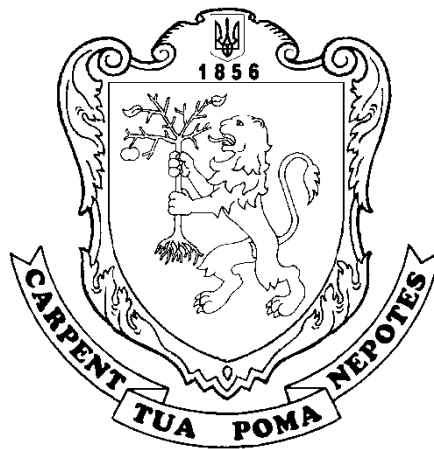


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ВІСНИК

ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Агроінженерні дослідження
№ 27



Львів 2023

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 № 5 від 28.12.2023 р.)*

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

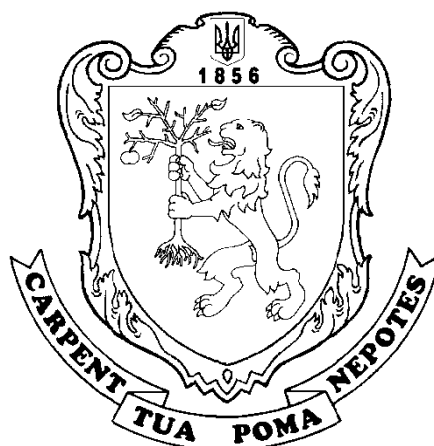
Ковалишин Степан, к. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування (головний редактор);
Власовець Віталій, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування (заступник головного редактора);
Бабич Михайло, к. т. н., доцент, Львівський національний університет природокористування (відповідальний секретар);
Алексюк-Гаврон Йоанна, доктор наук, Варшавський університет наук про життя (Польща);
Белоєв Іван, доктор наук, Русенський університет імені Ангела Канчева (Болгарія);
Братішко Вячеслав, д. т. н., професор, [Національний університет біоресурсів і природокористування України](#);
Валовський Гжегож, доктор наук, Інститут технологій і наук про життя (Польща);
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;
Конечний Річард, доктор наук, професор, Академія імені Якуба з Парадижу (Польща);
Крушельніцка 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 національний університет природокористування;
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 Нові-Сад (Сербія);
Фіндура Павол, доктор наук, професор, Словацький університет сільськогосподарства в Нітрі (Словаччина);
Харченко Сергій, д. т. н., професор, Державний біотехнологічний університет;
Чабан Андрій, д. т. н., професор, Львівський національний університет природокористування;
Чубик Роман, к. т. н., доцент, Національний університет «Львівська політехніка»;
Швець Олексій, к. т. н., 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 research
№ 27



Lviv 2023

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. 5 dated 28.12.2023)*

EDITORIAL BOARD:

Kovalyshyn Stepan, Candidate of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (editor-in-chief);
Vlasovets Vitaliy, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (deputy editor);
Babych Mykhailo, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine (executive secretary);
Aleksiejuk-Gawron Joanna, PhD, Warsaw University of Life Sciences, Poland;
Beloev Ivan, PhD, Angel Kanchev University of Ruse, Bulgaria;
Bratishko Viacheslav, Doctor of Technical Sciences, professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine;
Walowski Grzegorz, PhD, Institute of Technology and Life Sciences, Poland;
Hnatov Andrii, Doctor of Technical Sciences, professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine;
Golimowski Wojciech, PhD, professor, Wroclaw University of Economics and Business, Poland;
Horbai Orest, Doctor of Technical Sciences, associate professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine;
Horodetskyi Ivan, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Humeniuk Ruslan, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Faruk Güner, PhD, professor, Giresun University, Turkey;
Danchenko Olena, Doctor of Technical Sciences, professor, Cherkasy State Technological University, Ukraine;
Zubko Vladyslav, Doctor of Technical Sciences, associate professor, Sumy National Agrarian University, Ukraine;
Kangalov Plamen, PhD, professor, Angel Kanchev University of Ruse, Bulgaria;
Kielbasa Pawel, PhD, professor, University of Agriculture in Krakow, Poland;
Kernytskyi Ivan, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Konieczny Ryszard, PhD, professor, Jacob of Paradies University, Poland;
Kruszelnicka Weronika, PhD, Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland;
Levoniuk Vitaliy, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Lub Pavlo, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Lula Pawel, PhD, professor, Cracow University of Economics, Poland;
Liashuk Oleh, Doctor of Technical Sciences, professor, Ternopil Ivan Pului National Technical University, Ukraine;
Miroshnyk Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, professor, State Biotechnological University, Ukraine;
Medykovskiy Mykola, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine;
Olishevych Myroslav, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
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;
Syrotiuk Serhii, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Sukach Oleh, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Tkachuk Rostyslav, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv State University of Life Safety, Ukraine;
Tomporowski Andrzej, Doctor of Technical Sciences, professor, Bydgoszcz University of Science and Technology, Poland;
Tryhuba Anatolii, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Turan Jan, PhD, professor, University of Novi Sad, Serbia;
Findura Pavol, PhD, professor, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovak Republic;
Kharchenko Serhii, Doctor of Technical Sciences, professor, State Biotechnological University, Ukraine;
Chaban Andrii, Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Chubyk Roman, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Lviv National Environmental University, Ukraine;
Shvets Oleksii, Candidate of Technical Sciences, Lviv National Environmental University, Ukraine.

ЗМІСТ

Розділ 1 МАШИНИ ТА РОБОЧІ ПРОЦЕСИ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

<i>Коруняк П., Швець О.</i> Функціонування технологічного вібраційного обладнