи до стискаючих напружень. Зміна знаку меридіальних напружень σ_θ (див. рис.2) має місце при $\theta = 60^\circ$.

При збільшенні відношення b/a осей сфероїда вздовж OZ і OX концентрація напружень спадає.

При рівномірному всесторонньому стиску мінімальні стискаючі напруження локалізуються біля полюса великої осі включення. Максимального значення нормальні та меридіальні напруження досягають на полюсі меншої осі сфероїда. Напруження мають стискаючий 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 із стиснутим сфероїдальним включенням в умовах неідеального механічного і теплового контактів, досліджено розподіл термо-напружень 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 при різних механічних

навантаженнях – стиску, розтягу, зсуві, згині та крученні.

Бібліографічний список

1. 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.
2. Соколовський Я. І. Напружений стан трансверсально-ізотропного середовища із сфероїдальним включенням при неідеальним механічним контакті. *Теоретическая и прикладная механика*. 1995. Вип. 25. С. 17-26.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. Бубняк Т., Семерак В., Пономаренко О., Богач М., Воліна Т. Про напруження в композитах при нагріванні. Вісник Львівського національного університету природо користування: агроінженерні дослідження. №27. Львів: Львів НУП, 2023 32-37.

7. 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, № 11, 2010, Львів, С.14-27.

8. 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.

9. 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.

10. Підстригач Я. С., Ярема С. Я. Температурні напруження в оболонках. Київ:

Вид-во АН УРСР, 1961. 212 с.

11. Підстригач Я. С., Коляно Ю. М. Температурні поля, що не встановилися, і напруги в тонких пластинках. Київ: Наук. думка, 1972. 308 с.

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.

16. 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.

Стаття надійшла: 15.06.2024.

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*

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. Основна увага приділяється необхідності забезпечення високої якості продукції машинобудування, яка визначає рівень попиту на вітчизняну техніку та її конкурентоспроможність на внутрішньому й міжнародному ринках. У статті проведено глибокий аналіз сучасного стану підприємств галузі та виявлено ключові фактори, які перешкоджають досягненню високої якості продукції. Особливу увагу 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 найбільш ефективними 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.

Крім того, стаття містить пропозиції щодо створення сприятливих умов для розвитку машинобудівних підприємств, зокрема, шляхом законодавчого врегулювання питань якості та диверсифікації виробництва. Підкреслюється важливість державної підтримки, спрямованої на стимулювання інновацій та підвищення якості продукції. Основний акцент робиться 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.

Berezovetskiy S., Humeniuk R., Shvets O., Berezovetska O., Koruniyak P. Prospects for the reorganization of machine-building enterprises into large machine-building firms of Ukraine

The article is devoted to the problem of increasing the competitiveness of Ukrainian machine-building enterprises, which is an important task for ensuring the national economy with modern technological methods of production. Main consideration is given to the need to ensure high quality machinery products, which means the demand for domestic technology and competitiveness in domestic and international markets. The article carried out an in-depth analysis of the current production of machinery and identified the key factors that influence the achievement of high-quality products. The role of organizational and technological aspects in the ensured innovative development of mechanical engineering and the promotion of advanced production methods, which are based on light evidence, is highly appreciated. It has been found that in-house manufacturing technology systems are the most effective for ensuring complete control over the life cycle of products - from development to disposal, which allows achieving high standards of quality.

An analysis of the historical aspects of the development of machinery in Ukraine points to the problems that arose from the breakdown of direct ties between manufacturers and technology suppliers. It was found that the introduction of centralized repair and maintenance production led to a decrease in the efficiency of technical maintenance and, apparently, to a decrease in the efficiency of equipment operation. The state has established that the renewal of direct production-technological links and the establishment of current methods of organizing production are the key minds for increasing the efficiency and competitiveness of Ukrainian machinery new products.

In addition, it is necessary to comply with the proposals of generously willing minds for the development of machine-building enterprises, agriculture, and the way of legislative regulation of food supply and diversification of production. The importance of government support aimed at stimulating innovation and increasing the quality of products is reinforced. The main emphasis is on the need to implement program approaches to ensure the growth of production obligations, advances in the technical characteristics of machines, as well as the development of technological systems to ensure the effective operation of traction equipment life cycle.

Key words: mechanical engineering, reorganization, production system, mechanical engineering 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 завантаження виробничих потужностей [1].

Забезпечення якості вітчизняних машин та обладнання на рівні найкращих світових аналогів веде до відмови споживачів від придбання дорогої імпортової техніки та сприяє підвищенню попиту та обсягів виробництва вітчизняної техніки, створенню 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.

В сучасних умовах господарювання машинобудування є основою економіки будь-якої держави та грає вирішальну роль у створенні матеріально-технічної бази господарства. Випускаючи засоби виробництва для різних галузей народного господарства, машинобудування забезпечує комплексну механізацію й автоматизацію виробництва, тим самим 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 обладнання, 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 ремонтнообслуговуючих виробництв стало непереборною перешкодою на шляху підвищення якості та розвитку прямих виробничо-технологічних та економічних зв'язків між виробниками та споживачами техніки. В 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 та ін.

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 відмовими. Раптові відмови техніки, якщо вони відбуваються на морі, у повітрі, космосі, в бойових умовах, можуть призвести до серйозних наслідків, не тільки до втрат матеріальної частини, але і до трагедії, техногенної катастрофи. При виконанні виробничо-технологічних процесів у різних сферах економіки виникнення відмов техніки веде, як правило, до економічних втрат ресурсів, продукції, доходу, погіршення показників ефективності виробництва [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні тенденції розвитку машинобудівного комплексу України в своїх працях досліджували такі науковці, як: 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 інші [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 в напрямку забезпечення і підвищення якості продукції машинобудування всіх структур фірмової виробничо-технологічної системи на всіх етапах життєвого циклу машини: проєктування, 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 там 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. З 35...40 тис. винаходів і патентів, щорічно реєструються в країні, тільки 7...10 % знаходять застосування в реальному масовому виробництві. Тоді як у високорозвинених зарубіжних економіках рівень використання машинобудівними 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 в якості основних методів дослідження застосовувалися

сучасні методики обґрунтування та оптимізації параметрів, збору, систематизації та обробки вихідної та статистичної інформації про процеси виробництва та використання машин та обладнання за прямим призначенням, забезпечення їх 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].

Головним 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, найбільш доцільною та ефективною в умовах ринкової конкуренції є фірмова виробничо-технологічна система (рис. 1).

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.

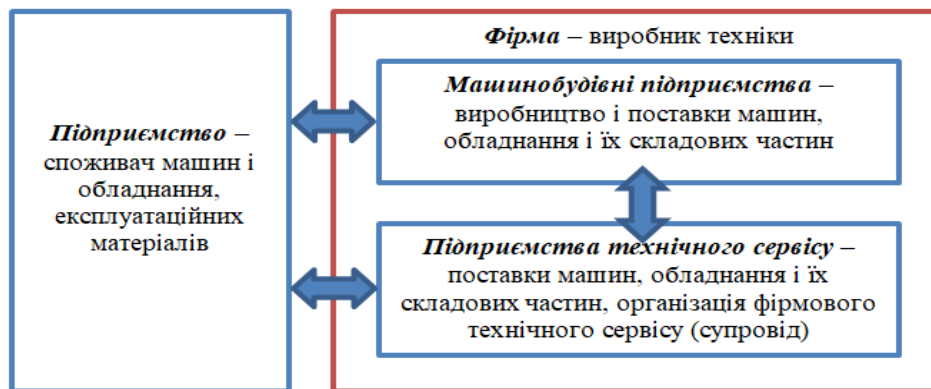


Рис. 1. Організація технічного обслуговування продукції фірми
Fig. 1. Organization of technical maintenance of the company's products

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 зробити висновок про доцільність та необхідність реорганізації існуючої 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 максимально 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 корегування 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. Проведення цієї роботи дозволить 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. Приймаючи 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 включати 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 таким чином випуск конкурентоспроможної техніки, дотируючи машинобудівне виробництво для випуску техніки світового рівня якості, держава створює умови для його прискореного інноваційного розвитку.

На даному 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 проектування, конструювання, виготовлення та експлуатації машин для оперативного впливу на якість проду-

кції 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 фірмову систему технічного сервісу. При використанні існуючого ремонтно-обслуговуючого виробництва як фірмова система технічного сервісу необхідно попередньо скоригувати цілі та завдання її функціонування, критерії оцінки діяльності. Для цього можуть використовуватися існуючі 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].

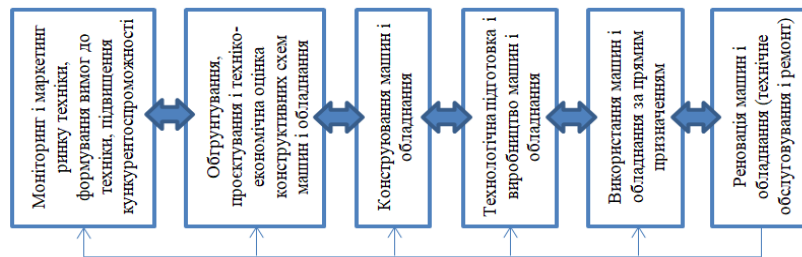


Рис. 2. Організація фірмового інженерно-технологічного супроводу продукції машинобудування
Fig. 2. Organization of firm engineering and technological support for mechanical engineering products

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 хмашин; 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, проектні, конструкторські, виробничі, інженерно-технологічні та інші структури, зусилля яких мають бути об'єднані та сконцент-

ровані на вирішенні проблем якості. Фірма безпосередньо управляє 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, ремонтпридатності 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 існуючих систем технічного сервісу мають бути змінені та 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 нові критерії оцінки діяльності (справність і безвідмовність) забезпечує економію 20...25% виробничих ресурсів (енергії, запчастин та інших).

Висновки. Основними недоліками, що гальмують інноваційний розвиток машинобудівного виробництва та машинно-технологічних галузей, є:

- 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 існуючі заводо-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 машино-використання.

Визначити 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). С10-20.

2. Васильєва Н. Ф., Кавура В. Л. Машинобудування як матеріально-технічна основа неіндустріальної 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>

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/Menagement/2009_647/11.pdf

7. Чупир О.М. Тенденції розвитку машинобудівного комплексу України: сучасний стан і перспективи. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. № 43, 2013. 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. Смелянов 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.

ШЛЯХИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Василь Кохан¹, к.т.н., Олександр Гончарук²

¹Національної академії сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного

Вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, Україна,

e-mail: vdy29121973@gmail.com

²Національний університет «Львівська політехніка» Інститут поліграфії та медійних

технологій Вул. Підголоско, 19, м. Львів, Україна

e-mail: goncharuk131@gmail.com

Кохан В., Гончарук О. Шляхи інтенсифікації процесу підготовки деталей для відновлення автомобільної техніки.

Війна Російської Федерації з Україною суттєво змінила технологічний процес підготовки колісної військової автомобільної техніки до відновлення робіт, ремонту і технічного обслуговування, через втрату стаціонарних ремонтних пунктів, баз, заводів. Згідно з аналізом існуючих військових і цивільних ультразвукових установок і технологій очистки, що застосовуються для замочування і очищення паливних та ходових систем автомобілів, було виявлено ряд важливих аспектів та недоліків в процесі роботи установок, які слід врахувати при 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 наступні вимоги: ефективність очищення, мобільність, енергоефективність; надійність і простота в обслуговуванні, безпека використання, а також має враховувати вимоги 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.

Kohan V., Honcharuk O. Ways to intensify the process of preparation of parts for restoration of automotive equipment.

The war of the Russian Federation with Ukraine has significantly changed the technological process of preparation of wheeled military automotive equipment for restoration works, repair and maintenance, due to the loss of stationary repair stations, bases, factories. According to the analysis of existing military and civilian ultrasonic units and cleaning technologies used for soaking and cleaning of fuel and running systems of vehicles, a number of important aspects and shortcomings in the process of operation of the units have been identified, which should be taken into account in the development of new designs. Such ultrasonic units are often used for cleaning parts subjected to significant contamination during operation, in particular fuel injectors, filters, pumps, chassis parts, etc. and require the following requirements from ultrasonic units: cleaning efficiency, mobility, energy efficiency; reliability and ease of maintenance, safety of use, and should also take into account the requirements for safe use in military conditions.

A new technology of parts surface preparation by ultrasound for mobile restoration and repair units of the Defense Forces of Ukraine is proposed. The new technology in combination with a patented universal unit will meet the following requirements, in particular:

- Have a compact and lightweight design for easy transportation and use in the field.
- operate from standard power sources, with the possibility of autonomous and network power supply (from generators and other alternative sources).
- utilize advanced ultrasonic technology to deep soak and clean fuel systems and chassis parts.
- be equipped with an intuitive interface for quick setup and use without the need for additional training.

The universal ultrasonic unit with the new cleaning technology will contribute to increasing the efficiency and quality of task fulfillment and reducing the time to restore automotive equipment in combat conditions, which is especially relevant for units that are engaged in maintenance in the field.

Key words: restoration, mobile repair, ultrasound, military automotive equipment.

Постановка проблеми. Згідно з аналізом існуючих ультразвукових установок, що застосовуються для обслуговування паливних та ходових систем колісних автомобілів, було виявлено ряд важливих аспектів та 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 короткий 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 врахувати 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 і яка би відповідала усім вимогам технологічного процесу підготовки деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений авторами аналіз літературних джерел [1–2], веб-сайтів виробників і підприємств, що надають послуги [3–6], а також патентів [7–9] показав, що технологічний процес очищення деталей від забруднення характеризується 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 є однією із визначальних факторів якісної підготовки деталей до відновлення. З узагальненої схеми технологічного процесу очищення деталей, що представлена на рис. 1, видно які складові процесу впливають на якість підготовки деталі до очищення і під час очищення деталі.

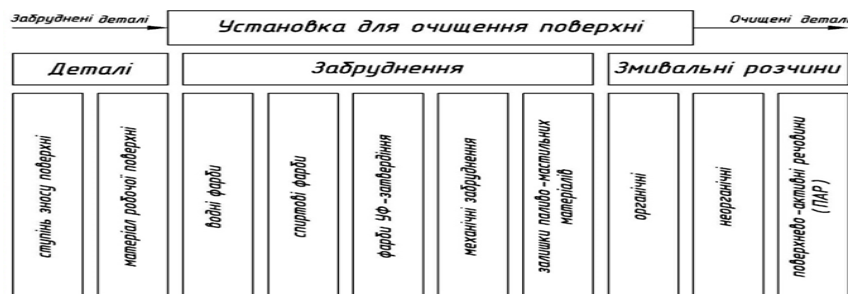


Рис. 1. Складові традиційного процесу очищення поверхні деталей

Fig. 1. Components of a traditional workpiece surface cleaning process

Зі схеми добре видно, що змивальні розчини є тією складовою процесу, які можуть варіюватися в залежності від зміни інших складових аналізованого технологічного процесу [1–3].

Сьогодні існує багато методів очищення автомобільних деталей та технологій їх реалізації, які детально висвітлено у спеціалізованих джере-

лах [1-6]. Група учени 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, у більших випадках 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 підвищити

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 можливо 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 способах очищення деталей і пристроїв за природою (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 – змивочної речовини (АЗР) за допомогою тенів, що активно руйнують забруднення на поверхні деталей.

Набирають оберти 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. В більшості способи що використовуються характеризуються значною трудомісткістю, використанням агресивних АЗР і високих температур, що несе у собі потенційну небезпеку для здоров'я обслуговуючого персоналу. В той час як 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.

З усього вищевказаного випливає, що існуюча 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 здійснювали негативний вплив 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 експлуатаційних характеристик АЗР, що може суттєво удосконалити цей процес.

На рис. 3 зображено технологічна схема очищення деталей. На рис. 4 бачимо технологічну схему очищення деталей і пристроїв запропонованим способом за допомогою ультразвуку та АЗР, розробки якого вимагає робоча гіпотеза.

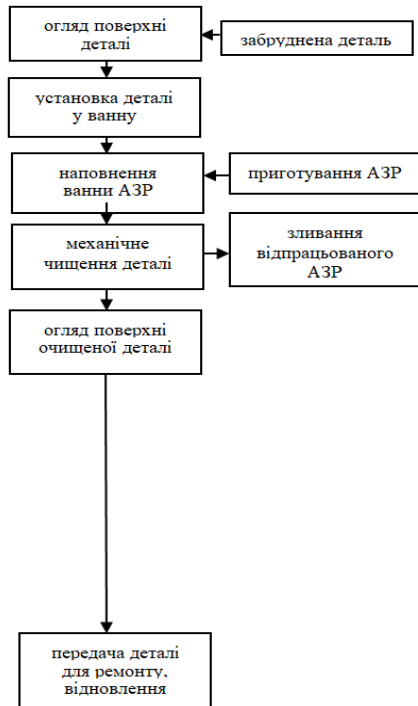


Рис. 3. Технологічна схема очищення деталей традиційним способом
Fig. 3. Technological scheme of parts cleaning in the traditional way

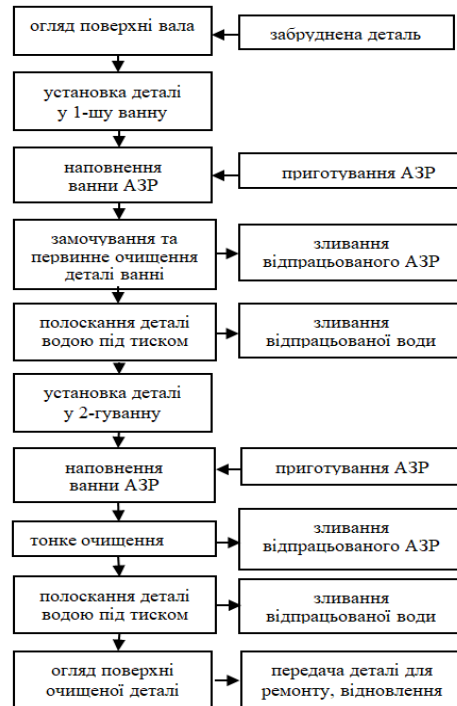


Рис. 4. Технологічна схема очищення деталей запропонованим способом
Fig. 4. Technological scheme of parts cleaning by the proposed method

Порівнюючи наведені технологічні схеми можна зробити висновок, 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, створена можливість використання установки для відновлення деталей в авторемонтному виробництві.

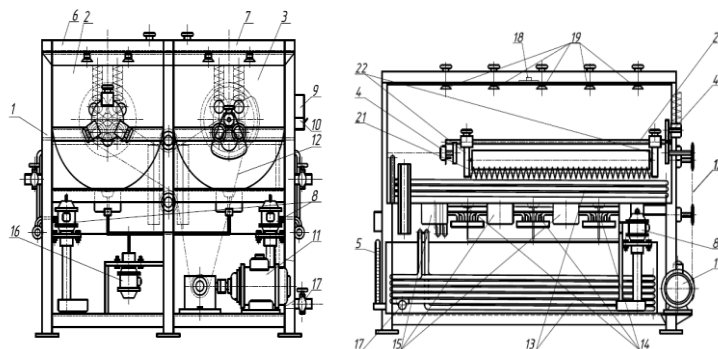


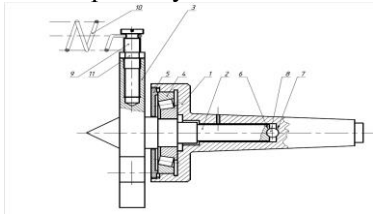
Рис.5. Універсальна установка для очищення деталей амортизаторів, карбюраторів, паливних насосів, паливної апаратури ультразвуком [11].

Fig. 5. Universal installation for cleaning shock absorber parts, carburetors, fuel pumps, fuel equipment with ultrasound [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, тенів підігріву змивного розчину 13, форсунок подачі повітря під тиском 14, генераторів ультразвуку 15, компресора 16, крана зливу 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 валу 23.

Особливістю універсальної установки є те, що вона працює в двох режимах (“Занурення”, “Обертання”) і виконує три операції (“Замочування”, “Очищення” “Тонке очищення”).

Для якісної очистки деталей і пристроїв в установці використовується запатентований авто-



рами 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 шпінделя, кришку 5 з фетровим ущільнювачем, який вкручений в корпус 1, одночасно захищаючи підшипник від забруднення та витікання мастила, а також, упираючись у торець зовнішнього кільця підшипника 4, регулює внутрішній зазор у ньому. В хвостовику шпінделя 2 і в корпусі 1 виконані виймки (заглиблення) у формі півсфер 6 і 7, куди встановлена кулька 8, що служить опорою задньої частини шпінделя. Крім того шпindel містить регулюючі стійки-тримачі 9 для пружин розтягу 10, і контргайки 11.

Рис. 6. Знімний центр з суцільним диском для кріплення деталей, що потребують технологічної обробки.[12]

Fig. 6. Removable center with a solid disk for mounting workpieces requiring machining [15]

Використання універсальної установки забезпечує вказаний технічний результат і може бути впроваджено у відновлених підрозділах Сил оборони України при підготовці деталей і приладів до відновлення і ремонту.

І підтвердженням цього є отримання колективу науковців-винахідників диплому першого ступеня у номінації “Автомобільна техніка” на конкурсі “Кращий винахід року”.

Висновок. З усього вищенаведеного видно, що 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 (ост. звертання: 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/ О. Ф. Луговський, І. А. Гришко, А. І. Зілінський, А. В. Шульга, А. В. Мовчанюк, І. М. Берник*. Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. 268 с.

3. Послуги ультразвукового очищення забруднень будь-якої складності!. *UCS*. URL: <https://ultrasonic.in.ua/ua> (ост. звертання: 01.09.2024).

4. Ультразвукові ванни. *Masteram*. URL: https://masteram.com.ua/uk/catalogue/ultrasonic-cleaning/ultrasonic-cleaners/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwurS3BhC GARIsADdUH50hpkHW6KepHbQPRTZ0uoN2l7T

mVOH8zclZL1m01WvY4OnsEfww0LYaAsz3EALw_wcB (ост. звертання: 03.09.2024).

5. Стандартні УЗВ мийки (до 100 л). *Unichem*. URL: https://unichem.com.ua/uk/standartnie_uzv_moiki_d_o_100_l (ост. звертання: 03.09.2024).

6. Ультразвукове обладнання і технології. *ТОВ “ПУТЕК”*. URL: <https://ultrasonic.com.ua/> (ост. звертання: 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. Способ ультразвуковой 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/shkidlyvyy-vplyv-ultrazvuku-na-zdorovya-pracyuyuchyh-ta-yogo-profilaktyka> (ост. звертання: 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. – 4с.

Стаття надійшла 10.09.2024

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.fiyalkovsky@i.ua, kristinamozul@gmail.com, sviatoslav.shtohryn@gmail.com,
pollylub@ukr.net, l.chukhrai@gmail.com*

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. Виконано аналіз сучасних аналогів ШІ та обґрунтовано доцільність їх 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 їх точності, надійності та простоти використання. Акцентується на тому, що незважаючи на недоліки існуючих 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 загальноосвітову 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.

Fiialkovskiy V., Mozul Kh., Shtrohryn S., Lub P., Chukhrai L. The online learning services usage with artificial intelligence.

The experience, advantages and disadvantages of using AI technologies in education are summarized. The current state of artificial intelligence in education is analyzed. The analysis of modern AI analogs is carried out and the feasibility of their use is substantiated. Online learning services with AI technologies that are popular in both educational institutions and manufacturing companies are described. The main attention is paid to such language models and services as Chat GPT, Microsoft Gemini, and Na Urok. It is emphasized that AI can provide information and answers to questions on various subjects, helping to expand one's knowledge, etc. The author provides a list of tasks in higher education to which it is advisable to apply AI technologies, which will simplify and make student learning and teacher work more interesting. The advantages and disadvantages of individual online learning services that use AI technologies are presented, and the indicators of their accuracy, reliability and ease of use are summarized. It is emphasized that despite the shortcomings of existing AI, they have significant advantages over manual search for the necessary information, including real-time data collection, increased accuracy, and a relatively lower level of inconsistency. The use of the considered AI tools in the educational process makes it possible to increase the correctness of queries, the accuracy of data collection, and, accordingly, to increase the correctness of the information obtained for educational content. It is established that the use of AI has great potential for the development of the educational process. The author emphasizes the growing global interest in AI technologies in the manufacturing sector. This trend is logically related to the requirements for students' knowledge, which will be needed in their future. It has been established that the use of AI has great potential for improving the efficiency of the educational process and beyond.

Keywords: online service, training, 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 значним чином 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 [1,12]. 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 такі як перевірка роботи студентів, оцінювання та планування занять тощо. Такі технології робитимуть освіту більш доступною для людей із особливими потребами [7-9].

Постановка завдання. Мета - Проаналізувати досвід використання ШІ в освітньому процесі на прикладі таких інструментів як Chat GPT, Gemini, «На Урок». Завдання – Проаналізувати поширення ШІ інструментів в освіті, визначити тенденцію використання застосування ШІ світовими компаніями, побудувати таблицю переваг та недоліків різних ШІ застосунків.

Виклад основного матеріалу. З розвитком технологій штучний інтелект (ШІ) стає необхідним інструментом для вдосконалення освітнього процесу. Його використання може значно полегшити завдання освітян, забезпечити персоналізований аналіз, а потім самостійно готувати доповідь на її основі – це позитивний приклад ефективного

лізоване 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 [17]. Автоматизовані системи здатні швидко та об'єктивно оцінити відповіді, надаючи докладні результати та вказівки для покращення вирішення завдань у лабораторно-практичних роботах. Застосування ШІ включає в себе 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 в 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 [16].

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 в 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 лежати 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. Використовувати ChatGPT для швидкого збору інформації та первинного використання інструменту. До того ж такі кейси використання ШІ в українській освіті вже є, для

прикладу «На Урок» [21]. Однак, важливо усвідомлювати, що недостатня перевірка наданої ШІ інформації може призвести до хибних висновків і неправильного тлумачення будь-якої теми [20].

питань пов'язаних із застосуванням ШІ в освіті, збереження конфіденційності даних, розуміння принципів створення адаптивних освітніх систем, які враховують індивідуальні

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 потреби студента, здатність генерувати та впроваджувати інновації, швидка адаптація до нових технологій в сфері ШІ тощо [1-5].

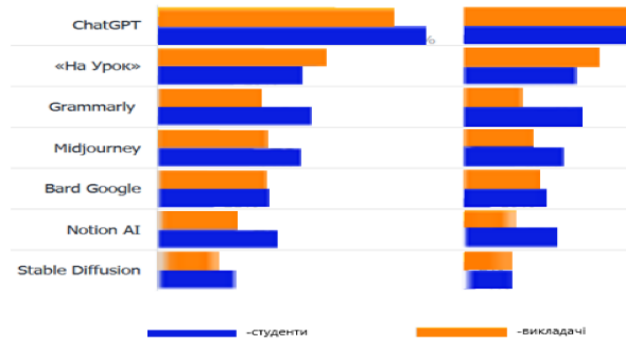


Рис. 1. Поширення ШІ-інструментів в освіті [1]:

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, допомагаючи розширити свої знання тощо. Допомагати розв'язувати математичні задачі, фізичні вправи, літературні аналізи; надавати пояснення складних теоретичних концепцій з різних предметів, допомагаючи зрозуміти матеріал; допомагати у вивченні мов, надаючи правильні переклади, вправи та пояснення граматичних правил; надавати відомості з програмування, допомагати студентам розуміти алгоритми та вдосконалювати навички з IT; формувати навички під час самостійного навчання, надаючи відповідні рекомендації та ресурси; сприяти творчому

мисленню, допомагаючи генерувати ідеї та реалізовувати творчі проєкти; пропонувати цікаві факти, історії та завдання для концентрування уваги тощо (рис. 1).

Аналізуючи відомі показники залученості застосунку ШІ «На Урок» [15, 19, 21] де близько 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 в майбутньому використовувати у своїй кар'єрній діяльності.

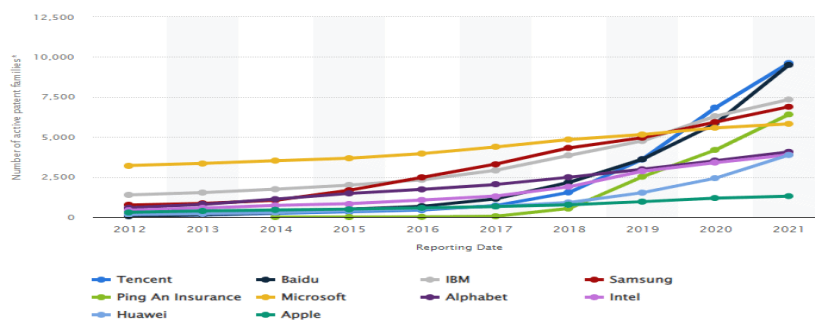


Рис. 2. Тенденції використання застосунків ШІ різними світовими компаніями [2]

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 слід перевіряти. Сервіси які частково використовують ШІ в освіті наведено у табл. 1 [11].

Таблиця 1. Сервіси онлайн навчання із технологіями ШІ
Table 1. Online training 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

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 поста-

вленого завдання. Однією з переваг використання ШІ [13-14] 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 [10] в освіті являється 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.

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, слід зазначити що використання застосунків ШІ в освіті піднімає множину 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 [18]. Університети в свою чергу 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 значним чином спрощуватиме і підніматиме 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, загальноосвітова увага до використання застосунків ШІ у виробничій сфері стає дедалі більшою тому молоді працівники повинні також володіти ШІ-технологіями у своїй професійній діяльності.

3. В результаті виконаного аналізу щодо сфери використання, переваг і недоліків застосунків ШІ встановлено, що переважна їх більшість 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-prykkladiv-shtuchnogo-intelektu-u-shhodennomu-zhytti/> (дата звернення 05.03.2024)

2. Ahram T. Artificial Intelligence in Education: Challenges and Opportunities for Sustainable Development. Cham, Switzerland, 2023. 349 p.

3. Azevedo R., Moos D. AI in Education: Promise and Implications for Teaching and Learning. Leiden, Netherlands, 2018. 42 p.

4. *Artificial Intelligence in Education*. 19th International Conference. London, UK. 2018.P. 152-160.

5. Luckin R. Artificial Intelligence in Education. London, 2020. 224 p.

6. Milner-Bolotin M. The Role of Artificial Intelligence in Education: Perspective of Educational Developers. Cham, Switzerland. 2023. 210 p.

7. Moos D., Azevedo R. Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning. Cham, Switzerland. 2018. 150 p.

8. Блог "ШІ в освіті" URL: <https://ms.detector.media/internet/post/32898/2023-09-07-yunesko-rozrobyla-porady-shchodov-ykorystannya-shi-v-osviti/> (дата звернення 05.03.2024)

9. 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

10. 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.

11. Драч І., Петроє 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.

12. Коломієць А.М., Кушнір О.І. Використання штучного інтелекту в освітній та науковій діяльності: можливості та виклики. Київ, 2024. №70. С. 45-57.

13. Корнелл Р., Кузьміна І. Персоналізоване навчання за допомогою штучного інтелекту. Хам, Швейцарія. 2023. 328 с.

14. Ковальчук С., Заболотної О., Ковтун І. Штучний інтелект та освіта: український контекст. Київ: Лілея-НВ. 2021. 224 с.

15. Лозов І., Петренко О. Використання штучного інтелекту в освіті: посібник для вчителів. Київ: Лілея-НВ. 2023. 184 с.

16. Мовчан А. Школа майбутнього: як штучний інтелект змінює освіту. Київ: Наш формат. 2020. 288 с.

17. Сайт "Інститут штучного інтелекту в освіті" URL: <https://www.ipai.net.ua/> (дата звернення 05.03.2024)

18. 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)

19. Чи може штучний інтелект замінити вчителів? URL: <https://vseosvita.ua/news/chy-zmozhe-shtuchnyi-intelekt-zaminyty-vchytelia-6235.html> (дата звернення 05.03.2024)

20. Штучний інтелект: революція в освіті? URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2024/01/29/709270/> (дата звернення 05.03.2024)

21. Штучний інтелект в освіті: три аспекти: <https://osvita.ua/school/method/91077/> (дата звернення 05.03.2024)

22. 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)

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 Тригуба¹, д. т. н., Оксана Маланчук², к. ф.-м. н., Інна Тригуба¹, к. с-г. н., Анна Мармуляк³, аспірантка, Василь Демчина³, ад'юнкт, Олег Андрушків³, здобувач, Роман Олійник³, здобувач

¹ Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,

² Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького,
вул. Пекарська, 69, м. Львів, Україна,

³ 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; demchynavasy1@gmail.com; andruskivoleg6@gmail.com;
oliinykroman186@gmail.com*

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

Виконано аналіз стану 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. Означені особливості використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами. Пропонується оцінювати рівень інформаційного розвитку проєктних офісів на підставі аналізу взаємодоповнюючих процесів діджиталізації, цифровізації та цифрової трансформації. На основі цього класифіковано проєктні офіси 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.

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 прийняття рішень проєктними менеджерами та рівня інформаційного розвитку проєктних офісів. Використання запропонованого підходу забезпечує врахування особливостей формування даних про показники проєктного середовища. Вони лежить 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 виконано кількісне оцінення показників та рівня інформаційного розвитку проєктних офісів для заданих умов. Встановлено, що найвища швидкість доступу до інформації спостерігається у екологічних проєктах, що складає приблизно 80 Кбайт/сек, а найнижча швидкість доступу у соціальних проєктах – 32 Кбайт/сек. Найбільше значення показника покращення якості прийняття рішень спостерігається у транспортних проєктах, близько 25% в порівнянні з прийняттям 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 прийняття управлінських рішень проєктними менеджерами.

Ключові слова: інформаційні технології, ініціація, планування, проєкти, інформаційний розвиток, проєктні офіси.

Tryhuba A., Malanchuk O., Tryhuba I., Marmulyak A., Demchyna V., Andrushkiv O., Oliinyk R. The impact of modern information technologies on the processes of initiating and planning community and regional development projects

An analysis of the state of development of communities and regions was performed. The need to implement projects that require the use of various information technologies has been identified. The need to develop an approach to determining the level of information development of project offices that implement community and regional development projects is identified. The peculiarities of using modern information technologies for project management in project offices are determined. It is proposed to assess the level of information development of project offices based on the analysis of the complementary processes of digitalization, digitalization and digital transformation. On this basis, project offices are classified into 3 levels of development. It has been established that the use of modern information technologies for the processes of initiating and planning community and regional development projects has its own characteristics. They are reflected in the management operations of collecting and analyzing large amounts of data.

An approach to determining the level of information development of project offices implementing community and regional development projects is proposed. It involves determining indicators of the speed of access to information, improving the quality of decision-making by project managers and the level of information development of project offices.

The use of the proposed approach ensures that the peculiarities of generating data on project environment indicators are taken into account. They are the basis for the choice of information technologies that will ensure the effective implementation of community development projects in various areas with optimal use of resources and achievement of strategic goals of community and regional development.

Based on the proposed approach, a quantitative assessment of the indicators and level of information development of project offices for the given conditions is carried out. It was found that the highest speed of access to information is observed in environmental projects, which is approximately 80 KB/sec, and the lowest speed of access in social projects is 32 KB/sec. The highest value of the indicator of improving the quality of decision-making is observed in transport projects, about 25% compared to decision-making without the use of information technology, and the lowest 20% in social projects. It has been found that different types of projects have different levels of information technology use, which affects the speed of access to information and improvement of the quality of management decision-making by project managers.

Key words: information technology, initiation, planning, projects, information development, project offices.

Постановка проблеми. Процеси ініціації та планування проєктів виконуються на початковій стадії їх життєвого циклу. Результати зазначених процесів є основою для виконання подальших етапів проєктів – планування та виконання. Проєктні менеджери визначають різні види процесів та структур управління, які зумовлюються процесами ініціації та планування проєктів. Під час ініціації та планування проєктів також проєктні менеджери виконують різні види управлінських операцій. Вони стосуються ініціації виконання проєктів 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 проєкти розвитку громад та регіонів, як у теперішній час, так і у післявоєнний.

На ефективність виконання процесів ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів значною мірою впливає наявність даних та інформації як стосовно існуючого та прогнозованого стану проєктного середовища, так і стосовно виконання окремих дій. При цьому сучасні інформаційні технології мають значний вплив на процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів. Впровадження сучасних інформаційних технологій в управлінську діяльність проєктних 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 їх інформуванню щодо стану та особливостей реалізації проєктів розвитку громад та регіонів, а також точного оцінення їх результативності. Водночас, слід зазначити, що діджиталізація, цифровізація та цифрова трансформація є не окремими етапами розвитку проєктної діяльності, а скоріше безперервними системними етапами інформаційного розвитку проєктних офісів. Більшість проєктних офісів, які виконують процеси ініціації та планування проєктів 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 проєктної діяльності.

Для мотивації проєктних офісів, які виконують процеси ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів, до використання сучасних інформаційних технологій у проєктній діяльності, слід 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 проєктів розвитку громад та регіонів залишилося поза увагою науковців. Також відсутні наукові праці, як стосуються виконання досліджень із кількісною оцінкою ефективності інформаційного розвитку проєктних офісів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сьогодні проєктні менеджери використовують різноманітні інформаційні технології, які є основою методів та моделей управління проєктами [8-10]. Вони успішно використовуються в різних галузях проєктного 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 проєктів стає дедалі більш наглядним.

У окремих наукових працях [11-13] їх автори висвітлюють переваги використання інформаційних технологій у проєктному менеджменті. Зокрема, інформаційні технології дозволяють 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 прийняття 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 приймати точні та обґрунтовані управлінські рішення. Також інформаційні технології використовуються для відстеження ходу реалізації проєктів та звітування про їх результати.

У окремих дослідженнях вивчалось використання інформаційних технологій в 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]. Звіт 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. Їх 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 обґрунтування особливостей використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами, а також класифікації проєктних офісів за рівнем їх інформаційного розвитку. Усе вище сказане 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 обґрунтованих особливостях та оціненні стану інформаційного розвитку проєктних офісів для управління проєктами розвитку громад та регіонів. Ними передбачається визначення зацікавленими сторонами. Це стосується впровадження у проєктних офісах електронного документообігу, використання онлайн-платформ для співпраці із зацікавленими сторонами

обґрунтованих показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій, до яких належить швидкість доступу до інформації та покращення якості прийняття рішень проєктними менеджерами, а також визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів. Мета статті полягає в означенні особливостей використання у проєктних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проєктами, класифікації проєктних офісів за рівнем їх інформаційного розвитку, а також на їх основі обґрунтуванні 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 на даний час є процеси використання сучасних інформаційних технологій. Зокрема, це стосується діджиталізації, цифровізації та цифрової трансформації. Зазначені процеси у більшості наукових праць мають різні визначення, які є схожі між собою. Водночас вони не тотожні поняття, але часто використовуються один замість одного (рис. 1).

Під діджиталізацією (оцифруванням) будемо розуміти процес переведення інформації про стан проєктного середовища та реалізацію проєктів з аналогового формату у цифровий. Це може включати 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 проєктів розвитку громад та регіонів, а також автоматизацію окремих управлінських операцій.

Цифрова трансформація є найширшим зпоміж трьох означених процесів інформаційного

розвитку проектних офісів. Вона передбачає не лише переведення інформації та процесів в цифровий формат, але й докорінну зміну підходів до проектної діяльності за допомогою сучасних інформаційних технологій.

Це передбачає розробку власних інформаційних систем підтримки прийняття рішень, які враховують особливості проектного середовища

та реалізацію окремих видів проектів розвитку громад та регіонів, створення нових моделей для ініціації та планування, що базуються на сучасних інформаційних технологіях, а також зміну організаційної структури проектних офісів та їх культури із врахуванням рівня інформаційного їх розвитку.

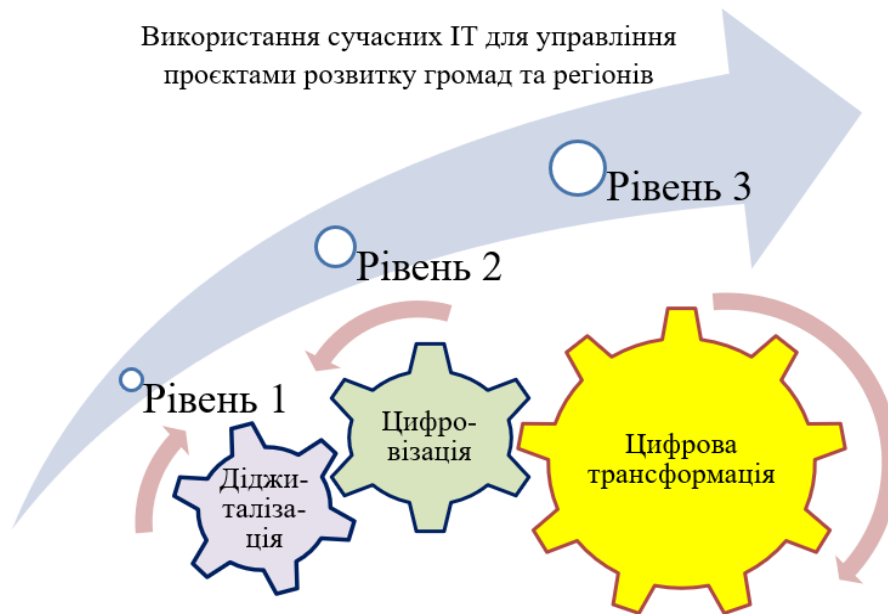


Рис. 1. Схема використання у проектних офісах сучасних ІТ для управління проектами розвитку громад та регіонів

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 проектних офісів для управління проектами розвитку громад та регіонів та мають свої особливості, які представлено у табл. 1.

Використання сучасних інформаційних технологій для виконання процесів ініціації та планування проектів розвитку громад та регіонів має свої особливості (рис. 2). Сучасні інформаційні технології дають можливість 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 проектів 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.

Доступні для виконання управлінських процесів є бібліотеки машинного навчання, які забезпечують вирішення задач прогнозування, класифікації, кластеризації, асоціації тощо. Прикладами таких бібліотек машинного навчання є TensorFlow, PyTorch та Scikit-learn. TensorFlow є бібліотекою з відкритим кодом, яка розроблена Google. Вона використовується проектними менеджерами 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 проектними менеджерами для машинного навчання на мові Python.

Таблиця 1. Особливості та стан інформаційного розвитку проектних офісів для управління проектами 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 проектного офісу	Процеси інформаційного розвитку проектного офісу	Характеристики інформаційного розвитку проектного офісу	Приклад інформаційного розвитку проектного офісу
Рівень 1	Діджиталізація	Створення цифрових баз даних про проектне середовище, дії у проектах, учасників, ресурси. Оцифрування карт, планів, звітів та інших документів.	Створення електронного реєстру проєктів. Оцифрування архівів проектної документації. Переведення паперових анкет на онлайн-опитування.
Рівень 2	Цифровізація	Застосування онлайн-платформ для спільної роботи команди над проектами. 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 проектами. Створення GIS-карти з проєктами розвитку громад.
Рівень 3	Цифрова трансформація	Залучення громадян до процесів прийняття 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.

**Рис. 2.** Схема використання сучасних ІТ для виконання процесів ініціації та планування проєктів розвитку громад та регіонів**Fig. 2.** A scheme for using modern IT to initiate and plan community and regional development projects

Стосовно інструментів візуалізації результатів виконання управлінських операцій, то сьогодні найбільш розповсюдженими у проектній 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 проектних менеджерів, які можуть писати код на мові Python цінною є бібліотека Matplotlib. Вона забезпечує створення графіків і діаграм, що візуалізують тенденції зміни проектного середовища та окремих складових виконання проєктів.

вих виконання проєктів.

Використання методів штучного інтелекту та аналітика великих даних дозволяє проектним менеджерам виявляти та прогнозувати закономірності стосовно розвитку громад та регіонів. Отримані результати є вагомими для формулювання ефективних стратегій та сценаріїв розвитку громад та регіонів. На даний час відомі інструменти такі як Apache Spark, Hadoop, Kafka, що використовуються проектними менеджерами. Зокрема, Apache Spark є платформою для розподіленої обробки даних, яка використовується для аналізу великих даних. Платформа Hadoop використовується проектними менеджерами для

зберігання та обробки великих даних.

Система обробки потоків даних Kafka використовується проєктними менеджерами для аналізу даних в 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 (ЕРМ). 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. Це включає комунікацію 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 проєктами 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 довкілля 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).

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.

Нами пропонується методика 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:

$$S_s = \frac{A_r}{T_A}, \quad (1)$$

де S_s – швидкість доступу проєктних менеджерів до інформації про проєктне середовище та проєкти, Кбайт/сек; A_r – 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 прийняття рішень ΔQ за допомогою інформаційних технологій можна визначити за допомогою порівняння якості прийняття 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 ΔQ – показник покращення якості прийняття рішень за допомогою інформаційних технологій, %; Q_a, Q_t – відповідно точність прийняття рішень з використанням інформаційних технологій та без використання інформаційних технологій, %.

Отримане значення показника покращення якості прийняття рішень ΔQ виражається у відсотках і показує, наскільки впровадження інформаційних технологій впливає на точність прийнятих 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.

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, initiation 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.

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 громад 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 $\sum N_p$ являє собою суму 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 прийняття рішень проєктними менеджерами, а також визначення рівня інформа

ційного розвитку проектних офісів.

На підставі вище поданих даних (табл. 1 та табл. 2) нами сформовано варіанти проектів розвитку громад та регіонів у різних сферах. Використовуючи запропоновану методику для

кожного з варіантів проектів задано початкові дані для визначення кількісних показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій, які наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Початкові дані для визначення кількісних показників ефективності використання сучасних інформаційних технологій під час ініціації та планування проектів 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 проекту	Показники використання сучасних інформаційних технологій			
	A_i , Кбайт	T_A , сек.	Q_a , %	Q_i , %
Медичні проекти	1000	20	85	70
Соціальні проекти	800	25	80	65
Екологічні проекти	1200	15	90	75
Транспортні проекти	1500	30	75	60

У табл. 3 наведено початкові дані, які взято із звітів організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСД). Вони стосуються використання сучасних інформаційних технологій у різних видах проектів з розвитку громад та регіонів. Медичні проекти використовують приблизно 1000 Кбайт даних за 20 секунд, що становить 85% від загальної масштабності технологій, при цьому ефективність їхнього використання складає 70%. У соціальних проектах обсяг даних становить 800 Кбайт, час обробки - 25 секунд, а використання технологій - 80%. Їхня ефективність оцінюється на рівні 65%. Екологічні проекти відрізняються великим обсягом даних - 1200 Кбайт, швидкістю обробки - 15 секунд та високим рівнем використання інформаційних технологій - 90%. Їхня ефективність досягає 75%. У транспортних проектах 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 проекти у яких спостерігається найбільша ефективність. Найнижчий рівень ефективності спостерігається у транспортних проектах. Такий аналіз допомагає проектним менеджерам зрозуміти, проекти 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 прийняття рішень проектними менеджерами (рис. 3).

Отримані гістограми (рис. 3) свідчать про те, що вони дають можливість порівняти різні типи проектів за двома показниками, які описані формулами (1) та (2). Вони відповідно відобра-

жають швидкістю доступу до інформації та покращення якості прийняття рішень з використанням інформаційних технологій. Встановлено, що найвища швидкість доступу до інформації спостерігається у екологічних проектах, що складає приблизно 80 Кбайт/сек, а найнижчу швидкість доступу мають соціальні проекти з приблизно 32 Кбайт/сек. Найбільше значення показника покращення якості прийняття рішень спостерігається у транспортних проектах, близько 25% в порівнянні з прийняттям рішень без використання інформаційних технологій, а найнижче 20% у соціальних проектах. На основі аналізу графіків можна зробити висновок, що різні типи проектів виявляють різний вплив використання інформаційних технологій на швидкість доступу до інформації та покращення якості прийняття управлінських рішень проектними менеджерами.

На підставі даних табл. 3 та із використанням написаного коду на мові Python визначено рівень інформаційного розвитку проектних офісів, які реалізують проекти розвитку громад та регіонів. Отримані гістограми із відображенням рівня інформаційного розвитку проектних офісів представлено на рис. 4.

Отримані гістограми із відображенням рівня інформаційного розвитку проектних офісів показують, як змінюється рівень інформаційного розвитку проектних офісів, які реалізують чотири різних типи проектів на трьох рівнях. Встановлено, що 48% медичних проектів реалізуються на рівні 1 інформаційного розвитку проектних офісів, 39% – на рівні 2 та 13% – на рівні 3. Щодо соціальних проектів, то 32% реалізуються на рівні 1 інформаційного розвитку проектних офісів, 40% – на рівні 2 та 28% – на рівні 3. Стосовно екологічних проектів, то 30% реалізуються на рівні 1 інформаційного розвитку проектних офісів, 49% – на рівні 2 та 21% – на рівні 3. Відносно транспортних проектів, то 29% реалізуються на рівні 1 інформаційного розвитку проектних 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 проєк-

тів, де їх найбільше виконується на рівні 1 інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів.

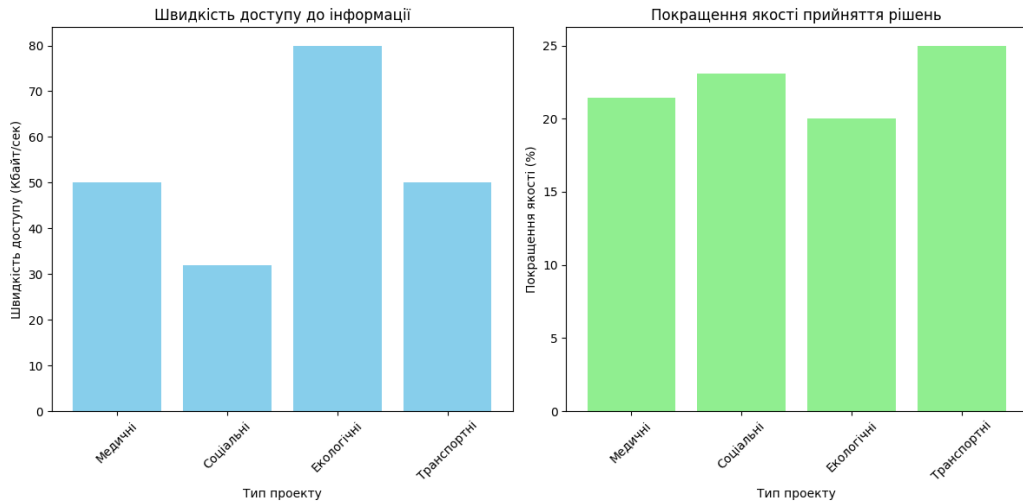


Рис. 3. Результати визначення швидкості доступу до інформації та покращення якості прийняття рішень проєктними менеджерами

Fig. 3. Results of determining the speed of access to information and improving the quality of decision-making by project managers

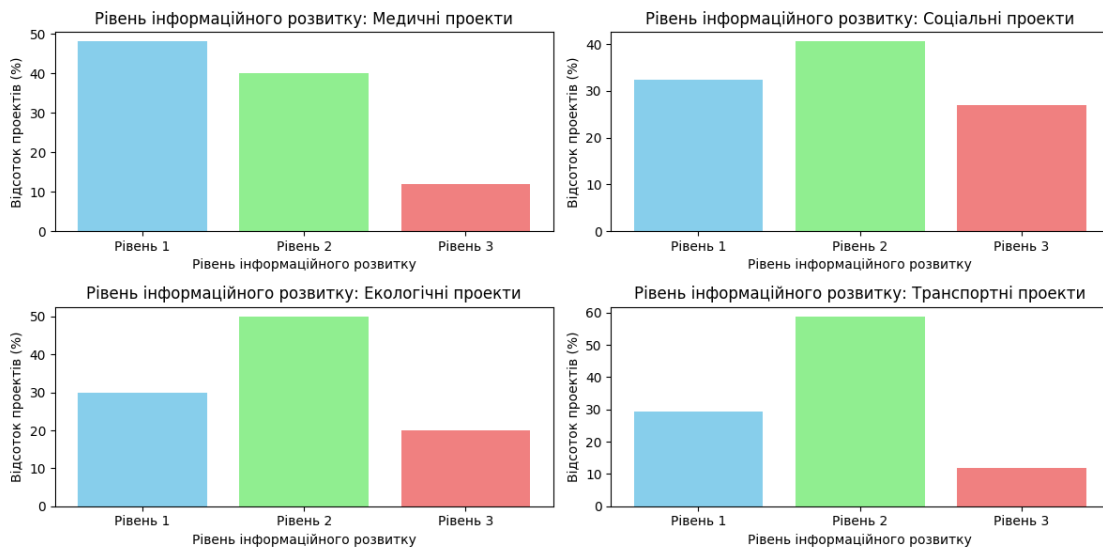


Рис. 4. Результати визначення рівня інформаційного розвитку проєктних офісів, які реалізують проєкти розвитку громад та регіонів

Fig. 4. Results of determining the level of information development of project offices implementing community and regional development projects

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 слід 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. Інвесту-

вання у нові інформаційні технології та програмне забезпечення може сприяти покращенню 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 проекти розвитку громад та регіонів. Він враховує кількісні показники ефективності використання сучасних інформаційних технологій під час ініціації та планування проектів розвитку громад та регіонів. У подальшому для використання запропонованого підходу до розвитку проектних офісів слід розробити систему підтримки прийняття рішень, яка забезпечить пришвидшення визначення рівня інформаційного розвитку проектних офісів.

Висновки. 1. Проведений аналіз стану розвитку громад та регіонів свідчить про те, що існує потреба реалізації проектів, управління якими потребує використання різноманітних інформаційних технологій. Попри значну кількість наукових праць із використання інформаційних технологій у проектному менеджменті, поза увагою науковців залишилися питання, які стосуються обґрунтування особливостей використання у проектних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проектами, класифікації проектних офісів за рівнем їх інформаційного розвитку. Усе вище сказане свідчить про потребу розроблення підходу до визначення рівня інформаційного розвитку проектних офісів, які реалізують проекти розвитку громад та регіонів.

2. Означені особливості використання у проектних офісах сучасних інформаційних технологій для управління проектами. Зокрема, для визначення рівня інформаційного розвитку проектних офісів пропонується оцінювати взаємодоповнюючі процеси діджиталізації, цифровізації та цифрової трансформації, що дають можливість їх класифікувати на 3 рівні розвитку. Встановлено, що використання сучасних інформаційних технологій для виконання процесів ініціації та планування проектів 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

21. 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.

22. 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.

23. Raymond L. Information systems design for project management: a data modeling approach. *Project Manage*, 18 (4) (1987), pp. 94–99.

24. Yan, H., Li, M. Application of Modern

показників та показників транспортних потоків тощо.

3. Запропонований підхід до визначення рівня інформаційного розвитку проектних офісів, які реалізують проекти розвитку громад та регіонів, передбачає визначення швидкості доступу до інформації, покращення якості прийняття рішень проектними менеджерами та рівня інформаційного розвитку проектних офісів. Вони забезпечують врахування особливостей формування даних про показники проектного середовища, що лежить в основі вибору інформаційних технологій, які забезпечать ефективну реалізацію проектів 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 виконано кількісне оцінення показників та рівня інформаційного розвитку проектних офісів для заданих умов. Встановлено, що найвища швидкість доступу до інформації спостерігається у екологічних проектах, що складає приблизно 80 Кбайт/сек, а найнижчу швидкість доступу мають соціальні проекти з приблизно 32 Кбайт/сек. Найбільше значення показника покращення якості прийняття рішень спостерігається у транспортних проектах, близько 25% в порівнянні з прийняттям рішень без використання інформаційних технологій, а найнижче 20% у соціальних проектах. Встановлено, що різні типи проектів мають різний рівень використання інформаційних технологій, що впливає на швидкість доступу до інформації та покращення якості прийняття управлінських рішень проектними менеджерами.

Бібліографічний список

20. 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.

Information Technology in Information Construction of Project Management. *ACM International Conference Proceeding Series*, 2022, pp. 132–135.

25. Liu, B. Application of Computer Electronic Information Technology in Engineering Project Management. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2023, 170, pp. 172–180.

26. 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

27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Bushuyev S., Verenych 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Каверіна С.Ю., Башинська І.О. Інформаційні технології в управлінні проєктами. *Економіка і суспільство*. 2017. Вип. 10. С. 883–887.
38. 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>
39. 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.
40. 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.
41. 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).

Стаття надійшла 27.03.2024

УДК 004.77:659.3

МЕТОДИКА ВИКОРИСТАННЯ UTM-МІТОК ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТРАФІКУ САЙТУ ТА ВЕБ-АНАЛІТИКИ

Христина Мозуль, Павло Луб, к.т.н., доц., Чухрай Любомир к.ф.-м.н, в.о. доц, Штогрин Святослав, Фіялковський Віталій

*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*

Мозуль Х., Луб П., Чухрай Л., Штогрин С., Фіялковський В. Методика використання Utm-міток для моніторингу трафіку сайту та веб-аналітики.

Проаналізовано вагомість веб-сервісів та Інтернету в площині просування послуг через соціальні мережі та веб-сайти. Акцентовано на тому, що підприємства які просувають товари через веб-додатки 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 найбільш ефективних 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. Наведено аналіз технічної можливості моніторингу користувачів в глобальній мережі завдяки інструментам веб-аналітики. Зазначено, що ці інструменти надають розробникам та власникам сайтів інформацію про те, що користувачі роблять, як здійснюють навігацію і що їх цікавить найбільше. Описано переваги та недоліки, а також головні інструменти веб-аналітики які лежать в основі метрики – цифрових показників щодо переглядів, покупок, відвідин, цільових дій для відстеження тощо. Наведено 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 веб-сайті. Описано методику створення UTM-мітки, а також складові її запису – параметр та змінну відстеження. Наведено роль кожного із цих елементів щодо виявлення джерела трафіку веб-сайту з метою відстежувати потік нових користувачів. Наведено перелік результатів моніторингу за користувачами веб-сайту яких можна досягнути за коректного використання UTM-міток та системи Google Analytics. Отримано результати опрацювання окремих звітів Google Analytics та оцінення сплеску активності користувачів веб-сайту.

Ключові слова: UTM-мітки, методика, моніторинг, трафік, сайт, веб-аналітика, Google Analytics.

Mozul Kh., Lub P., Chukhrai L., Shtohryn S., Fiyalkovsky V. The method of using Utm tags for site traffic monitoring and web analytics.

The importance of web services and the Internet in the sphere of promoting services through social networks and websites is analyzed. It is emphasized that enterprises that promote goods through web applications and social networks seek to establish a connection with the audience, as well as attract an increasing number of customers. The advantages of marketing in social networks are singled out, which today are considered the most effective methods of promoting goods and services. It is noted that the development of IT tools that allow monitoring the activity of users in social networks is a very relevant issue for modern enterprises. An analysis of the technical possibility of monitoring users in the global network thanks to web analytics tools is given. It is noted that these tools provide developers and site owners with information about what users do, how they navigate and what they are most interested in. Advantages and disadvantages are described, as well as the main tools of web analytics that are the basis of metrics – digital indicators of views, purchases, visits, targeted actions for tracking, etc. The method of applying the Urchin Tracking Module technology and the Google Analytics system is given. The possibilities and method of using UTM-tags, as well as the method of generating user activity reports on the website, are defined. The method of creating a UTM-tag is described, as well as the components of its recording – a parameter and a tracking variable. The role of each of these elements is given in identifying the source of website traffic in order to track the flow of new users. Here is a list of website user monitoring results that can be achieved with the correct use of UTM-tags and the Google Analytics system. The results of the processing of separate Google Analytics reports and the assessment of the surge in activity of website users were obtained.

Keywords: UTM-tags, methodology, monitoring, traffic, site, web-analytics, Google Analytics.

Постановка проблеми. Кількість користувачів Інтернету в світі постійно збільшується, що свідчить про перспективи інтегрування бізнесу у веб-сервіси, надання послуг в соціальних мережах та використання спеціалізованих інструментів моніторингу користувачів. Водночас розвиток

інформаційних технологій (ІТ) призводить до того, що на зміну традиційним маркетинговим методам приходять комунікації у соціальних мережах. Просування послуг та товарів через Інтернет формує вимоги, що стосуються

поширення інформації (реклами) на сайті чи в групах соціальних мереж, відслідковування дій користувачів, оцінення їх активності та зацікавленості відповідними повідомленнями, а відтак внесення змін у їх контекст, розробку рекомендацій щодо структури веб-додатку і підвищення ефективності просування послуг загалом. З практики відомо [1, 7, 12], що підприємства які просувають товари через веб-додатки 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 IT-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, котрі уможливають різносторонній зв'язок із клієнтами, постачальниками, конкурентами та працівниками загалом. Розробку веб-сайтів скеровують на досягнення різної мети – реклама та представлення послуг компанії, залучення нових клієнтів, їх довгострокове утримання та «проекування товару очима споживача», збору персональних даних клієнтів та формування їх кредитної історії, моніторинг активності та удосконалення веб-сайту з метою підвищення інформативності, інтуїтивної зручності, доступності тощо. Значну частину цих завдань можна вирішити завдяки засобам веб-аналітики, 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 в 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 веб-аналітики також присвячено багато праць таких науковців як 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 веб-аналітики, перспективи розвитку таких завдань і в майбутньому, а також доцільність спрощення IT-інструментів для більш широкого моніторингу активності користувачів відповідних веб-сервісів.

Мета статті. Розкрити методику, значення та важливість коректного використання технології Urchin Tracking Module (UTM-мітки) для моніторингу трафіку сайту та веб-аналітики, а також представити їх застосування у звітах системи Google Analytics.

Постановка завдання: 1) розкрити вагомість IT у просуванні онлайн-послуг та реалізації товарів; 2) описати інструменти та навести основні метрики (цифрові показники) веб-аналітики; 3) розкрити основні елементи UTM-міток та їх призначення в контексті моніторингу трафіку на веб-сайті; 4) запропонувати практичні рекомендації щодо коректного створення UTM-міток для точного збору даних; 5) навести реальний приклад використання аналізатора джерел трафіку за UTM-мітками в системі Google Analytics – сформувати аудиторію, поширити інформацію про наданні послуг на сайті, відслідкувати 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 IT-завдань щодо розвитку каналів комунікацій, інтерактивності та ефективності електронної комерції. Відповідно до цього, просування Інтернет-послуг через рекламу що інтегрована в IT-канали повинне відповідати вимогам ефективності та заданим витратам ресурсів. Власне, для моніторингу цих процесів в глобальній мережі реалізовано веб-аналітику [1, 2], яка надає розробникам та власникам сайтів інформацію про те, що користувачі роблять, як здійснюють навігацію і що їх цікавить найбільше. В технічному розумінні веб-аналітика – це спеціалізовані програми та інструменти, котрі збирають дані про активність користувачів на сайті. До головних завдань веб-аналітики відносять: 1) підвищення активності користувачів сайту; 2) збільшення відвідувачів; 3) оптимізація веб-сервісу і його функціональності; 4) визначення комунікативних та технічних проблем сайту; 5) пошук способи їх розв'язання тощо [11, 12].

До переваг та результатів використання веб-аналітики відносять: 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; 6) виявлення основних тенденцій поведінки користувачів та адаптування неї реклами і маркетингу; 7) виявлення того контенту, яким читачі хочуть ділитися зі своєю аудиторією; 8) мотивування та заохочення до повторного відвідування сайту тощо. Отримання статистичних показників щодо відвідуваності веб-сторінок дає змогу отримати дані щодо [11]: 1) кількості переглянутих веб-сторінок; 2) ключових слів і фраз, за якими користувачі знаходять сайт у пошукових системах; 3) географію відвідувачів; 4) час, проведений на веб-сторінці; 5) переходи між веб-сторінками; 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 веб-аналітики – 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 веб-сайту застосовують різні інструменти веб-аналітики, які в загальному 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 є дещо складнішою, потребує спеціальної підготовки аналітика та ґрунтується на прикла-

дних програмах (Webalizer, AWStats), котрі обробляють файли реєстрації подій веб-сервера, що генеруються HTML-сторінками та, відповідно, формують статистику роботи веб-сайту.

Важливий показник популярності веб-сайту – це кількість відвідувачів. Спосіб фіксування цього показника є доволі нескладним і доступним, а відтак дає змогу визначити трафік веб-сайту 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 веб-сайту із середніми показниками інших веб-сайтів 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 веб-сайті котрий ми моніторимо. Вирішення цього завдання досить легко досягається 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) відслідковувати 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 веб-сайту. Хоча UTM-параметр має власну функцію однак їх загальна мета – вимірювати та маркувати трафік, що надходить на веб-сайт. 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 реалізувати; 8)

налаштувати цифровий маркетинг для досягнення найвищої конверсії веб-сайту.

Існує усього 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 існують безкоштовні компонувальники посилань, 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 normal link URL and URL with generated UTM-tag

Звичайне URL посилання	URL посилання із згенерованою UTM-міткою
<code>http://visnyk.lnup.edu.ua</code>	<code>http://visnyk.lnup.edu.ua/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=visnyk&utm_content=agroengineeringresearch&utm_term=2023</code>

Один з 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 веб-сервіс із вбудованою рекламою автоматично додасть потрібні дані в URL-адресу під час кож-

ного 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.

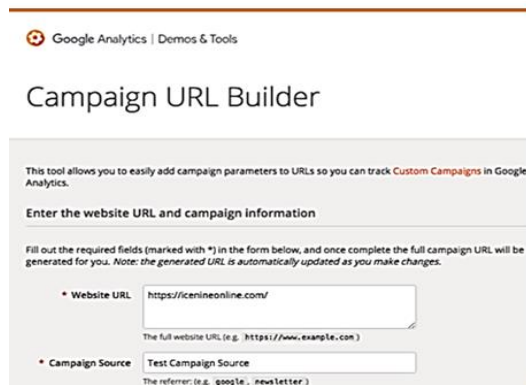


Рис. 1. Компонувальник Campaign URL Builder для створення URL з UTM-міткою

Fig. 1. Layout tool Campaign URL Builder for creating URLs with UTM-tags

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)

«с» – комп'ютер. У цьому разі, дані які збирають мітки надходять до сервісів аналітики. Для того щоб встановити джерела трафіку веб-сайту 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).

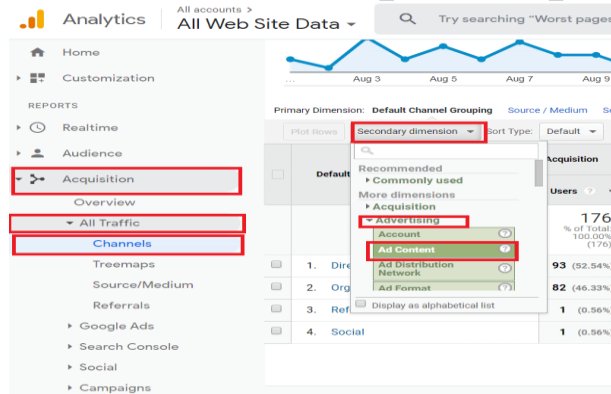


Рис. 2. Увімкнення аналізатора джерел трафіку за UTM-мітками в системі Google Analytics

Fig. 2. Enabling the analyzer of traffic sources by UTM-tags in the Google Analytics system

Інформацію щодо аудиторії каналу, а також детальний звіт стосовно зацікавленості поширеним повідомленням можна отримати користуючись компоновальником сегментів –

"Джерела трафіку" → "Весь трафік" → "Канали". Вибрати зверху пункт "Усі користувачі" та кнопку "Сегмент", яка з'явиться нижче (рис. 3).

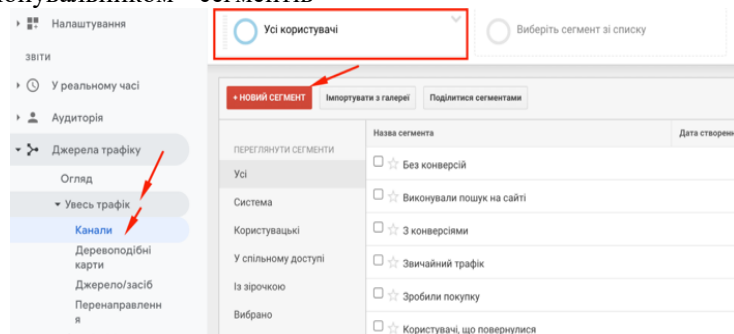


Рис. 3. Активація компоновальника сегменту в Google Analytics

Fig. 3. Activate the segment layout in Google Analytic

З метою практичного застосування технології Urchin Tracking Module (UTM-мітки) для моніторингу трафіку сайту та веб-аналітики нами використано систему Google Analytics. Зокрема, після поширення повідомлень в соціальних мережах окремих ВУЗів України (табл. 1) щодо можливості видання наукових праць через веб-сайт Вісника «Агроінженерні дослідження» Львівського національного університету природо-користування нами встановлено сплеск активності нових користувачів на цьому сайті.

Зокрема, результати відгуку та активності користувачів проаналізовано завдяки Google Analytics для періоду з – 01.01.24 по 24.01.24 р. В 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 веб-сайті, її тривалість тощо. Зокрема, зростання активності користувачів становило 165.5%, що говорить про зрозумілість та прийнятність інформації поданої в оголошеннях щодо наукового Вісника. Нові користувачі в переважній більшості 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 веб-сайту.

Таблиця 2. Цільова аудиторія поширення інформації щодо видання наукових праць у віснику «Агроінженерні дослідження» ЛНУП
Table 2. The target audience for the dissemination of information on the publication of scientific works in the "Agroengineering Research" bulletin LNEU

№ п/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

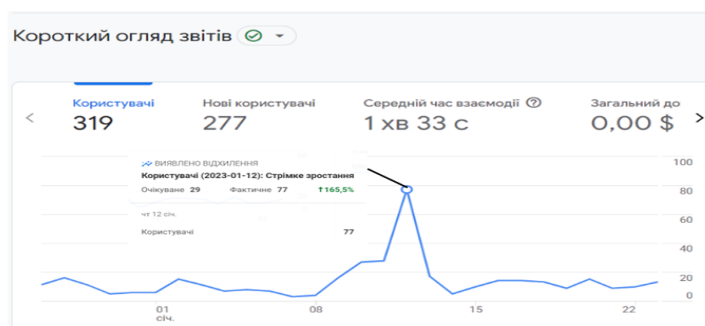


Рис. 4. Сплеск активності користувачів веб-сайту наукового вісника "Агроінженерні дослідження" ЛНУП
Fig. 4. A surge in the activity of the website users of scientific bulletin "Agroengineering Research" of LNUP

Слід також відмітити, що найбільш активними «Джерелами сеансу» були три ресурси – пряме посилання (direct), пошукова система Google та офіційний сайт університету Львівського НУП.

Висновки. 1. За допомогою технології Urchin Tracking Module можна зібрати інформацію про джерело трафіку веб-сайту, ключові слова, які привели до показу оголошення та інші показники, що важливі для оцінення ефективності повідомлень щодо просування послуг у веб-сервісах Інтернету. Моніторинг такої активності користувачів можна реалізовувати завдяки різним інструментам веб-аналітики, зокрема використовуючи систему Google Analytics котра дає змогу збирати дані з веб-сайтів 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 веб-сайту, 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 наглядні звіти.

3. Використання UTM-міток дає змогу встановити швидкість реакції користувачів на рекламні повідомлення, терміни найвищої активності нових користувачів на веб-сайті, її тривалість тощо. Зокрема, використання цієї технології для поширення інформації про веб-сайт наукового вісника Львівського НУП дало змогу зафіксувати зростання активності користувачів цього ресурсу на рівні 165.5%. Нові користувачі в переважній більшості 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.

Бібліографічний список

1.Беляева Я. Звести рахунки: 5 інструментів аналітики сайтів-конкурентів / Я. Беляева // 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 / Маркова О. М. // Наук. часоп. НПУ імені М. П. Драгоманова : зб. наук. праць / Редрада. К.: НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2016. № 18 (25). 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. / Ю. С. Рамський, О.В. Резіна. Нац. пед. унт ім. М. П. Драгоманова. К. 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 (дата звернення: 10.01.2024).
9. Спірін О.М. Зміст навчального матеріалу спецкурсу "Хмарні інформаційно-аналітичні технології у науково-дослідному процесі" / О. М. Спірін, О. А. Одуд // 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 / Федеріка Черубіні // Тенденції в редакціях 2015. URL: <https://drive.google.com/file/d/0BxNmkhm4Or6qa3B4WnQteE5UaUdEWW8tTnhza25rWmVWekJ3/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_statistika/ 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. 21(2), 2011. 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., Падюка Роман, 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: azheleznyak@ukr.net, ptashnykproject@gmail.com, padyukaroman@gmail.com,
vsmolinski@ukr.net, vstanko@ukr.net*

Желєзняк А., Пташник В., Падюка Р., Смолінський В., Станько В.Ю. 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, але й вимоги до якості сільськогосподарської продукції. На законодавчому рівні в Україні впроваджуються вимоги управління ланцюгами поставок сільськогосподарської продукції. У зв'язку із цим у виробників продуктів харчування виникає потреба в автоматизації процесу управління простежуваністю сільськогосподарської продукції. Це дасть змогу переробним підприємствам впроваджувати внутрішні стандарти якості у відповідності 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 обумовлює важливість даного питання для цієї категорії підприємств як користувачів інформаційних систем та технологій. Впровадження спеціалізованих інтелектуальних інформаційних технологій дасть змогу виробникам та переробним підприємствам ефективніше управляти ланцюгами поставок та бути конкурентоспроможними на внутрішньому та 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. Авторами розглянуто можливості застосування технологій безконтактного обміну даними та інструментів відстеження на прикладі RFID. Запропоновано шляхи вирішення проблем простежуваності продукції для сільськогосподарських виробників з використанням інтелектуальних інформаційних технологій.

Ключові слова: інтелектуальні інформаційні системи, простежуваність, ланцюги поставок, сільськогосподарська продукція.

Zhelyeznyak A., Ptashnyk V., Padyuka R., Smolinsky V., Stanko V. Intelligent information systems for managing the traceability of agricultural products.

The development of agriculture in modern conditions should consider not only technological factors of production and the level of resource potential utilization but also the requirements for the quality of agricultural products. Ukraine is introducing requirements for managing agrarian supply chains at the legislative level. In this regard, food producers need to automate the process of managing the traceability of agricultural products. This will allow processing companies to implement internal quality standards following EU regulations and Ukrainian legislation. Food producers may be legally liable for food safety at all stages: from production to retail sales, which makes this issue important for this category of enterprises as users of information systems and technologies. The introduction of specialized intelligent information technologies will allow manufacturers and processing companies to manage their supply chains more efficiently and be competitive in domestic and foreign markets.

The article analyzes the prospects of using intelligent information systems to manage the supply chain and traceability of agricultural products. The main components of an intelligent information system that would allow fulfilling the requirements for ensuring the traceability of products from production to sale are considered. The processes that affect the traceability of products and can be automated are described: identification and labeling, inventory management system, and implementation of technologies and tools for traceability. The authors describe the auxiliary technologies that can be used to provide products for agriculture. The authors examine the possibilities of using contactless data exchange technologies and tracking tools in the example of RFID. Ways to solve the problems of product traceability for agricultural producers using intelligent information technologies are proposed.

Key words: intelligent information systems, traceability, supply chains, agricultural products.

Постановка проблеми. 23 червня 2022 року Європейська рада надала Україні статус кандидата на вступ до ЄС [1], що ознаменувало новий етап реалізації заходів із гармонізації законодавства, імплементації спільних політик, співробітництва тощо, у т.ч. і щодо вимог з виробництва, переробки та розповсюдження (реалізації) сільськогосподарської продукції та продуктів харчування [2]. Незважаючи на значний спад зовнішньої торгівлі України із 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 [3]. Експорт продовольства становив 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 торівельними партнерами України, куди експортувалася українська продукція були: Польща (3,7 млрд.дол. США), Румунія (3 млрд.дол. США), Туреччина (1,9 млрд.дол. США) [4]. 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 [5]. В структурі українського експорту в ЄС 16,8% у 2022 році припадало на зернові культури, 11% - 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 і необхідність врахування вимог законодавства країн Європейського Союзу щодо простежуваності та безпеки продукції, що надходить та реалізовується на ринку ЄС. У відповідності до директив та регламентів ЄС простежуваність завжди вимагається для будь-якої речовини, що може або буде використовуватись в продуктах харчування або кормах, однак існують більш жорсткі вимоги простежуваності до таких продуктів як тварини, генно-модифіковані організми (ГМО), фрукти та овочі, деякі товари тваринного походження (яловичина, риба, мед), оливкова олія [2]. Маркуванню та ідентифікації також підлягають продукти харчування та корми, які розміщуватимуться або можуть розміщуватися на ринку ЄС [2]. 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.

Вирішення задач, обумовлених відповідністю законодавства із даного питання, можливе із застосуванням інформаційних техно-логій та автоматизації цього процесу за усіх етапах, створенням відповідних реєстрів та обміну даними, у т.ч. і за рахунок використання інтелектуальних інформаційних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій Групи світового банку [6] дав змогу встановити, що забезпечення простежуваності продукції у відповідності до найкращих практик має відбуватися шляхом забезпечення безперервності інформації на усіх етапах виробничого процесу із врахуванням законодавчо встановленої вимоги «крок назад-крок вперед», створення та підтримки точних облікових записів простежуваності, відстеження фізичного руху продукту харчування вздовж харчового ланцюга. Багато наукових праць присвячено питанню автоматизації простежуваності продукції, що обумовлено розвитком інформаційних технологій та змінами в законодавчій базі ряду країн [7-10]. Окремі дослідження глибше розкривають питання застосування інтелектуальних технологій для простежуваності та безпеки продуктів харчування [11, 12]. Водночас у наукових дослідженнях не повністю розкрито питання реалізації простежуваності сільськогосподарської продукції із врахуванням тенденцій розвитку інтелектуальних інформаційних систем на основі технологій штучного інтелекту. Тому виникає потреба у більш глибокому аналізі перспектив застосування інтелектуальних інформаційних технологій, інтегрованих із допоміжними технологіями, технологіями безконтактного обміну даними, інструментами відстеження, для вирішення операційних завдань, пов'язаних з автоматизацією процесу управління простежуваністю сільськогосподарської продукції.

Постановка завдання. Представити результати аналізу перспектив застосування інтелектуальних інформаційних технологій для управління простежуваністю сільськогосподарської продукції. Обґрунтувати напрями застосування та рекомендовані компоненти інтелектуальної інформаційної системи для управління простежуваністю сільськогосподарської продукції.

Виклад основного матеріалу. У відповідності 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 [2].

Сільськогосподарські виробники не здатні реалізувати поставлені завдання з управління простежуваністю сільськогосподарської продукції у відповідності до вимог законодавства без використання ефективної інформаційної системи, адже цей процес передбачає збір, зберігання та обробку великих обсягів даних про партії сільськогосподарської продукції на усіх етапах логістичного ланцюга та доступність цієї інформації для всіх зацікавлених сторін у будь-який момент часу.

Управління простежуваністю сільськогосподарської продукції може включати 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. Провівши ґрунтовний аналіз даного процесу, було виявлено, що найбільш типовими помилками на цьому етапі є неточність внесених даних, часто обумовлених людським фактором. На практиці в період збору урожаю можуть виникати неточності у фіксуванні даних в відповідних реєстрах, зокрема внесення даних про дату збору урожаю, номер поля або сорт культури. Значний вплив на якість зібраних даних на цьому етапі має надійність та 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 різномунітних системами управління ланцюгом постачання, що обумовлено якістю передачі даних на усіх етапах постачання. Зазвичай учасниками процесу простежуваності сільськогосподарської продукції є кінцеві споживачі, виробники сільськогосподарської продукції, заклади громадського харчування, харчові та переробні підприємства, представники мережі рітейлу, оператори ринку, які здійснюють зберігання продукції, компанії-перевізники, брокери, трейдери тощо. На практиці можуть виникати ситуації, 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.

Використання інформаційної системи дозволить унікально ідентифікувати кожну партію продукції та відстежувати її шлях від початкового виробництва до кінцевого пункту продажу. Виходячи із завдань, пов'язаних із забезпеченням

простежуваності продукції [6], інформаційна система управління цим процесом повинна забезпечувати наявність базових елементів у відповідності до законодавства та реалізовувати ряд основних функцій (рис.1).

Обробка інформації, обхідної для відслідковування руху сільськогосподарської продукції ланцюгом постачання може відбуватися на основі даних, отриманих з 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, в логістиці та торгівлі [13]. Дана технологія може мати ряд переваг із традиційним маркуванням партій продукції за допомогою традиційних штрихкодів, однак її впровадження потребує реалізації комплексного підходу, а саме підбору та використання RFID зчитувачів, розгортання відповідної інфраструктури, застосування міток, налаштування RFID принтерів. Ефективність провадження даної технології залежатиме від її впровадження та використання усіма учасниками логістичного ланцюга, адже отримані дані будуть цінними для усіх учасників процесу, у т.ч. і для регуляторних та контролюючих органів або кінцевого споживача (рис.2).

Оскільки технологія RFID має перспективи використання для простежуваності сільськогосподарської продукції та продуктів харчування, було розглянуто етапи її впровадження на основі рекомендацій компаній [14]. На рисунку 3 представлено схему застосування електронних етикеток у формі RFID-міток, які фактично є мініатюрним запам'ятовуючим пристроєм, пам'ять якого містить унікальні інформаційні дані та номер [15]. Оскільки сільськогосподарська продукція має свої фізіологічні характеристики (наприклад зерно, молоко тощо), RFID-мітки можуть використовуватися як безпосереднього на продукцію (що більш ефективно для продуктів харчування), так і на упаковку або тару.

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, відстежуваність безпеки харчових продуктів, але і планувати та управляти потенційними ризиками у перспективі. Вирішити ці задачі можливо на основі застосування інтелектуальних інформаційних систем управління відстежуваністю сільськогосподарської продукції.

Таблиця 1. Опис процесів, пов'язаний 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 відноситься інформація про використані добрива, ЗЗР, дати збирання, умови зберігання та транспортування.
3. Технології та інструменти відстеження	Використання сучасних технологій, наприклад як 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 дозволяє 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.

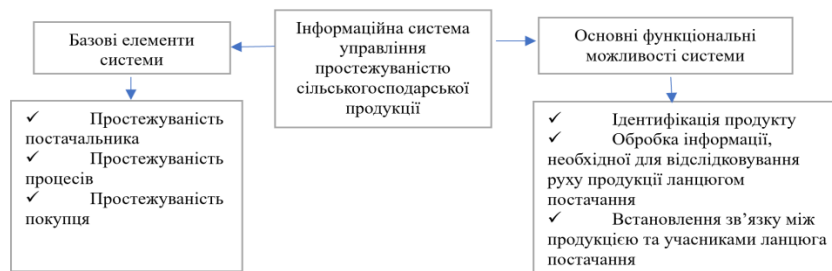


Рис. 1. Характеристика інформаційної системи управління простежуваністю сільськогосподарської продукції

Fig. 1. Description of the information system of agricultural products traceability management

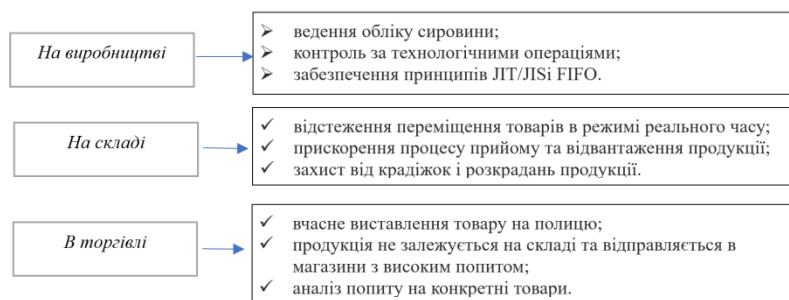


Рис. 2. Приклади застосування технології RFID в логістиці [13]

Fig. 2. Examples of the use of RFID technology in logistics [13]

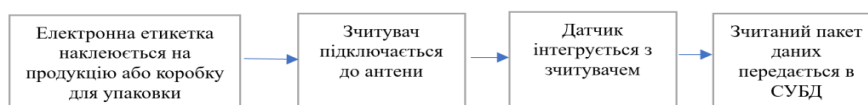


Рис. 3. Застосування технології RFID для простежуваності сільськогосподарської продукції

Fig. 3. Application of RFID technology for traceability of agricultural products

Загалом інтелектуальна інформаційна система (ІІС) 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 прийняття управлінських рішень. Перспективою використання інтелектуальної інформаційної системи є те, що окрім традиційних рішень та завдань вони можуть генерувати нові знання та дані у визначеній предметній області.

Проаналізувавши існуючі типи інтелектуальних інформаційних систем, було виділено перспективи їх використання для покращення 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 фото-копій 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 використання міток RFID.

Розглянувши дослідження на цю тему [16] та проаналізувавши можливі випадки використання інтелектуальної інформаційної системи для простежуваності на етапі надходження продукції з поля або ферми, було обгрунтовано включення функціональної вимоги до системи на основі інтелектуального аналізу тексту (*text mining*), у тому числі 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 рисунку 4 представлено основні напрямки застосування інтелектуального аналізу тексту, які можуть бути також корисні для вирішення завдань, пов'язаних із простежуваністю продукції.

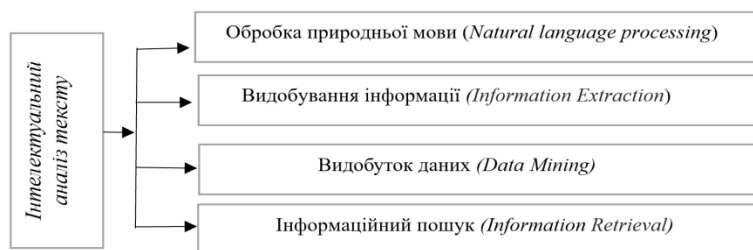


Рис. 4. Напрямки застосування інтелектуального аналізу тексту
Fig. 4. Uses of text mining in the field of text analysis

Згідно загально прийнятими правилами [6], 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 технології видобування (вилучення) інформації [17] дасть змогу на практиці використати переваги цього процесу аналізу неструктурованих даних про походження продукції, вилучити цю інформації у цифровому форматі даних, а пізніше її відредагувати та структурувати.

Покращення системи відстежуваності можливе і за рахунок використання можливостей та перспектив штучного інтелекту, у т.ч. і генеративного штучного інтелекту у формі цифрових помічників. У відповідності до Регламенту (ЄС) №178/2002 щодо загальних рекомендацій простежуваність харчових продуктів та ст. 3 Регламенту (ЄС) № 931/2011 простежуваність

продукції тваринного походження має містити ряд 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], надають можливість користувачу інформаційної системи оцифрувати необхідні файли і документи, що позитивним чином 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 [19]. Оскільки основною функцією Tesseract є витягування друкованого або ж написаного тексту із зображень, в системі простежування дана технологія може мати ефективне застосування для розпізнавання етикеток або інших паперових документів (накладних, договорів) у сканованій або сфотографованій формі.

технологій та інструментів відстеження, дотримання стандартів безпеки та якості продукції, забезпечення можливостей відслідковувати 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 та партій показали перспективи технологій, заснованих на використанні радіочастотного електромагнітного випромінювання, у т.ч. міток RFID в управлінні логістичними ланцюжками та простежуваністю сільськогосподарської продукції.

3. Проаналізовано недоліки існуючих інформаційних систем простежуваності продукції, які передбачають комбікування паперової форми подання інформацію про партії товару із даними, що надходять від міток RFID, сканерів, зчитування штрих-кодів тощо.

4. Визначено перспективи застосування таких компонентів інтелектуальних інформаційних систем управління продукції як технологій безконтактного обміну даними, інтелектуального аналізу тексту, зображень та етикеток, генерального штучного інтелекту у формі цифрових помічників та асистентів. Використання цих компонентів інтелектуальної інформаційної системи простежуваності сільськогосподарської продукції дасть змогу учасникам ланцюга простежуваності мінімузувати 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 у відповідності до стандартів та вимог з простежуваності.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Шлях України до вступу в ЄС. URL: https://eu-solidarity-ukraine.ec.europa.eu/ukraines-path-towards-eu-accession_uk (дата звернення: 11.03.2024).

ВИСНОВКИ

1. У процесі дослідження було проаналізовано основні підходи та напрямки застосування технологій щодо впровадження інтелектуальних інформаційних систем для простежуваності сільськогосподарської продукції у відповідності 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

2. Простежуваність, відповідність та відповідальність. URL: https://export.gov.ua/216-prostezhuvanist_vidpovidnist_ta_vidpovidalnist (дата звернення: 13.03.2024).

3. 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).

4. Товарообіг України за 9 місяців 2023 року URL: https://export.gov.ua/news/5015-tovaroobig_ukraini_za_9_misiatsiv_2023_roku (дата звернення: 14.03.2024).

5. 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=BiuletenuStanuTorgovelnikhVidnosinMizhUkrainoiuTasU2022-Rotsi> (дата звернення: 24.02.2024).

6. Простежуваність харчових продуктів: основні питання. URL: <http://surl.li/socjr> (дата звернення 24.02.2024).

7. Жигайло О. Використання технології Data Mining в автоматизованій системі простежуваності виробництва сирової соняшникової олії. *Automation Technological and Business-Processes*, 2014. Випуск 3 (19). doi:10.15673/2312-3125.19/2014.27953.

8. Schuitemaker R., Xu X. Product traceability in manufacturing: A technical review. *Procedia CIRP*, Volume 93, 2020, pp. 700-705. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.078>.

9. Badia-Melis R., Mishra P., Ruiz-García L. Food traceability: New trends and recent advances. A review. *Food Control*. Volume 57, 2015, pp. 393-401, <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.005>.

10. Olsen P., Borit M. The components of a food traceability system. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 77, 2018, pp. 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.004>.

11. Bougdira A., Ahaitouf A., Akharraz I. Towards an intelligent traceability system, International Conference on Information Technology for Organizations Development (IT4OD), Fez,

- Morocco, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/IT4OD.2016.7479280.
12. Chen R.-Y. Intelligent Predictive Food Traceability Cyber Physical System in Agriculture Food Supply Chain. 2018 International Conference on Electronics, Communications and Control Engineering (ICECC)6–8 March 2018, Avid College, 2018. Volume 1026. doi: 10.1088/1742-6596/1026/1/012017
13. RFID ідентифікація в логістиці. URL: <https://systemgroup.com.ua/uk/rfid-identyfikaciya-v-logistyki> (дата звернення 15.03.2024).
14. 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).
15. 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).
16. Peddineni A. What can you do with text mining? URL: <https://www.quora.com/What-can-you-do-with-text-mining> (дата звернення 20.03.2024).
17. Kurama V. Information Extraction. URL: <https://nanonets.com/blog/information-extraction/> (дата звернення 24.03.2024).
18. Prithiv S. Top 10 OCR Software in 2024. URL: <https://nanonets.com/blog/ocr-software-best-ocr-software/> (дата звернення 24.03.2024).
19. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16210-7_18

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*

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 в розробці та удосконаленні швидкого і ефективного моделювання сценаріїв прийняття управлінських рішень та інтегрування їх з метою оцінки майбутніх вигід, очікуваних прибутків та прогнозування термінів окупності. Наголошено, що в сучасних умовах впровадження інформаційних компаній щодо інноваційних процесів аграрної галузі загалом так і в окремих підгалузях та складових необхідно організувати на рівні державних програм, особливо щодо застосування у напрямку 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 дозволили 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 (у тому числі у 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., Zaplatynskiy N. Utilization of intelligent information technologies for management of resources in agricultural enterprises. The need for innovative agricultural technologies and understanding of market globalization conditions are determined. The article analyzes the role of artificial intelligence in optimizing resource management in agricultural enterprises based on big data analysis. The objective need for agribusinesses to develop and improve fast and efficient scenario modeling for decision-making and integrate them for assessing future benefits, expected profits, and forecasting payback periods is proven. It is emphasized that in modern conditions, the implementation of information companies on innovative processes in the agricultural sector in general, as well as in individual sub-sectors and components, needs to be organized at the level of state programs, especially regarding the application in the direction of technical and technological components of production processes of agricultural enterprises, promoting the development of high-tech activities, and transitioning from a technologically low-resource economy to a high-tech innovative economy. The results of the research allowed systematizing knowledge about existing artificial intelligence (AI) technologies, which have proven to be successful methods for solving problems in agriculture and agribusiness and will be further developed in this direction over the next five to seven years. Their development will allow the business entity to gain competitive advantages and significant economic effect. The use of AI and robots in agriculture solves such tasks as eliminating personnel problems, reducing the harmful impact of chemicals on humans and the environment, increasing the yield of cultivated crops, increasing the productivity of enterprises, and reducing the cost of agricultural production. Further stages of research may involve a more detailed study of various AI technologies and methods to find their best application in various spheres of human activity (including agriculture and agribusiness), determining their effective combination with each other, and substantiating the optimal internal structure (mathematization and software code).

Key words: 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 сільськогос-

подарським 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 покращенні управління бізнес-процесами агропідприємств і враховує актуальні потреби галузі. Представлене дослідження присвячене аналізу основних сфер застосування систем штучного інтелекту 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: Бондаренко Д. [2], Піжук О. [11], Домарацька О. [6], Пісоченко Т. С. [12], Шацька З. Я. [12]. Зокрема, Бортнікова М. Г. займається використанням штучного інтелекту для розв'язання задач у галузі тваринництва, зокрема в галузі контролю якості молока [3]; Болтянська Н. І. – досліджує використання штучного інтелекту в агроінженерії, зокрема в галузі автоматизації сільськогосподарських процесів [1]; Кучмілова Т. С. –

займається розробкою інтелектуальних систем управління сільськогосподарською технікою [8].

Однак, з урахуванням швидкості, з якою науково-технічні нововведення впроваджуються в агробізнес, недостатня 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 принести економічні, соціокультурні та екологічні переваги. Проте для досягнення потенційних вигод потрібна значна 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].

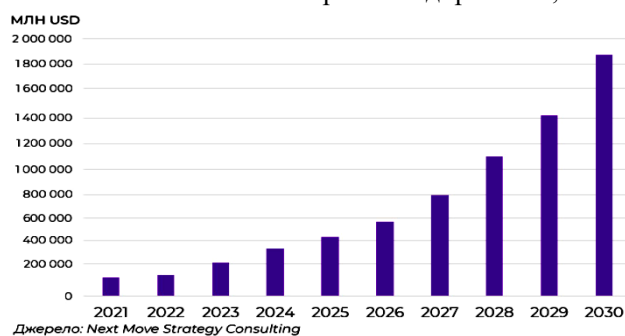


Рис. 1. Обсяг світового ринку штучного інтелекту з прогнозом до 2030 р. [24]

Fig. 1. Global Artificial Intelligence Market Volume Forecasted until 2030. [24]

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.

Застосування цифрових технологій в сільському господарстві надає дрібним фермерським господарствам значні переваги у 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 праців-

ників, 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 плодово-овочівництва (UHBDP).

Досвід успішного застосування машинного інтелекту в аграрному секторі підтверджується практикою провідних компаній у цій галузі. Наприклад, у США та Японії вже використо-

вується 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 на 26%, 31% та 31% відповідно на гектар, як показано нижче.

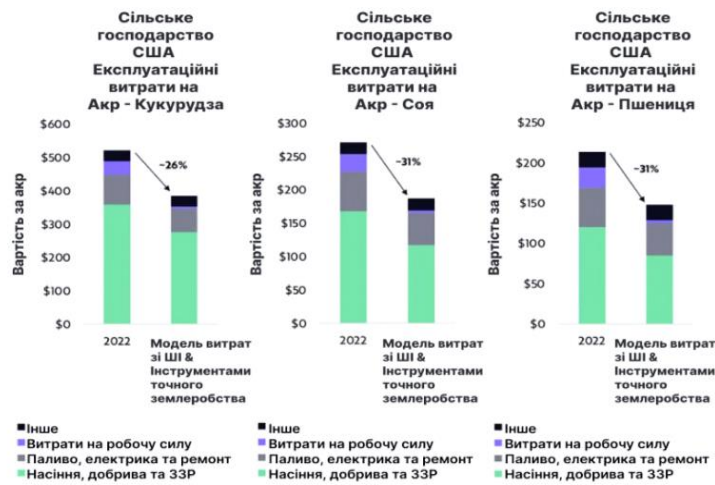


Рис. 2. Вплив застосування штучного інтелекту в точному землеробстві США на зниження питомих експлуатаційних витрат вирощування культур [19]

Fig. 2. The impact of the artificial intelligence use in precision agriculture in the United States on reducing the specific operating costs of growing crops [19]

Компанія Nature Sweet з 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.

Крім того, сингапурська компанія ADDO AI проводить пілотний проект 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 аналізувати 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 мільярдів. 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 [20].

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 ефективно досягнення стратегічних і оперативних цілей підприємства. Разом з тим, Костюченко А. зауважує на тому, 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 проектування, 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. 1).

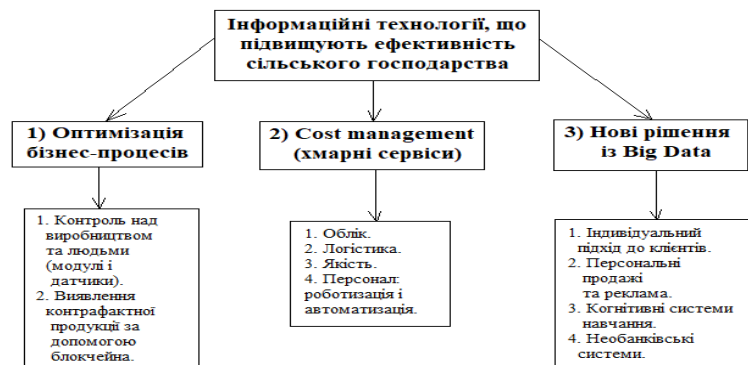


Рис. 3. Структура інформаційних технологій що підвищують ефективність агробізнесу
Fig. 3. The structure of information technologies that increase the efficiency of agribusiness

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 (неймереж) відкрив дуже багато нових можливостей майже у всіх існуючих сферах людської діяльності починаючи від побутових речей і закінчуючи важкою промисловістю [9]. Не виключенням стала 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 рекомендації 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 [15].

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 в використанні будь-якої ІТ системи є використання «хмарних технологій», доступ до якого можна отримати із будь-якого стаціонарного комп’ютера, мобільного пристрою, в незалежності 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 [14].

Крім того, зважаючи на сезонний характер агробізнесу, хмарні технології заощаджують витрати за рахунок використання лише необхідного ресурсу. Також слід зауважити на економії витрат та обслуговуванні серверів. Зберігати дані на віддалених серверах набагато надійніше, ніж локально, можливість швидко і без втрат відновити всю інформацію навіть в разі форс-мажорних обставин, що в разі локального сховища набагато складніше, а часом – неможливо. Використання хмар дозволяє в повній мірі 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 інших систем моніторингу та контролю для аналізу та планування ефективної діяльності. Такі інновації значно спрощують усі механізми в агровиробництві та дозволяють зменшити виробничі втрати та витрати на обслуговування [17].

Технічні збої, кіберзагрози та залежність від інфраструктури є основними викликами для цифровізації аграрного сектору. Великі сільськогосподарські підприємства часто стикаються з такими проблемами, як забезпечення конфі

денційності даних та кібербезпека. Використання цифрових технологій збільшує ризик кібератак та 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 з 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 зіткнеться 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 існуючі 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 фактор 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 стримуючим фактором подальшого розвитку. Для вирішення таких проблем вбачаємо використання 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 фактору» в систематизації та управлінні даними агропідприємства, по-третє це можливість долучити до команди співробітників найкращих міжнародних спеціалістів 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 [21].

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 фермерам 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 дозволяє компаніям визначати споживчі вподобання та адаптувати своє виробництво, що призводить до підвищення конкурентоспроможності на ринку.

Штучний інтелект доповнює аналітику даних, надаючи можливість 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 (табл.).

Крім того, штучний інтелект надає рекомендації для покращення 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 дозволяє 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

грунт, погода, врожайність і використання води, ШІ може розробляти прогнози та рекомендації щодо оптимального розподілу ресурсів. Вона допомагає фермерам визначити оптимальний час

для посіву, поливу, застосування добрив і захисту рослин, забезпечуючи ефективне використання землі, води й робочої сили [22].

Таблиця. Переваги використання штучного інтелекту у сільському господарстві
Table. Advantages of Using Artificial Intelligence in Agriculture

№ п/п	Сфера використання	Опис позитивного впливу на галузь
1	Прогнозування урожайності	Методи машинного навчання, комп'ютерний зір дозволяють аналізувати великі обсяги даних, такі як погодні умови, тип ґрунту, сорт рослин і т.д., щоб точно прогнозувати врожайність. Це допомагає оптимізувати структуру посівів для підвищення продовольчої безпеки та враховувати харчові потреби населення та попереджувати дефіцит вітамінів і мікроелементів.
2	Оптимізація ресурсів та прогнозування ризиків	Методи машинного навчання допомагають раціонально використовувати ресурси, такі як вода, добрива, пестициди, забезпечуючи максимальну продуктивність при мінімальних затратах. Вони також допомагають аналізувати ризики, пов'язані з погодними умовами та шкідниками, оптимізують розміщення посівів і сівбу культур.
3	Розпізнавання шкідників та хвороб	Штучний інтелект дозволяє своєчасно виявляти ознаки зараження чи пошкодження рослин і оперативного вживати заходів для їхнього захисту. Також можна прогнозувати розвиток хвороб і розмноження шкідників для ефективної профілактики.
4	Розпушування ґрунту та розсадження насіння	Роботи-копачі можуть автоматично розпушувати ґрунт та садити насіння на задану глибину та відстань. Це сприяє рівномірному розсіюванню насіння та оптимальному використанню площі. 3. 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.
5	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.
6	Управління тваринництвом	Завдяки своїм потужним обчислювальним можливостям і здатності аналізувати великі обсяги даних, ШІ дозволяє тваринництву забезпечувати ефективніше розведення свійських тварин, птахівництво, кролівництво, рибництво та інші сфери. Зокрема, системи моніторингу на базі штучного інтелекту можуть відслідковувати поведінку тварин, параметри здоров'я та споживання кормів, що дозволяє виявляти захворювання на ранніх стадіях і забезпечувати оптимальний графік годування. Це призводить до покращення добробуту тварин, зменшення рівня смертності та покращення управління фермою.
7	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 та здоров'я.
8	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

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. Вона 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 покращенню продуктивності та ефективності в рослинництві, тваринництві, аналітиці та управлінні ресурсами. ШІ

може принести значну користь в цих галузях завдяки своїм здатностям до оброблення великої кількості даних, аналізу та прийняття розумних рішень.

В даний час, в Україні також існують технології, що використовують розумні машини та роботи. Наприклад, українська аграрна компанія Agroху 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 з сучасних інноваційних систем в управлінні та оптимізації процесів на підприємствах є система ERP (Enterprise Resource Planning – планування та управління ресурсами підприємства). Перевагою системи є поєднання всіх управлінських функцій агропідприємства в єдиний логічний цикл, згідно з потребами бізнес-цілей.



Рис. 4. Основні сфери застосування системи ERP [23]
Fig. 4. The main areas of application of the ERP system [23]

Система включає в себе безперервний збір даних та автоматизований первинний аналіз, що дає можливість управління виробничими процесами, в тому числі і 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 наступні функціональні можливості: управління виробничими процесами, контроль постачання, складу та збуту, доставка продукції, CRM – регуляція взаємодії з клієнтами, кадровий облік, виплата зарплат, складання робочого графіка і т.д., 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 даної 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 ніж Microsoft. Інтерфейс

прикладного рішення інтуїтивно зрозумілий. Гнучкість програми дозволяє провести настройку 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 науководослідні 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, в залежності

від масштабу та складності виробничих процесів. Також треба додати й необхідність постійного супроводу програми відповідним спеціалістом, вартість роботи якого коштує від 2 тисяч євро. Висока ціна та довготривалість налаштування, призводить 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 в 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, все 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 з потенційних застосувань штучного інтелекту є аналіз даних з сільськогосподарських сенсорів, дронів та супутникового зондування для збору та обробки інформації про рослини, ґрунт, урожайність та інші фактори, 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 (у тому числі у 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: ДУТ*, 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. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (заочна форма) «Формування та перспективи розвитку підприємницьких структур в рамках інтеграції до європейського простору»*. 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. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Соціально-економічні проблеми аграрного розвитку регіонів»*: Ніжин, 2018. С. 24–27.

8. Кучмієва Т. С., Мороз Т. О., Шешунова А. В. Використання штучного інтелекту в сільському господарстві. *Modern Economics*. 2023. № 39 (2023). С. 69–74. DOI: [https://doi.org/10.31521/modecon.V39\(2023\)-10](https://doi.org/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*: ХНУРЕ, 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. науково-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: збірник тез доповідей учасників V-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 25 лютого 2022 р.* м. Вінниця, 2022. С. 821–822.
13. Поляков О. Штучний інтелект в агровиробництві. Інноваційні розробки в аграрній сфері. *Молодь і технічний прогрес в АПВ: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції.* Том 2. Харків: ХНТУСГ, 2021. С. 408–409.
14. Руденко М. В. Технології цифрової трансформації сільськогосподарських підприємств. *Агросвіт.* 2019. № 23. С. 8–18.
15. 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.
16. Шацька З. Я., Прима В. І. Особливості впровадження інформаційних технологій в аграрному секторі України. *Агросвіт,* № 13–14, липень. 2022. С. 60–64.
17. 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.
18. Moroz T., Spitsina A., Plukar L., Maslyhan O., Kasmin D., Nazarenko I. Digitalization Of The Economy As A Factor Of Sustainable State Development Against The Background Of Large-Scale Militaryaggression (Ukrainian Experience). *Financial and credit activity problems of theory and practice.* Vol. 6 №. 47 (2022). URL: <https://doi.org/10.55643/fcapter.6.47.2022.3938>.
19. Чи зменшать Штучний Інтелект та Точне Землеробство витрати на агровиробництво? <https://www.agrilab.ua/chy-zmenshat-shtuchnyj-intelekt-ta-tochne-zemlerobstvo-vytraty-na-agrovyrobnytstvo>. (Дата звернення: 4.04.2024).
20. 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.
21. Justification of models of changing project environment for harvesting grain, oilseed and legume crops / A. Tryhuba, O. Bashynskiy, Y. Medvediev, S. Slobodian, D. Skorobogatov. *Independent Journal of Management & Production,* 2019. 10 (7). P. 658-672.
22. 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.
23. What is ERP? | Enterprise Resource Planning Explained. <https://www.projectline.ca/blog/what-is-erp-enterprise-resource-planning>. (Дата звернення 4.04.2024).
24. Global Artificial Intelligence Market Volume Forecasted until 2030. <https://www.nextmsc.com>. (Дата звернення: 4.04.2024).

Стаття надійшла: 12.08.2024р.

УДК 004.85:004.056]:631.1

APPROACH AND MODEL FOR FORECASTING WINTER WHEAT YIELD BASED ON MACHINE LEARNING

Anatoliy Tryhuba, Dr.Sci.(Engin.), Alla Zhelyeznyak, PhD,
Inna Tryhuba, PhD, Andriy Tatomyr, PhD
Lviv National Environmental University

1, V.Velykoho str., Dubliany-Lviv, 80381, Ukraine

e-mail: trianamik@gmail.com, azheleznyak@ukr.net, rlnle@ukr.net, andrew.tatomyr@gmail.com

Тригуба А., Железняк 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. Метою статті є обґрунтування моделі 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 ми використали інтелектуальні алгоритми аналізу, які забезпечують оцінку взаємозв'язків між факторами, що впливають на врожайність озимої пшениці.

На основі якісно підготовлених даних нами обґрунтовано модель прогнозу врожайності озимої пшениці, здійснивши оцінку точних показників. Для дослідження було 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 було 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

Tryhuba A., Zhelyeznyak A., Tryhuba I., Tatomyr A. Approach and model for forecasting winter wheat yield based on machine learning.

An analysis of the subject area and scientific literature regarding the utilization of intelligent approaches to forecasting and planning activities in agriculture has been conducted. The feasibility of employing machine learning for predicting processes in agriculture has been substantiated. The purpose of the article is to substantiate a 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. 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 peculiarities of the processes performed and the resources involved in agriculture. The choice of an effective model for predicting winter wheat yield is based on the developed algorithm, which involves the systematic implementation of seven stages.

To prepare the data, we used intelligent analysis algorithms that provide an assessment of the relationships between the factors that affect the yield of winter wheat. Based on the qualitatively prepared data, we substantiated the model for forecasting winter wheat yield based on the evaluation of 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 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. 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 yields based on the model we have substantiated.

Key words: forecasting, yield, winter wheat, XGBoost algorithm, model, machine learning

Introduction. Information technologies in recent years 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 reduction in the 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 1). 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 the Lviv region in 2021. This made it possible to form a suitable dataset for machine learning.

The specified data set involves the use of seven input variables (X1...X7) and, accordingly, one output variable (Y1). 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 you 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 1. The main characteristics of the data set for building the model

Таблиця 1. 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.

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 their total number 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 us to determine the number of missing values in each column.

	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

	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 task 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.

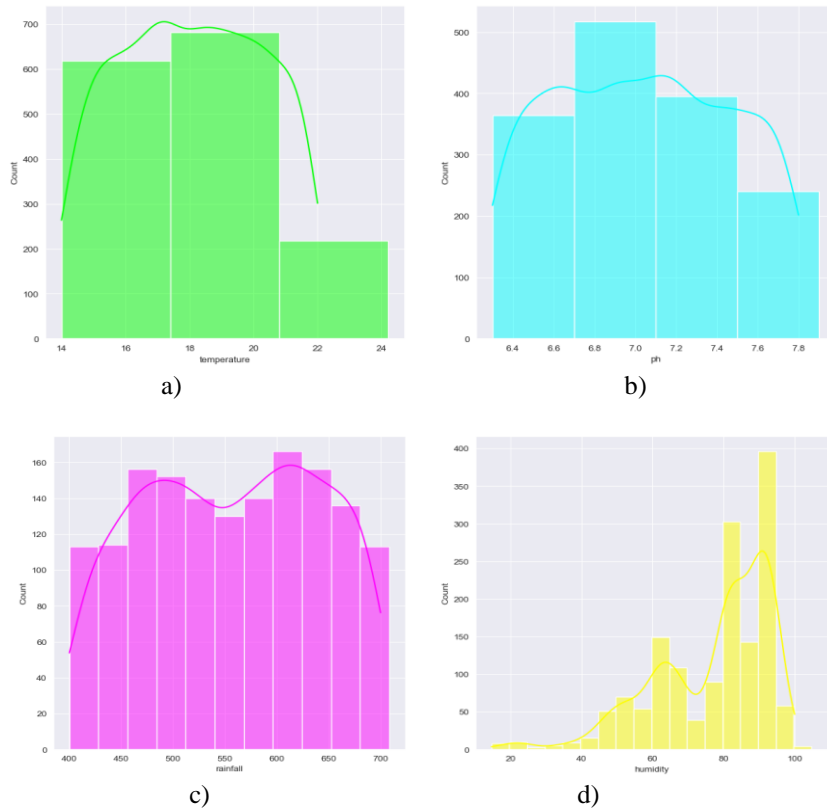


Fig.3. Distribution of data values by such attributes as temperature (a), soil acidity (b), rainfall (c), and humidity (d)

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 a humidity leads to drying out of plants, and too high a 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 data set 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.

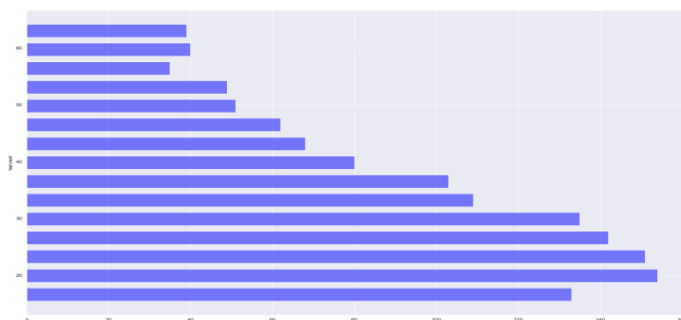


Fig.5. Distribution of winter wheat yields by days with temperatures ranging from 15 to 28 degrees Celsius

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 that have 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:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij}, j = 1, m,$$

(1)

The correlation matrix is determined by using the formula:

$$K_{ij} = \frac{\text{cor}(X_{ij}, Y_1)}{\sigma(X_{ij}), \sigma(Y_1)},$$

(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 (X1...X7) and the target feature "yield" (Y1) is determined by the formula:

$$\text{cor}(X_{ij}, Y_1) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_{ii} - \bar{X}_i)(X_{ij} - \bar{X}_j), i, j = 1, n,$$

(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 our 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 you to find 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:	OLS		Adj. R-squared:		0.904	
Method:	Least Squares		F-statistic:		1669.	
Date:	Fri, 05 Jan 2024		Prob (F-statistic):		0.00	
Time:	19:11:51		Log-Likelihood:		1185.9	
No. Observations:	1061		AIC:		-2358.	
Df Residuals:	1054		BIC:		-2323.	
Df Model:	6					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
const	-1.6650	0.021	-79.315	0.000	-1.706	-1.624
N	0.5718	0.010	68.584	0.000	0.653	0.691
P	0.7083	0.010	71.759	0.000	0.689	0.728
K	0.4067	0.009	45.954	0.000	0.389	0.424
temperature	0.5614	0.009	59.696	0.000	0.543	0.580
humidity	0.8719	0.014	61.752	0.000	0.844	0.900
rainfall	0.3492	0.009	39.037	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(JB):		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 based on the use of 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 based on 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 based on 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.

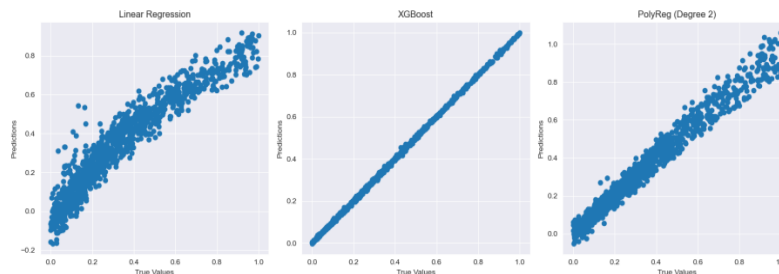


Fig.9. Comparative visual representation of learning results of three types of predictive models
Рис.9. Порівняльне візуальне представлення результатів навчання трьох типів прогностичних моделей

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.

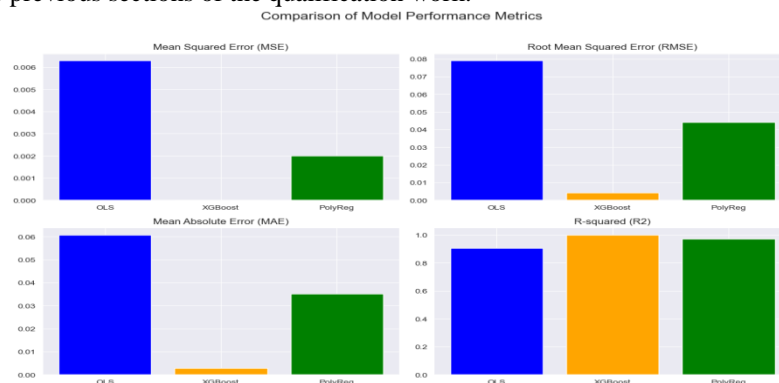


Fig.10. Results of evaluation of accuracy indicators of the obtained forecast models of winter wheat yield
Рис.10. Результати оцінювання показників точності отриманих прогностичних моделей врожайності озимої пшениці.

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 $R^2 = 0.99$. 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 $R^2=0.96$), 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, we can say 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 obtained and the approach 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, we 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, we 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 we 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; 12(5):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; 5(1):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*, Volume 36, Issue 1, 2020. pp. 161-166.
7. Liakos K.G., Busato P., Moshou D., Pearson S., Bochtis D. Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors* 2018, 18, 2674.
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 Intelligent Computation Technology and Automation, Shenzhen, China, 2011, pp. 1045-1049.
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;2:0006.
14. Kamilaris A., Prenafeta-Boldú F. Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 147, 2018, 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. Vyklyuk 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 applications of Agriculture 4.0 technologies, *International Journal of Intelligent Networks*, Volume 3, 2022, pp. 150-164.
20. Mohd J., Abid H., Pratap Singh R., Rajiv S. Enhancing smart farming through the

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; 21(11):3758.

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; 13(16):9288.

Стаття надійшла 21.08.2024

УДК 004.85:519.8

ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Павло Луб, к.т.н., доц., Валентин Смолінський, к.е.н., доц., Роман Падюка, к.т.н., Олег Боярчук, к.т.н., доц., 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

Луб П., Смолінський В., Падюка Р., Боярчук О., Станько В. Використання імітаційного моделювання в інформаційних системах підтримки прийняття рішень.

Означено передумови застосування ІТ для розробки інформаційно-аналітичних інструментів підтримки прийняття рішень у проектах розвитку агропромислового комплексу. Виконано аналіз чинних підходів до дослідження технологічних систем із мінливим зовнішнім середовищем за допомогою методів моделювання та зокрема ІТ. Розкрито складові проектів технологічних систем та дію проектного 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 культурних рослин. Виокремлено складові зовнішнього проектного середовища що формують ймовірнісне 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 проектах технологічних систем збирання врожаю цукрових буряків. Виконано моделювання та узагальнено їх 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 система, управління проектами, ефективність.

Lub P., Smolinskiy V., Padiuka R., Boyarchuk O., Stanko V. Use of simulation modelling in decision support information systems

The prerequisites for the use of IT for the development of information and analytical tools for supporting decision-making in the development projects of the agro-industrial complex are determined. The analysis of current approaches to the study of technological systems with a changing external environment using modeling methods and, in particular, IT was performed. The components of technological systems projects and the effect of the project environment are revealed. The reasons for the variability of the external conditions of the implementation of the technological processes of crop harvesting and the basis for the use of statistical simulation modeling methods are determined. Emphasis is placed on the expediency of creating a set of models that will reflect the components of the technological system of harvesting cultivated plants. The components of the external project environment that form the probabilistic formation of the duration of the time fund for the execution of works in the technological system are singled out. The elements of the methodology for taking into account the influence of agrometeorological conditions on the time fund for the execution of work in the autumn period in the projects of technological systems of sugar beet harvesting are presented by a statistical simulation model. Simulations were performed and their results were summarized. The use of methods of correlation-regression analysis to establish patterns of changes in the duration of the naturally allowed time fund relative to the planned time of the start of crop harvesting and substantiation of correlation dependence is shown. The regularity of changes in the duration of the naturally allowed time fund for the performance of beet-harvesting work and the statistical characteristics of this indicator for different calendar terms of the start of the work have been established. The differential functions of the distribution of the duration of the naturally allowed time fund for the performance of beet-harvesting work in the autumn period 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, зокрема, прибутковість галузі загалом [2]. Водночас,

річний обсяг виробленої продукції залежить від сукупної дії чинників значна частина із яких є природного походження і є некерованою, або частково керованою [1, 3, 4, 6-8]. Стохастична дія агрометеорологічних умов призводить до зміни часу та змісту робіт, потреби у ресурсах, моніторингу та доступу до оперативної інформації щодо доцільності тих чи інших корегуючи дій у технологічному процесі вирощування [1, 3, 4, 6-8]. Такий підхід до управління проектами 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 вирішення такого завдання необхідно володіти методами та моделями які враховують особливості галузі рільництва та некерований вплив природних умов (зовнішнього проектного 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 прийняття 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 використовуються 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 включають 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 вирішують завдання в АПК свідчить про вагомість створення та розвитку таких методів, моделей та інформаційних систем. Це значно спростить процеси управління проектами, підтримки прийняття рішень як на стратегічному так і на тактичному рівнях виробництва, а також сформує достатнє інформаційне наповнення такої складової агробізнесу як ф'ючерсні угоди, залучення низько відсоткових 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. Представити можливість створення інформаційно-аналітичних систем для підтримки прийняття техніко-технологічних рішень у проектах 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 моделлю, а відтак виконати моделювання цих процесів для різних умов їх виконання. Такий підхід дає змогу різносторонньо "розглядати" реалізацію проектів в АПК та розробляти рекомендації щодо підтримки прийняття рішень під час їх 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 із 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 прийняття 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 їх 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 (τ_{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 (τ^{-5}) нижче -5°C , або час завершення (τ_f^c) 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 прийняття рішень.

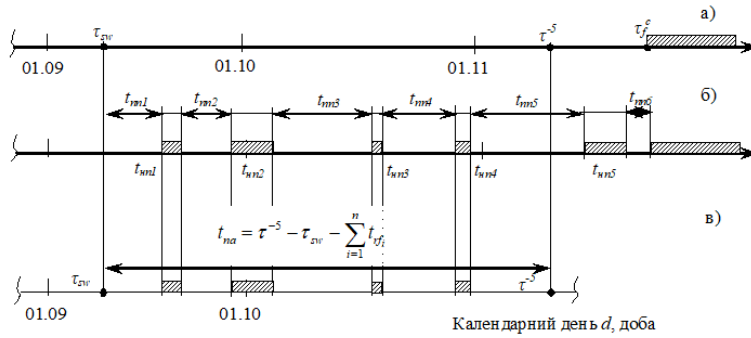


Рис. 1. Формування природно зумовленого фонду часу на виконання робіт у проектах збирання врожаю цукрових буряків:

- а) календарні терміни початку та завершення робіт; б) тривалість погожих та непогожих проміжків; в) природно зумовлений фонд часу; t_{nn} , t_{mn} – тривалість погожих та непогожих проміжків часу, днів

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_{mn} – 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_{mn} , τ^{-5} , τ_f^c , 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 змогу отримати репрезентативні вибірки емпіричних даних.

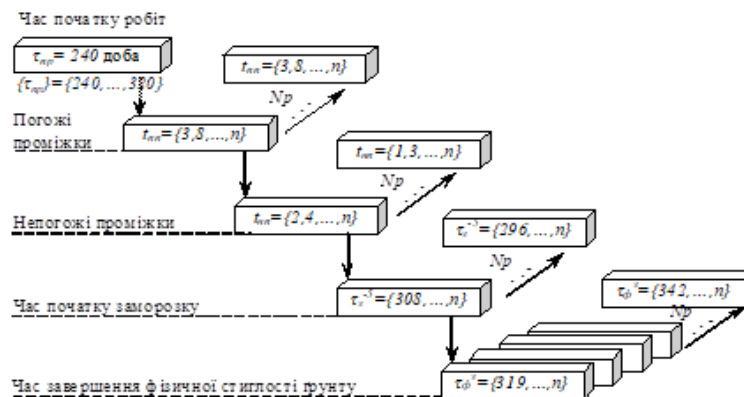


Рис. 2: Структура циклів імітаційної моделі для врахування мінливості природно зумовленого фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт

Fig. 2: The structure of simulation model cycles to take into account the variability of the naturally determined time fund for beet harvesting

Реалізація вкладених циклів в кодї програми імітаційної моделі агрометеорологічної складової технологічної системи передбачає використання генератора псевдовипадкових величин $rand(x)$ із стандартної бібліотеки С# [14], що власне і дає змогу відтворити закон розподілу [4, 10, 17] кожного із ймовірнісних показників t_{nm} , t_{im} , τ^5 , τ_{ϕ}^3 , а також їх сукупний вплив на фонд часу t_{na} :

```
temp = (c + a * Math.Exp((1 / b) *
(Math.Log(-(Math.Log(rd.NextDouble()))))));
```

де temp – змінна, що декларує ймовірнісний показник (t_{nm} , t_{im} , τ^5 або τ_{ϕ}^3); rd.NextDouble() – функція, що генерує псевдовипадкову величину для прикладу мови програмування С# [14]; a, c, b – відповідно коефіцієнти рівняння оберненої функції розподілу, що описує розподіл випадкової величини t_{nm} , t_{im} , τ^5 та τ_{ϕ}^3 .

Використання такого підходу для відображення ймовірнісного впливу зовнішніх умов у моделі технологічної системи збирання врожаю дає змогу виконати багаторазову реалізацію моделі і отримати показники t_{na} , побудувати закономірність їх зміни та встановити розподіл цієї ймовірнісної величини. Наступне використання методів кореляційно-регресійного аналізу для

встановлення закономірностей зміни t_{na} відносно планового τ_{sw} дала 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 χ^2 Пірсона встановити теоретичний закон розподілу t_{na} (табл.).

Зокрема встановлено, що для різних τ_{sw} розподіл t_{na} узгоджується з різними теоретичними 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 τ_{sw} наведені у табл.

Врахування цих особливостей проектного середовища у статистичній імітаційній моделі дає змогу відобразити агрометеорологічну та предметну складових, 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 проектах із некерованим проектним середовищем.

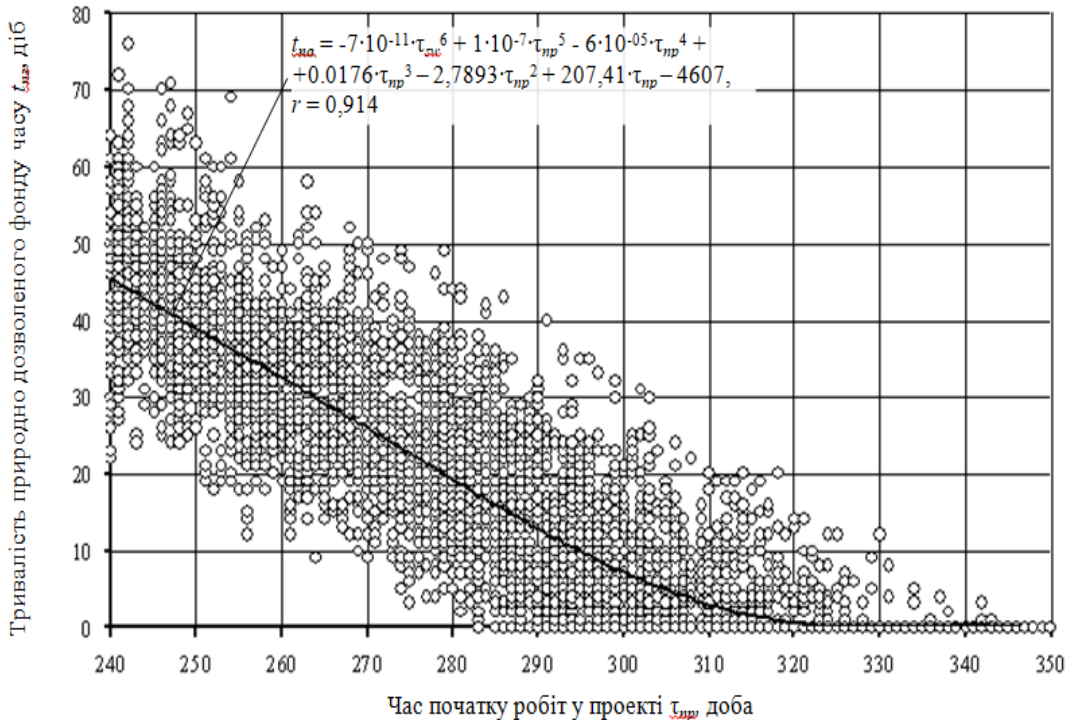


Рис. 3. Закономірність зміни тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт впродовж осіннього періоду (Вол.-Волинський р-н)

Fig. 3. The regularity of changes in the duration of the naturally allowed time fund for beet harvesting during the autumn period (Vol.-Volyn district)

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 (Vol.-Volyn 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 проектах технологічних систем галузі рослинництва дає змогу отримати об'єктивні результати комп'ютерних експериментів, встановити закономірності зміни показників ефективності за використання відповідного оснащення проектів, а відтак розвинути інформаційно-аналітичний супровід управлінських рішень. Застосування розробленої статистичної імітаційної моделі агрометеорологічної та біологічної складових проектного середовища для дослідження закономірностей ризику їх показників дало змогу на підставі комп'ютерних експериментів і методів кореляційно-регресійного аналізу дає змогу обґрунтувати залежність тривалості природно зумовленого фонду часу від термінів початку бурякозбиральних робіт у проектах. 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 проектах дало змогу на підставі критерію χ^2 Пірсона обґрунтувати теоретичний закон розподілу цієї ймовірнісної величини. Встановлено, що розподіл t_{na} для різних планових термінів початку робіт у проектах є змінним (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 (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 впливу агрометеорологічної складової технологічних процесів збирання врожаю дає змогу створити інформаційну систему підтримки прийняття рішень, а відтак досліджувати вплив змісту робіт та структури цих проектів на показники ефективності і на цій підставі обґрунтовувати управлінські рішення.

Бібліографічний список

- Березовецький С. А. Обґрунтування параметрів технічного оснащення технологічних систем збирання озимого ріпаку: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к-та техн. наук: спец. 05.05.11 / Березовецький С. А. Львів, 2017. 21 с.
- 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)
- Днесь В. І. Обґрунтування параметрів зернозбирально-транспортних комплексів для сільськогосподарських товаровиробників : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к-та техн. наук: спец. 05.05.11 / Днесь В.І. Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва». Глеваха, 2015. 20 с.
- Луб П. М. Обґрунтування параметрів комплексу ґрунтообробних машин сільськогосподарського підприємства : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 / П. М. Луб. Львів, 2006. 23 с.
- 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. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.05.11 / В. Л. Пукас. Львів, 2020. 22 с.

7. Спічак В. С. Управління виробничо-технологічним ризиком у проектах збирання цукрових буряків : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.22 / В. С. Спічак. Львів, 2010. 23 с.

8. Шарибура А. О. Управління змістом та часом у проектах з технологічним ризиком (стосовно збирання льону-довгунця) : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.22 / А. О. Шарибура. 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) 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, in: Proceedings of 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT2021, IEEE, Lviv, 2021, pp. 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, 3109, pp. 53-57, 2022.

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) In: CEUR Workshop Proceedings vol. 2851 (2021)

17. Tryhuba A., Padyuka R., Tymochko V., Lub P. Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects. CEUR Workshop Proceedings, 3109, pp. 25-31, 2022.

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*

Ковалишин О., Чухрай Л., Заплатинський Н. Вплив використання генеративного штучного інтелекту на продуктивність розробників програмних продуктів.

В роботі 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 сприяє більшості з них 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.

В роботі досліджувалось, як ШІ може підвищити продуктивність розробки програмного забезпечення групами розробників – осіб з різними ролями, які виконують різноманітні завдання, результатом яких є спільний результат. Дослідження проводились 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 в семи різних країнах та виконували різні проекти на окремих рівнях. Провівши заплановані дослідження 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% вищою, 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 той факт, що генеративний штучний інтелект починає відігравати значну роль в галузі ІТ під час розробки програмного забезпечення.

Крім того, виявлено, що ефективне використання генеративного ШІ не тільки зменшує час на розробку та підвищує продуктивність, але й сприяє зменшенню технічного боргу на етапі впровадження проєкту. Команди, які інтегрували генеративний ШІ в робочі процеси, знижують кількість помилок в коді на 25%, що, у свою чергу, сприяє підвищенню загальної якості продукту та зменшенню витрат на подальше технічне обслуговування. Таким чином, 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., Zaplatynskiy N. The 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 using generative AI by developers at SoftServe reduces 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.

The introduction of 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 not only reduces development time and increases productivity but also 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 not only improves development processes but also positively impacts the entire software lifecycle.

Key words: 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 у теперішню епоху цифрових технологій. Зараз він починає відігравати роль в розвитку суспільства, співмірну із запуском банкоматів, Інтернету, смартфонів чи електромобілів [1].

Аналізуючи розвиток більшості галузей можна стверджувати, що використання генеративного штучного інтелекту сприяє більшості з них отримати додану вартість, оскільки з його допомогою можна виконувати низку функцій, які до цього здійснювали наймані працівники. Наприклад, в банківській справі з його допомогою можна проводити консультації з управління особистими фінансами та складання бюджету, здійснювати допомогу клієнтам із банківськими запитами/операціями, керувати обліковими записами, виявляти шахрайство. В 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 в дослідженнях, отримати рекомендації щодо відповідності нормативним вимогам і контролю якості. В сфері продаж 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, 7, 8, 9].

Таким чином можна стверджувати, що генеративний штучний інтелект стає невіддємною частиною в діяльності багатьох галузей, сприяючи підвищенню їх ефективності завдяки можливості автоматизації та виконанні низки операцій та функцій, які до цього часу здійснювали наймані працівники.

Аналіз останніх публікацій. Генеративний вплив штучного інтелекту є очевидним, стимулюючи ефективність, сприяючи інноваціям і перевершуючи межі можливого [2]. Підтвердженням цього є низка прикладів, де його використання складає значну частку затрат на виробництво певних продуктів [3, 4]. Зокрема, під час виробництва удосконалених перегоронок для літака Airbus 45% з них проектується за допомогою генеративної версії програмного забезпечення Autodesk 7. Використання компанією Siemens штучного інтелекту дозволило на 75% скоротити час обробки знімків МРТ. До 2030 року 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.

Певну частку ШІ займає в 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 лежать численні інструменти ШІ – від ChatGPT і Einstein GPT до H2O.ai і далі. 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. У той час як 78% цих заявників пройшли співбесіду [15].

Einstein GPT – це платформа AI, розроблена Salesforce. Він створений для покращення взаємодії з користувачем і покращення процесу прийняття рішень за допомогою прогнозної

аналітики, обробки природної мови (NLP) і можливостей машинного навчання.

Компанії можуть використовувати Einstein GPT для різноманітних цілей, таких як підрахунок потенційних клієнтів і можливостей, прогнозне прогнозування, автоматизація обслуго-

вування 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).

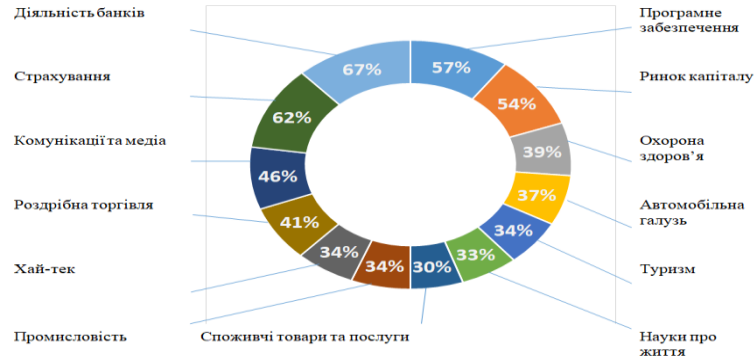


Рис. 1 – Генеративні інновації в галузях на основі штучного інтелекту
Fig.1. Generative innovation in industries based on artificial intelligence

H2O.ai – це хмарна платформа штучного інтелекту, яка дозволяє користувачам різного рівня кваліфікації створювати прогнозні моделі [17]. Він допомагає вирішувати складні бізнес-завдання за допомогою ШІ та автоматизованого машинного навчання. Запровадження H2O.ai вплинуло на ринок праці, зробивши ШІ та науку про дані більш доступними для широкої громадськості.

Зараз у світі майже не залишилося галузей, де ще не використовується штучний інтелект. Найбільше його застосування спостерігається, насамперед, 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 ІТ-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, які можна відповідно заощадити та виконати за допомогою ШІ. З іншого боку ці показники характеризують ефективність використання ресурсів та швидкість поступлення програмного забезпечення на ринок. З огляду на це є важливими дослідження, спрямовані на розумін-

ня, як інтеграція ШІ в процес створення програмного продукту впливає на ефективність роботи його розробників.

Мета роботи. Метою дослідження було порівняти, як ШІ може підвищити продуктивність програмного забезпечення групи розробників – осіб з різними ролями, які виконують різномунітні завдання, результатом яких є спільний результат.

Методика проведення досліджень. Дослідження проводились 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 в семи різних країнах та виконували різні проекти на окремих рівнях. Реалізація підходу «людина в циклі» під час процесу прийняття 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 проект розробки програмного забезпечення включав багатофункціональну команду, яка виконувала різні завдання на кожному етапі SDLC, який в сукупності визначав результат проекту. Частково посадові обов'язки членів команди покладалась 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 проекту. 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.

Результати досліджень. Генеративні системи ШІ для виконання певного виду робіт використовують створені підказки. Залежно від рівня їх застосування можна отримати різні результати. Для вирішення поставленої в роботі мети учасників дослідження було навчено ефективно використовувати зазначені підказки.

Як джерело підказок було використали найновішу версію ChatGPT – GPT-4. Серед безлічі доступних на ринку комерційних, відкритих і вузькоспеціалізованих інструментів генеративного ШІ, він є одним з найдосконаліших LLM, доступний на ринку, є простим у використанні, швидким для вивчення та застосовується для багатьох напрямків і ролей у SDLC.

Оскільки тестова група виконувала проектні завдання з генеративним ШІ, а контрольна група – без, це дозволило порівнювати рівні продуктивності кожної із досліджуваних когорт.

Для оцінки кожного конкретного проектного завдання залучався експерт, який мав глибокі знання та великий досвід роботи в сфері

програмування. Відповідальність експертів полягала в тому, щоби переконатися, що завдання проекту 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, ми 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 створенню програмного продукту. Її величина 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 проектом (+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 проектування, проведення контролю якості, розгортання та випуску програмного продукту.

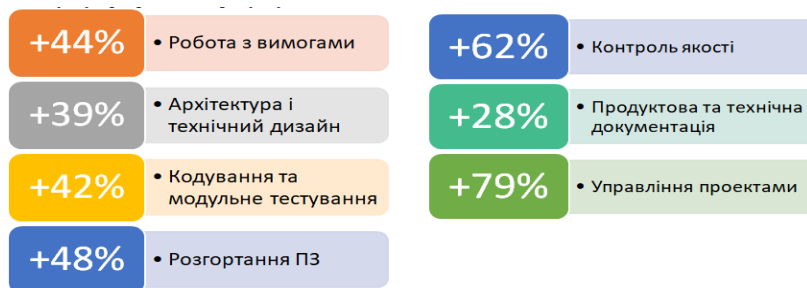


Рис.2. Результати впливу генеративного ШІ на продуктивність реалізації окремих етапів створення програмного продукту

Fig. 2. Results of the impact of generative AI on the productivity of the implementation of individual stages of creating a software product

Таким чином можна вважати, що ці результати є достатньо узагальненими та бути застосованими до більшості проектів з розробки програмного забезпечення.

Разом з цим вони засвідчують, що найбільш істотні відмінності спостерігаються в скороченні часу, і, як наслідок, збільшенні результативності дослідної команди, яка використовувала генеративний ШІ в ході виконання проектних завдань.

Зазначені показники були детально проаналізовані, врахувавши середню вагу проектних завдань у типовій моделі проекту SDLC.

Завдяки використанню технологій штучного інтелекту вдалося значно скоротити час, необхідний для виконання етапів створення програмного продукту (рис. 3).

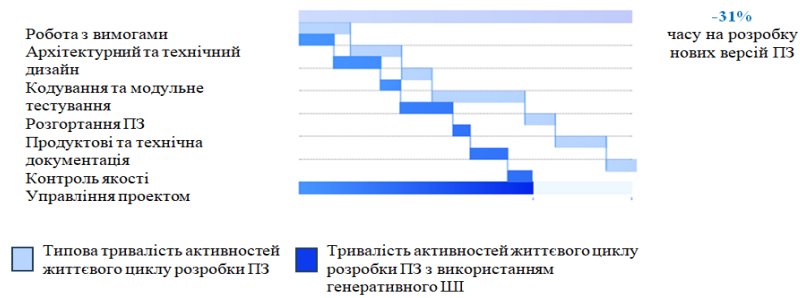


Рис. 3. Порівняння затрат часу на виконання етапів створення розробниками програмного продукту з використанням ШІ і без нього

Fig. 3. Comparison of the time spent on the stages of creating a software product by developers with and without the use of AI

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.

Разом з цим, результативність виконання та отримання запланованого результату тестовою групою у проекті SDLC є на 45% вищою, ніж контрольної (рис. 4).

Тобто можна з великою ймовірністю стверджувати, що використання генеративного ШІ в процесі створення програмних продуктів є надзвичайно корисним і перспективним.

Запровадження ШІ у робочі процеси розробки програмного забезпечення сприяє суттєвому підвищенню продуктивності його виконавців. Підтвердженням цього є дані, наведені в табл. 1.

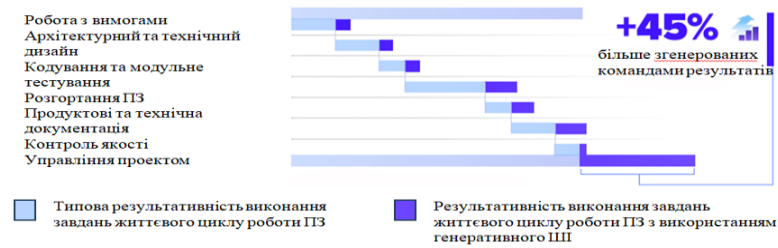


Рис. 4. Результативність виконання та отримання запланованого результату розробниками програмного продукту з використанням ШІ і без нього

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	+42%
Розгортання програмного забезпечення	Back-End	+48%
Контроль якості	Big Data	+62%
Продуктова та технічна документація	DW and BI	+28%
Управління проектом	API Integration	+79%

Завдяки використанню інженерами C#/.NET Back-End генеративного ШІ їх продуктивність зростає в середньому на 49%, а час на отримання кінцевого результату зменшується на 33% порівняно з тими, хто його не застосовує. Ці дані

виглядають значну роль в розвитку суспільства. Його починають все більше використовувати в різних

в черговий раз засвідчують доцільність інтеграції ШІ в процес розробки програмного забезпечення

Висновки

1. В теперішню епоху цифрових технологій генеративний штучний інтелект починає відігравати значну роль в розвитку суспільства. Його починають все більше використовувати в різних

2. Інтеграція генеративного ШІ в процес розробки програмного забезпечення сприяє скорочення часу на отримання продукту програмування та виступає каталізатором високої продуктивності команди та досягненню кращих результатів проєктів.

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 є на 45% вищою, 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. <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. <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. <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. <https://www.cbinsights.com/research/generative-ai-healthcare/>.

10. <https://info.softserveinc.com/hubs/files/redefining-the-economics-of-software-development-gen-ai.pdf?hsCtaTracking=a98fe7d6-41f3-4fee-823c-bc39accfbca6%7Cb879abb-eb87-481d-84c2-f0feabd3cc3a>

11. <https://www.epam.com/insights/ebook/a-call-to-action-for-generative-ai>

12. <https://github.blog/2022-09-07-research-quantifying-github-copilots-impact-on-developer-productivity-and-happiness/>

13. [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. <https://www.ere.net/articles/the-impact-of-ai-on-job-skills>

15. <https://www.resumebuilder.com/3-in-4-job-seekers-who-used-chatgpt-to-write-their-resume-got-an-interview/>

16. <https://backlinko.com/salesforce-stats>

17. <https://h2o.ai/>

18. <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

Розділ 8

ІНЖЕНЕРІЯ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ ТА БЕЗПЕКИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 629.114.45

ОЦІНКА ПРИСТОСОВАНOSTІ АВТОМОБІЛІВ-РЕФРИЖЕРАТОРІВ ДО ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ, ЩО ШВИДКО ПСУЮТЬСЯ

Олег Миронюк¹, к. т. н., Ростислав Паславський¹, к. т. н., Олег Сукач¹, к. т. н., Віктор Шевчук², к. т. н

*¹Львівський національний університет природокористування
вул. В. Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: myronyukos@lnup.edu.ua, rostilavpaslavskij@gmail.com, 19oleg85@ukr.net*

*²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
вул. Клепарівська, 35, м. Львів*

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 в доставці продуктів у роздрібну торговельну мережу за допомогою спеціалізованого рухомого складу. Встановлено, що під час роботи автомобілів-рефрижераторів на розвізних маршрутах температурний режим 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. Представлений вираз теплового балансу всередині вантажного відсіку автомобіля-рефрижератора, розкриті складові втрат тепла. З'ясовано основні резерви у зменшенні втрат тепла автомобіля-рефрижератора, за яких забезпечується збереження якості вантажу.

З'ясовані конструктивні особливості та технічні характеристики спеціалізованих транспортних засобів для перевезення вантажів, що швидко псуються, а також їх холодильних установок. Експериментально досліджений вплив температури навколишнього повітря та часу розвантаження на температуру повітря у вантажному відсіку автомобілів-рефрижераторів з холодильними установками компресорного та евтектичного типу. Підтверджена гіпотеза про лінійний характер впливу температури навколишнього повітря на температуру повітря у вантажному відсіку автомобіля-рефрижератора. Отримані аналітичні залежності температури повітря у вантажному відсіку різних типів автомобілів-рефрижераторів від температури навколишнього повітря, часу розвантаження та часу руху з вантажем. Дані рекомендації стосовно вибору раціонального рухомого складу для перевезення дрібних партій морозива на розвізних маршрутах в 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.

Myronyuk O., Paslavskij R., Sukach O., Shevchuk V. Assessment of refrigerator vehicles suitability for the transportation of perishable goods

The factors affecting the choice of motor vehicles rolling stock for the transportation of various types of cargo are revealed. Emphasis is placed on modern logistics approaches in the delivery of products to the retail trade network using specialized rolling stock. It was established that during the operation of refrigerated vehicles on delivery routes, the temperature regime of transportation is often not observed due to the frequent opening of the doors of the van, which leads to a loss of perishable goods quality during transportation. The main parameter that has such a negative impact is the temperature of the surrounding air. The expression of the heat balance inside the cargo compartment of a refrigerator car is presented, the components of heat loss are revealed. The main reserves in the reduction of heat losses of the refrigerator car, which ensure the preservation of the cargo quality, have been clarified.

The design features and technical characteristics of specialized vehicles for the transportation of perishable goods, as well as their refrigerating units, have been clarified. The effect of ambient air temperature and unloading time on the air temperature in the cargo compartment of refrigerator cars with compressor and eutectic type refrigerating units was

experimentally investigated. The hypothesis about the linear nature of the influence of the ambient air temperature on the air temperature in the cargo compartment of the refrigerator car was confirmed. Analytical dependences of the air temperature in the cargo compartment of various types of refrigerator cars on the ambient air temperature, unloading time and time of movement with cargo were obtained. Recommendations are given regarding the choice of rational rolling stock for the transportation of small batches of ice cream on delivery routes in the trade network of Lviv. It has been established that it is more appropriate to use IVECO cars for the transportation of small batches of perishable goods on delivery routes with frequent stops for unloading goods at high ambient air temperatures. This will ensure the preservation of quality indicators of cargo and increase the efficiency of the specialized rolling stock vehicles use.

Key words: 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 розглядалися в роботах 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 відзначають, що у випадку зростання часу навантажувально-розвантажувальних робіт температура повітря у ВВ автомобіля-рефрижератора істотно змінюється [6; 12; 18].

Значається [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 проведених досліджень [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 – теплоприток 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 в 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. Таким чином робота присвячена оцінці пристосованості автомобілів на основі встановлення закономір-

ностей впливу погодних і транспортних мов 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. Дані автомобілі мають рівні об'єми ВВ, а також по трое дверей з кожного боку фургона розмірами 90 х 60 см. Порівняльна характеристика автомобілів наведена в таблиці 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	4000
Внутрішній об'єм ВВ, м ³	11,18	10,6
Зовнішня площа ВВ, м ²	35,0	35,3
Площа бічних стін, м ²	22,0	18,5
Кількість бічних дверей фургона, шт.	3	3
Площа дверного отвору, м ²	0,54	0,54
Зовнішній об'єм ВВ, м ³	13,8	13,7
Вантажність, кг	1200	2200
Тип двигуна	бензиновий	дизельний
Вартість, тис. грн.	860	1250

Автомобіль IVECO 59-12 оснащений холодною установкою евтектичного типу «Carrier Vatra -200» і забезпечує температурний режим від -18 °С до -35 °С при трьох, чотирьох відкриттях дверей за годину при температурі навколишнього повітря +30°С. Автомобіль АФ-37170А оснащений холодною установкою компресорного типу «Tehrmo King V-200 max» і забезпечує температурний режим -18..-20° С при двох, трьох відкриттях дверей на годину за температури навколишнього повітря + 30°С. У таблиці 2 наведено характеристики деяких холодильних установок.

Випробування проводилися в міських умовах на розвізних маршрутах під час перевезення 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.

Опади були відсутні. Під час проведення експерименту замірялися: температура навколишнього повітря $t_{нов}$ на початку і в кінці зміни, час розвантаження τ_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 °С в діапазоні вимірювання: -50 до +750°С. 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 ³ при K=0,4 Вт/м ² °C	9-11	9-12	9-11	12-16
Холодопродуктивність, Вт	2300	4000	2750	4000
Характеристика ХОУ при температурі 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, що швидко псуються

Table 3. The temperature regime of the cargo compartment of trucks for transportation of perishable goods

Темпера-тура 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 рисунку 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.

Залежність температури повітря у ВВ від часу розвантаження за різних температур навколишнього повітря для автомобіля-рефрижератора АФ-37170А з бічними дверима представлена на рисунку 3.

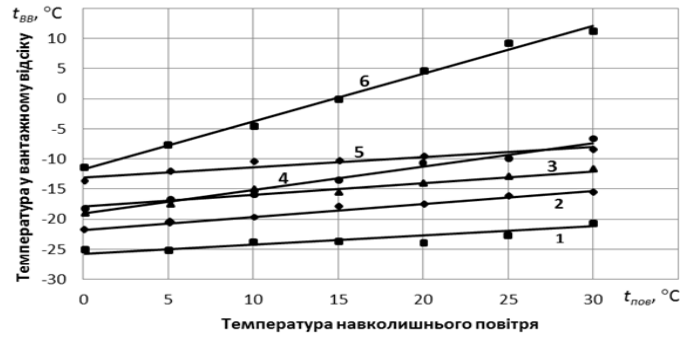


Рис. 1. Вплив температури навколишнього повітря на температуру повітря у вантажному відсіку автомобіля-рефрижератора:

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.)

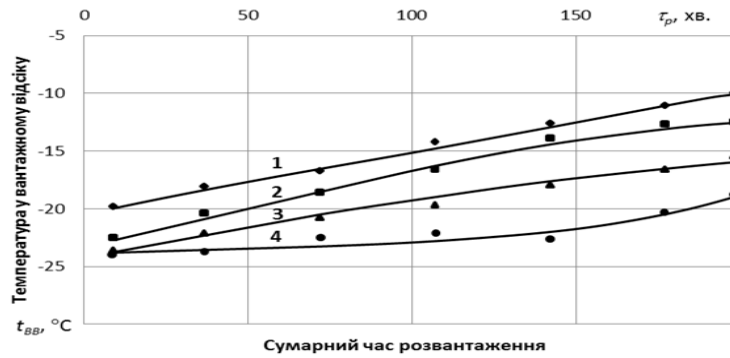


Рис. 2. Вплив часу розвантаження на температуру повітря у ВВ автомобіля IVECO 59-12: 1 – $t_{нов} = 30^\circ\text{C}$; 2 – $t_{нов} = 20^\circ\text{C}$; 3 – $t_{нов} = 10^\circ\text{C}$; 4 – $t_{нов} = 0^\circ\text{C}$

Fig. 2. The influence of the unloading time on the air temperature in the IVECO 59-12 car's internal combustion engine: 1 – $t_{pov} = 30^\circ\text{C}$; 2 – $t_{pov} = 20^\circ\text{C}$; 3 – $t_{pov} = 10^\circ\text{C}$; 4 – $t_{pov} = 0^\circ\text{C}$

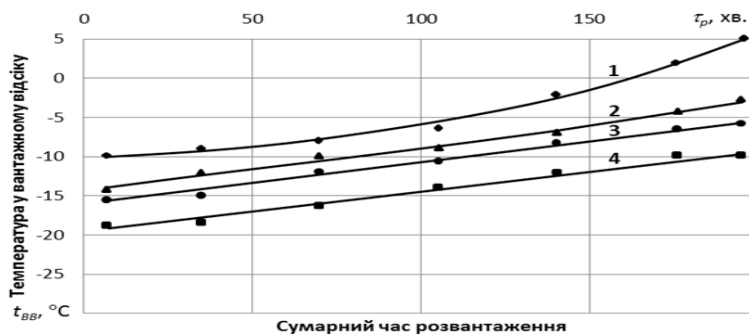


Рис. 3. Вплив часу розвантаження на температуру повітря у ВВ автомобіля АФ-37170А із бічними дверима: 1 – $t_{нов} = 30^\circ\text{C}$; 2 – $t_{нов} = 20^\circ\text{C}$; 3 – $t_{нов} = 10^\circ\text{C}$; 4 – $t_{нов} = 0^\circ\text{C}$

Fig. 3. The influence of the unloading time on the air temperature in the interior of the AF-37170A car with side doors: 1 – $t_{pov} = 30^\circ\text{C}$; 2 – $t_{pov} = 20^\circ\text{C}$; 3 – $t_{pov} = 10^\circ\text{C}$; 4 – $t_{pov} = 0^\circ\text{C}$

З графіків видно, 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. Слід 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 °С.

Аналіз результатів дослідження показав, що за умови підвищення температури повітря і сумарного часу розвантаження підвищується температура повітря у ВВ автомобіля-рефриже-

ратора. Аналіз результатів дослідження показує, що найменший вплив високих температур навколишнього повітря та час розвантаження на температурний режим вантажного відсіку характерно для автомобілів IVECO 59-12 з холодильною установкою евтектичного типу.

Аналітичний вигляд багатофакторних моделей для автомобілів IVECO 59-12 з холодильною установкою евтектичного типу, для автомобіля АФ-37170А з холодильною установкою компресорного типу:

$$t_{BB}^{IVECO} = -30,05 + 0,15(t_{нов} + 25) + 1,48\tau_p - 5,63\tau_{pxe}\tau_p + 0,04(t_{нов} + 25)\tau_p + 1,48(t_{нов} + 25)\tau_{pxe}; \quad (7)$$

$$t_{BB}^{A\Phi} = -18,84 + 8,92(t_{нов} + 18) + 3,15\tau_p - 3,07\tau_{pxe}\tau_p + 7,09(t_{нов} + 18)\tau_p + 0,12(t_{нов} + 18)\tau_{pxe}. \quad (8)$$

Значення статистичних характеристик багатофакторних математичних моделей представлені в таблиці 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 табличного 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 в моделі. Значимість параметра чутливості до зміни температури навколишнього повітря і сумарного часу розвантаження перевірені за критерієм Стьюдента. 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. Дані 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 -190». 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. Це дозволить забезпечити збереження вантажу та підвищити ефективність використання рухомого складу.

Висновки

Вирішене науково-практичне завдання, спрямоване на підвищення ефективності експлуатації автомобілів-рефрижераторів на розвізних маршрутах перевезення швидкопсувного вантажу в літній період на основі встановлення та практичного використання закономірностей зміни температури повітря у вантажному відсіку за різних умов експлуатації.

Встановлено закономірності зміни температури повітря у вантажному відсіку від темпе-

ратури 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 хвилин до 196 хвилин 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. Дані 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 часу 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., Олешук 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. Москвітіна 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., Tereszkiwicz 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

УДК 631.37

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

Сивулька П. Порівняльний аналіз методик агроєкологічної оцінки машинно-тракторних агрегатів в Україні та країнах ЄС

У статті наведено порівняльний аналіз підходів, методик та нормативних баз агроєкологічної 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 і деградації аграрних угідь зумовлюють актуальність розвитку вітчизняної школи та нормативної бази в аспекті гармонізації з ЄС. Зокрема щодо неоднозначності використання питомого тиску у контактні колеса з ґрунтом як єдиного нормативного показника агроєкологічної 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.

Опрацьовані пропозиції з гармонізації вітчизняної нормативної бази з практикою ЄС щодо оперативної оцінки характеристик ґрунту за допомогою прийняття відповідного стандарту ISO як ДСТУ та розвитку агроєкологічної оцінки МТА з врахуванням послідовності проходження коліс передньої і задньої осей, різних типорозмірів передніх і задніх шин, впливу навісних та причіпних знарядь.

Встановлено потребу подальшого розвитку та удосконалення методик дослідження та 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: агроєкологія, трактори, обробіток землі, ущільнення ґрунту, вміст вологи і повітря

Syvulka P. Comparative analysis of methods of agri-ecological assessment of machine-tractor units in Ukraine and EU countries

The article deals with the comparative analysis of approaches, methods and regulatory frameworks for the agri-ecological assessment of machine-tractor units (MTU) in Ukraine (Eastern School) and EU countries (Western School, using Germany as an example). Significant differences in the context of the growing distribution of heavy tractors of 3-6 classes and the urgency of the problem of compaction and degradation of agricultural land make it important to develop the national school and regulatory framework in terms of harmonization with the EU. In particular, the ambiguity of using the specific pressure of the wheel in contact with the soil as the only regulatory indicator for the agri-ecological assessment of MTU, the lack of a national regulatory framework for the rapid assessment of the physical and mechanical characteristics of specific soils (penetrometers - according to EU practice) and the consideration of front and rear axle wheels of different sizes and soil compaction by rear axle wheels when driving on a single track.

Suggestions for harmonizing the national regulatory framework with EU practice on the operational assessment of soil characteristics with adoption of the relevant ISO standard as DSTU are developed. Also suggestions as to development of the agri-ecological assessment of MTU taking into account the sequence of passage of the wheels of the front and rear axles, different sizes of front and rear tyres and the impact of mounted and trailed implements are developed.

The need for further development and improvement of methods for studying and evaluating the effect of soil compaction during the sequential passage of the wheels of the front and rear axles, the impact of mounted and trailed implements on the dynamics of load redistribution along the axles and the corresponding compaction, analytical assessment of the impact of wheels of different sizes on the front and rear axles and the frequency of passage has been revealed.

Keywords: agri-ecology, tractors, tillage, soil compaction, moisture and air content.

Постановка проблеми. Вплив МТА на фізико-механічні характеристики сільськогосподарських угідь є тільки одним з аспектів агроєкології загалом, що став однак особливо відчутним впродовж останніх 30-35 років з розвитком і масовим впровадженням значно потужніших і важчих МТА та інтенсифікацією процесів обро-

бітку ґрунту [1-2 та ін.]. Агроєкологічні дослідження 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 у методиках агроекологічної оцінки МТА у Східній (СРСР, 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, вкlastись у найбільш сприятливі і зменшити відповідний потенційний недобір врожаю. З іншого боку збільшення потужності і ваги МТА неминує збільшує тиск від коліс чи гусениць на землю, спричинює її ущільнення і, відповідно, теж спричинює недобір врожаю (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 у порівнянні з ще донедавнім в часи СРСР домінуванням класів 0,8 – 1,4т – МТЗ/ЛТЗ та гусеничних, з меншим питомим тиском на ґрунт – ДТ 75 / Т 74 класу 3). Тенденція росту потужностей і маси МТА в аграрному секторі є очевидною [6] і з певним запізненням щодо США та Західної Європи вона ставала реальністю ще у 1980-х рр. і в Україні/СРСР.

Загалом слід зазначити, що дослідження впливу ущільнення сільськогосподарських земель тракторами були розпочаті ще перед II світовою війною, фактично на початках масового розповсюдження МТА у аграрному секторі, однак основи сучасної методології цих досліджень в Західній Європі були закладені проф. В. Зьене (W. Soehne) уже на початку 1950-х років [7-9]. Зрештою і у колишньому СРСР у той же період розпочалися дослідження руху колісних та гусеничних машин бездоріжжям та ґрунтовими дорогами, а також будівництва автодоріг, у т.ч. і ґрунтових, що склали 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, були розгорнуті дослідження і щодо ущільнення сільськогосподарських угідь МТА [10], що базувались на

теоретичних засадах механіки ґрунтів, найбільш ґрунтовно опрацьованих в СРСР проф. Цитовичем А.М. [11].

Слід зауважити, однак, 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 СРСР, так і зрештою за кордоном, розвивались паралельно, в т.ч. очевидно в силу певної інформаційної закритості військової тематики та різних цільових пріоритетів.

В СРСР у 1980р. було створено координаційну раду при Всесоюзній академії сільськогосподарства (ВАСХНИЛ) по проблемі ущільнення технікою аграрних угідь і визначено головні наукові організації по цій проблемі. Особливо слід відзначити, що за результатами цих робіт у 1986 р. були опрацьовані та прийняті (в числі перших у міжнародній практиці) законодавчі нормативні акти – 3 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 даних ГОСТ було обмеження використання тракторів К 700, в меншій мірі і Т 150К, на цілому ряді операцій обробітку ґрунтів [3]. У 2006-8 рр. основні положення даних ГОСТ з певними доопрацюваннями були покладені і у основу відповідних національних стандартів України [12-14]. Однак оцінка відповідності даних нормативній базі, принаймні поки що, не входить у перелік обов'язкових при сертифікації/ допуску до експлуатації нових на ринку України вітчизняної та зарубіжної техніки. Разом з тим, як свідчать сучасні дослідження [15-16 і інш.], абсолютна більшість нових потужних колісних тракторів класів 3 і 5, (у т.ч. 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 вологом'єсткості 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 ґрунт

(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 3 стандарти ДСТУ ISO 10573, 11461, 16586 з різними методами і інструментарієм, однак практично не придатні для польових умов і оперативної оцінки на місці. Оперативним вирішенням проблеми виглядає 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 є неповною, більш деталізована щодо процедури оцінка щільності ґрунту у будівництві – ДСТУ Б В 2.1-21; 2007. Безперечно у цьому плані актуальним є нові, оперативні методи оцінки [18]. З щільністю взаємопов'язана інша механічна характеристика – твердість і впродовж останніх 2-х десятиліть в аграрній сфері зростаючого розповсюдження набувають пенетрометри (твердоміри), що оперативно, на місці, дозволяють визначити твердість ґрунту у кількісному вимірі за рахунок вбудованого електронного блоку з показом значення [19]. Слід зазначити, що практика використання пенетрометрів, ще чисто механічних, для оцінки твердості ґрунту, як опорної поверхні для військової автотехніки (ВАТ) відома ще з часів II світової війни і була впроваджена інженерним корпусом армії США і досі зберіглась з часів «ленд-лізу» у інженерних частинах ЗСУ [20, 21]. Звично, що це значно оперативніший метод у порівнянні з нормативним (за ДСТУ 5096 – твердоміром Ревякіна, відповідні прилади уже виробляються і в Україні. Відомі і перші наукові дослідження ґрунтів в Україні з використанням сучасного пенетрометра [22].

Детальні дослідження у сфері агрологічної 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 слід 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 прямиї 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, напр. [24]. Звично, що підходи і агроекологічна 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. Як приклад гостроти проблеми на рис. 2 представлено еволюція 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 двократне збільшення індексу інтенсивності навантаження на ґрунт (у тоннокілометрах на 1 гектар) при майже 4-кратному збільшенні повної маси типових зернозбиральних комбайнів та одночасному збільшенні ширини захвату жатки з 3 до 7,5 м. Збільшення розмірності шин на відповідних моделях (рис.1) однак не компенсує зростання тиску на ґрунт, що і обумовлює відповідно збільшення ущільнення та деградацію ґрунту.

Вплив останнього (відносно оптимальної щільності з умов агрономії) на зменшення урожайності, згідно даних [25], відносно оптимальної щільності 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%. У принципі подібні результати констатуються і у вітчизняних дослідженнях та публікаціях [2-3, 16 і ін.].

Ущільнення ґрунту має і довгострокові наслідки - так званих підорних шарів (підшови) 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 досліджен-

ня [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 є надзвичайно суттєвим (насамперед зміна площі контакту шини з опорною поверхнею) і ілюструється результатами дослідження [27], рис. 4 – при незмінному навантаженні на колесо 4 т (при тиску в шині 0,75 бар і 3,0 бар).

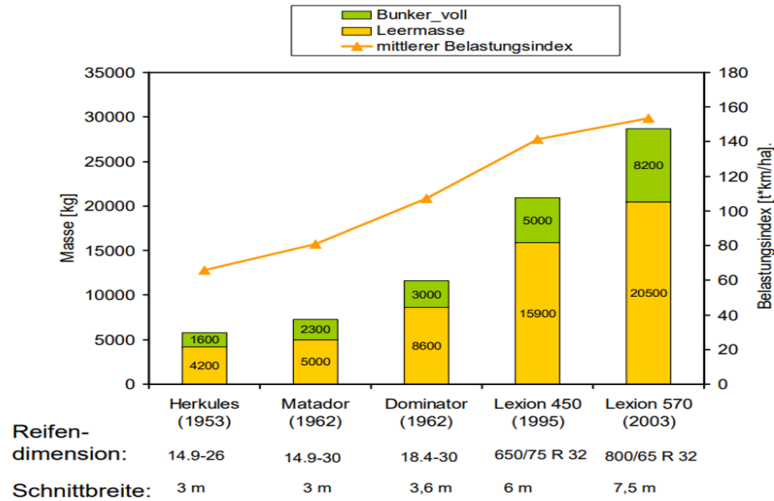


Рис. 1. Еволюція навантаження на ґрунт зернозбиральними комбайнами [25]. Тут: Індекс навантаження (т*км/га) – права ордината; розмірність шин – 14.9-26 – до 800/65R32; ширина захвату – від 3 до 7,5 м; маса комбайна – споряджена/жовта; маса завантаженого бункера з зерном – зелена (кг)

Fig. 1. Evolution of soil load by combine harvesters [25]. Here: 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)

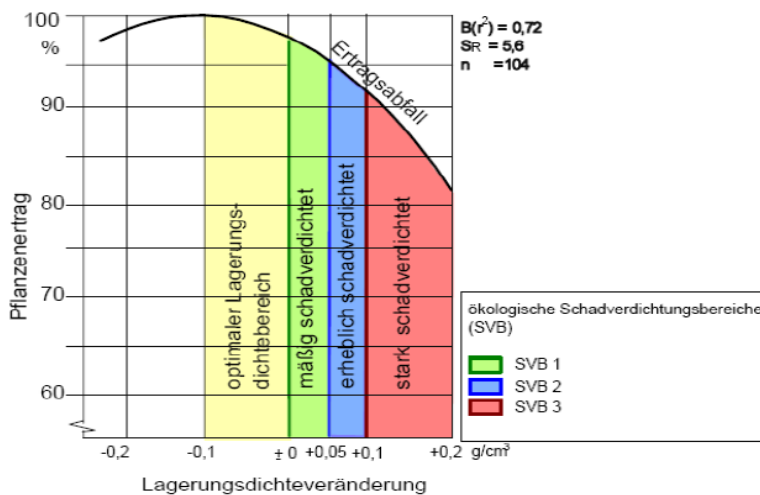


Рис. 2. Вплив ущільнення ґрунту на зменшення урожайності (згідно дослідження [25], де: по осі ординат – зміна врожайності, у %; по осі абсцис – зміна щільності ґрунту, у г/см³)

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/cm³)

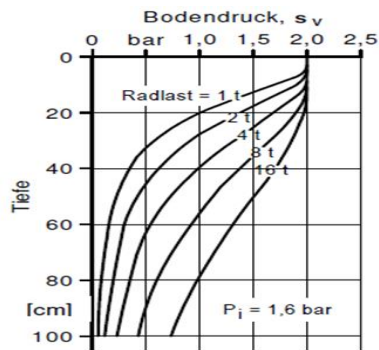


Рис. 3. Вплив навантаження на колесо на глибину ущільнення [26]

Fig. 3. Effect of wheel load on compaction depth [26]

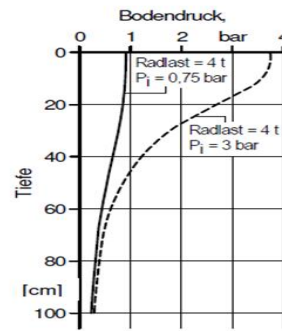


Рис. 4. Вплив тиску в шині на розподіл навантаження в ґрунті по глибині [27]

Fig. 4. Influence of tyre pressure on soil load distribution by depth [27]

Спільною рисою досліджень ущільнення сільськогосподарських ґрунтів, як в ЄС так і 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 і 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 зв. конусний індекс CI (cone index) [20, 21], на базі значення якого для конкретного бездоріжжя і визначається прохідність та потенційна мобільність руху ВАТ. Слід зазначити, що ця методологія (так зв. WES – методика Інженерного корпусу армії США) є значно простішою і ефективнішою у порівнянні з методикою, що була прийнята для ВАТ у СРСР та досі є нормативною у пострадянських державах з використанням модуля E , опору горизонтальному зсуву, коефіцієнту внутрішнього тертя і т.п. [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 і інш., у т. ч. з 2019 р. і у РФ, однак, на жаль поки що не в Україні.

WES – методика віднедавна почала успішно

використовуватись у лісо-господарській сфері в Європі, зокрема у Фінляндії [28, 29], Чехії [30] та згодом у розташованих неподалеку Фінляндії Петропавловському лісотехнічному університеті та Санкт-Петербурзькому технічному університеті [31]. Слід однак зауважити, що як у військовій, так і лісогосподарській 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 у діапазоні доволі низьких швидкостей, питання прохідності теж не є актуальними – акцент на зміну пористості ґрунту, зміні вмісту води і повітря внаслідок переущільнення в колії коліс. Разом з тим слід констатувати, що методи дослідження взаємодії шин/колес машин з ґрунтом у аграрній сфері менш розвинуті у порівнянні з військовими, а, віднедавна і з лісогосподарськими сферами. В Україні, як і в країнах СНД, фактично відсутня сучасна нормативно опрацьована методика оперативної оцінки фізико-механічних характеристик ґрунту аграрних угідь та відповідності ним технічних характеристик конкретних моделей МТА. Актуальність проблеми переущільнення аграрних земель сучасними МТА тим не менше, як підтверджують результати сучасних нещодавніх досліджень в Україні тільки підсилюється [15-16, 32 та ін.]. Детальне дослідження можливостей зменшення питомого тиску у контакті шин з опорною поверхнею, що проведено нещодавно д.т.н. Ребровим О. Ю., засвідчує можливості відчутного розширення ареалу угідь з умов агроєкології і нормативних обмежень, однак загалом не знімає проблему переущільнення земель для існуючого парку МТА класів 3-5 т [15]. Результати дослідження засвідчили, що тільки 10% з типажу тракторів цього класу відповідають вимогам агроєкології на 60% території України, 75% типажу – тільки на 25%

території, а весь існуючий типаж 15 основних виробників у ЄС та США (понад 600 моделей і модифікацій) – тільки на 3% території [32]. З проведеного аналізу можливостей використання систем централізованого регулювання тиску у шинах – зміна площі контакту з опорною поверхнею (ОП) (типу Fendt VarioGrip чи Mitas AitCell [34]), а також систем регулювання розподілу зчпної 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 агроекологічних вимог [12] щодо допустимого максимального тиску МТА на ґрунт [33].

Звісно, що 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

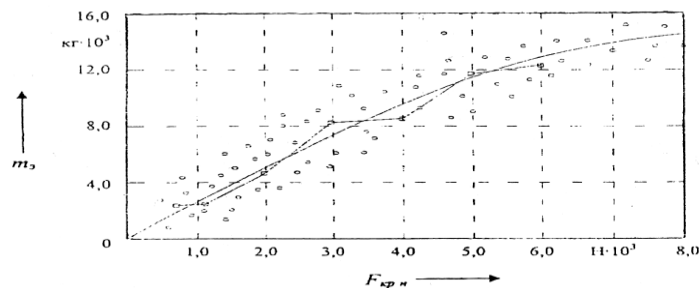


Рис. 5. Узагальнена залежність експлуатаційної маси колісних тракторів (m) від класу тяги (F) [34]
Fig. 5. Generalised dependence of the operating weight of wheeled tractors (m) on the traction class (F) [34]

Західноєвропейська та північно-американська школи агроекології МТА з проведеного огляду і аналізу відрізняються від вітчизняної/СНД насамперед через:

- відсутність однозначного домінування тиску в контактї 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 дозволяє дати 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 так зв. підорного шару ґрунту – незворотного ущільнення нижче

конструктивного синтезу, компоновання трактора тягового класу 3т з умов власне агроекології 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 (з звичних 1,4 т колісних МТЗ, ПМЗ до 3,0 т – ХТЗ Т150К і т.п.) 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.

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 з-за додаткового опору руху в результаті взаємодії робочих органів обладнання з ґрунтом; Відсутність акценту на питомий тиск у контактї шини з ґрунтом, як це зроблено з часів СРСР і в Україні [12-14], обумовлено фактом різних глибин та периметру ущільнень ґрунту при однаковому значенню тиску у контактї 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 і інш.]. Порогові значення щільності/пористості ґрунту (у т.ч. об'ємний вміст повітря, вологи) були визначені ще у 1970-початку 1980-х рр.. – дослідження W. Czeratzki [37] та H. Petelkau [37]. Відповідні значення

вологості різних видів ґрунту з умов агро-технологій 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.

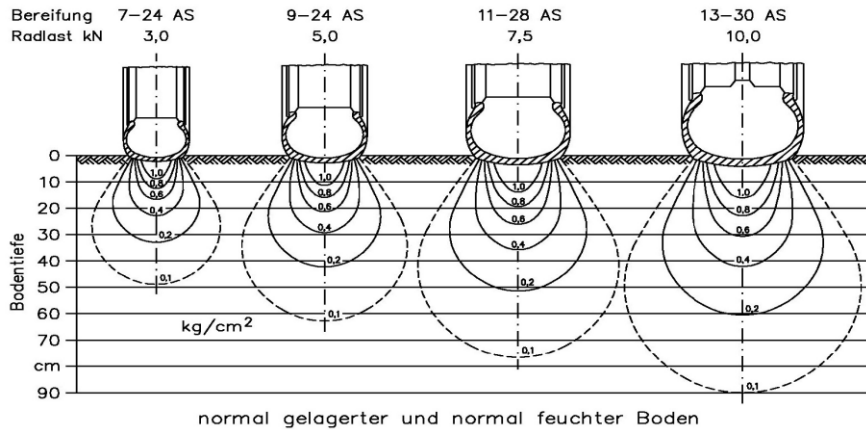


Рис. 6. Залежність навантаження на ґрунт (kg/cm^2) при однаковому тиску у контакт з ОП від розмірності шин (7-24S...13-30S) та відповідного навантаження на шину (3,0...10,0 kN) згідно [17]. (Bodentiefe – глибина ґрунту)

Fig. 6. Dependence of the soil load (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)

Висновки

Очевидна необхідність гармонізації агро-екологічної оцінки МТА з практикою країн ЄС, що дає більш повну 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 ґрунто-кліматичних зон, так як агро-екологічна оцінка МТА тільки по значеннях питомого тиску на ґрунт є далеко неповною. Потребують розвитку і методи дослідження та оцінки в аспекті врахування різного ефекту ущільнення ґрунту при послідовному проходженні коліс передньої і 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.

Бібліографічний список

1. Куценко О.М., Писаренко В.М. Агро-екологія. Київ: Урожай, 1995. 254 с.
2. Медведєв В.В. Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-

тракторних агрегатів. *Вісник аграрної науки*, № 10, 2012. 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., Лясков 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*, H. 1 (1).1951. p.p. 87-94.

8. Soehne W. Die Verformbarkeit des Ackerbodens. *Grundlagen der Landtechnik*, H.2 (3). 1952. P. 51-59

9. Soehne W. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik*, H.2 (5).1953. p.p. 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. 10с.
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 «ХП»*. Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях», № 27, 2018. Харків: НТУ «ХП». С. 110-116.
16. Білецький В.Р. Переуцільнення ґрунту рушіями мобільної сільськогосподарської техніки. Житомир: ДААУ, 2000. 43 с.
17. EOSDA Crop Monitoring [Електронний ресурс] Режим доступу: [https:// eos.com /uk/blog/volohist-gruntu](https://eos.com/uk/blog/volohist-gruntu)
18. LFG – малагабаритний вимірювач щільності ґрунту – HLR [Електронний ресурс] Режим доступу: [https:// industry.hlr.ua / bulding-materials-testing/ control-rfzestva-story-place/lfg](https://industry.hlr.ua/building-materials-testing/control-rfzestva-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 переуцільнення ґрунтів у господарствах західної частини лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. Вип.. 27, 2017, Подільський ДАТУ. 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* 129/ 9. 2004. p.p. 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*. 47, 2003. pp.161-174.
26. Tijink F.G.J., van der Linden J.P. Engineering approaches to prevent subsoil compaction in cropping systems with sugar beet / *Advances in Geocology*, 32. 2000. – 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. p.p. 29-37.
29. Saarlahti M. Soil interaction model. *Univercity of Helsinki, Departament of forest resource management*, Np.QLK5-1999-00991. 2002. 86 p.
30. Marusiak M., Neruda J. Dynamic soil pressures Caused by travelling forest machines. *Croat. Journal Forest. Engineering* 39, 2018. p.p. 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*, № 3, 2. 2016. 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 «ХП»*. Серія *Автомобіле- та тракторобудування*, № 1, 2022. 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 «ХП», 2021. 423 с.
34. Зезетко Н.И. Эксплуатационная и конструктивная массы проектируемого колесного трактора 4К4. *Вестник Белорусско-Российского университета* № 2 (43), 2014. 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* 22 (1), 1972. pp. 29-36.
37. Petelkau H., Seidel H. Rompreebiltaet von Bodenproben unterschiedlicher Substrate bei stufenweiser uniaxialer Belastung in

Abhaengigkeit vom Wassergehalt. *Bodenkunde* 26
(6), 1982. p.p. 389-393.
38. Sommer C. Bodenschonende und
Bodenschuetzende Pflanzenproduktion – dargestellt

an Beispielen der Bodenbearbeitung. *Landtechnik* 41,
Heft 9.1986. p.p. 236-243.

Стаття надійшла: 20.05.24.

УДК 631.3-331.45

ОЦІНКА ПРОФЕСІЙНОГО РИЗИКУ ПРАЦІВНИКІВ ПІД ЧАС ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

*Василь Тимочко¹, к. т. н., Іван Городецький¹, к. т. н., Олексій Бурнаєв¹, к.ф.-м.н., Ігор Мазур¹
к.с.-г.н., Тетяна Кохана¹, к.е.н., Володимир Войналович², к. т. н., Олена Вісин³, к. і. н.*

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

*²Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна,
e-mail: voynalovich@nubip.edu.ua*

*³Луцький національний технічний університет,
вул. Львівська, 75, м. Луцьк, Україна,
e-mail: lena_visyn@ukr.net*

Тимочко В., Городецький І., Бурнаєв О., Кохана Т., Мазур І., 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). Електроtraumatизм здебільшого виникає під час експлуатації зовнішніх електроустановок (53%), зокрема трансформаторних підстанцій, повітряних ліній електропостачання, конденсаторних та перетворювальних пристроїв. Найбільш травмонебезпечними професіями на підприємствах електроенергетики є електрослюсар з ремонту електрообладнання та електрик. Тому використання методів ідентифікації ризиків та небезпечних чинників під час експлуатації електричного обладнання є серед актуальних завдань 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 електрика 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 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.

Ключові слова: безпека праці, електричне обладнання, ідентифікація ризиків, небезпечний чинник.

Tymochko V., Horodetskyi I., Kokhana T., Voynalovich V., Visyn O., Burnaev O., Mazur I. Assessment of occupational risk of workers during maintenance and repair of electrical equipment.

At the facilities of electric power enterprises, the largest share of accidents with fatal consequences is electrocution (55% of the total number of killing by electric shock). Electrical injuries mostly occur during the operation of external electrical installations (53%), in particular, transformer substations, overhead power lines, capacitor and converter devices. The most trauma-hazardous professions at electric power enterprises are electrical fitter of electrical equipment repairing and electrical fitter. Therefore, the use of methods of identifying risks and dangerous factors during the operation of electrical equipment is among the urgent tasks of preventing industrial injuries. The risk of dangerous situations can be assessed as a combination of the severity of the consequences and the probability of the occurrence of a dangerous situation during production activities. Professional risks and main types of threats in the processes of repair and maintenance of electrical equipment are substantiated. It was revealed that the degree of the basic risk of dangerous situations of electrocution of an employee, which is caused by deficiencies in the electrician's work permit or his violation of safety requirements, as well as deficiencies in the organization of work on repair and maintenance of electrical equipment, is 48 points each, which corresponds to the average level - the risk cannot be acceptable without the introduction of protective measures. The degree of basic risk due to deficiencies in the provision of tools, protective clothing and other means of personal protection, as well as their malfunctions, is 54 points, which corresponds to a high risk. Based on the results of the risk assessment during the operation of the electrical equipment, the adequacy of the planned safety measures, the need for their improvement or the introduction of other safety measures are determined. To reduce the probability of the occurrence

of traumatic situations and related losses, appropriate safety measures are planned - from those aimed at the complete elimination of hazards at the workplace and to those that require the use of personal protective equipment.

Key words: 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 в основному 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 є низький рівень виконавчої і 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 не допущення 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 роботах [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 електропостачання, 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 удосконалення 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 уможливорює розробку заходів 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. Ними запропоновано характеристики та значення ймовірностей, результатів, наслідків подій, експертних оцінок та рівні ризиків.

На підставі оцінки рівня ризику обґрунтовують профілактичні заходи, які уможливають мінімізацію загроз травмування працівників. Зап

ропонована 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 ймовірність завдання шкоди та методи, як цьому запобігти.

Ризики та небезпечні чинники на робочих місцях визначають працівники, які організують виконання роботи на конкретному робочому місці. Ідентифікація ризиків на робочому місці та обґрунтування методів керування ними, має вирішальне значення для створення умов безпечної роботи, що уможлиблює 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. Рятувальникам 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 та небезпечних чинників на робочих місцях та обґрунтування методів керування ними, має вирішальне значення для створення умов безпечної роботи, що уможлиблює 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 є актуальним завданням 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. Шкідливі та небезпечні виробничі чинники в результаті тривалого або короткочасного впливу на працівника призводять до зниження працездатності, погіршення стану його 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 їх 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 з визначення величини ризиків, їх можливих наслідків і ймовірностей виникнення, прийняття рішень щодо прийнятності чи неприйнятності цих ризиків.

Критерієм вибору методу оцінювання ризиків є їх 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 величину ризику та визначають неприйнятні роботи. Таку інформацію використовують під час визначення 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 електромонтери з ремонту та обслуговування електрообладнання (РОЕ). До функціональних обов'язків електромонтера з РОЕ належить обслуговування силових електричних і освітлювальних установок, перевірка, розбирання і складання схем керування електроустаткуванням, підключення до електросистеми нового обладнання, його перевірка, періодичний нагляд за його роботою.

Для оцінки безпечності роботи електромонтера 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 електромонтера або порушенням ним вимог безпеки; 2) недоліками забезпечення електромонтера 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 методику, 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 з 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 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 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 проектувати 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.1).

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 електричні 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.

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, пускатів магнітних)				
Електрик перед початком роботи не перевіряє справність ручного інструменту (держаків кусачок і плоскогубців, робочої частини викрутки, стан гайкових ключів тощо), застосовує труби у якості продовжувачів ключів				
Електрик не відрегулював місцеве освітлення для відповідного освітлення робочої зони				
Електрик не відключив 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 are 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 ізольованими 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 включати – робота на лінії", "Не включати – працюють люди", "Не відкривати – працюють люди"				

Таблиця 3. Небезпечні чинники зумовлені недоліками організації робіт з ремонту та обслуговування електрообладнання

Table 3. Dangerous factors are 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				

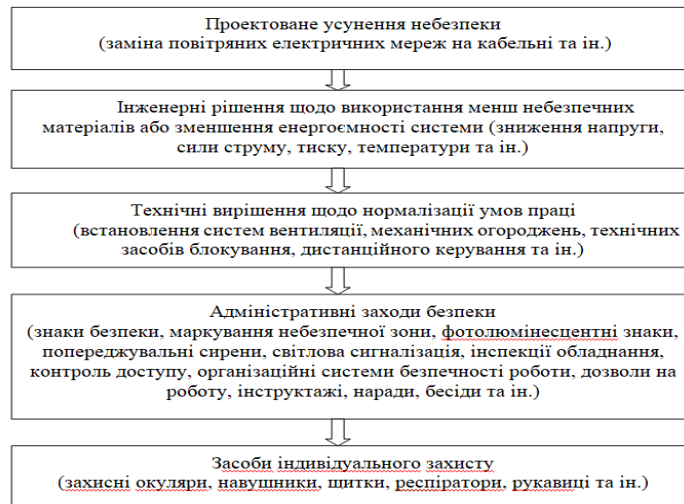


Рис.1. Черговість вибору заходів безпеки операцій експлуатації електричного обладнання

Fig. 1. The sequence of selection of safety measures for electrical equipment operation

Якщо небезпеки експлуатації електричного обладнання на робочому місці повністю 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 окремий 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 травмонебезпечними професіями на підприємствах електроенергетики були електрослюсар з ремонту електрообладнання та електромонтер. Для зниження виробничих ризиків та не допущення 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 умов 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., Вишневецький, 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/agroengineering2019.2.3.131>.

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. (2023). Аналіз стану виробничого травматизму, як передумова управління процесами формування небезпечних подій. *Вісник Львівського національного університету природо користування. Серія Агроінженерні дослідження*. 2023. № 27. С. 127–137.

DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.2.7.127>.

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-pidpryemstvakh-palyvno-enerhetychno-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. 5(65). P.1655-1661.

15. Bujna, M., Prístavka, M., Lee, C. K., Borusiewicz, A., Samociuk, W., Beloev, I., Malaga-Toboła, U., 2023. Reducing the Probability of Failure in Manufacturing Equipment by Quantitative FTA Analysis, *Agricultural Engineering*, vol.27, no.1, 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. 2(64). P. 449-453.

20. Tymochko, V.O., Horodetskyi, I.M., Berezovetskyi, A.P., Voynalovich, O.V., Visyn, O.O. Analysis of safety regulations for mechanized spraying of agricultural crops. *Machinery and Energetics*, 2021, 12(2), pp.23-31.

21. Žitňák, M., Lendelová, J., Pivarčiová, Z., ...Kielbasa, P., Dostál, P. Possibilities of Noise Load Elimination in Production. *Acta Technologica Agriculturae*. 2023, 26(1), pp. 42–48.

22. Žitňák, M., Korenko, M., Shchur, T., ...Kazán, L., Mazur, M. Risk Management in Manufacturing Practice Using the Point Method. *System Safety: Human - Technical Facility - Environment*, 2023, 5(1), pp. 318–331.

Стаття надійшла: 12.07.2024.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

Агроінженерія

№ 28

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 60×84¹/₈.
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.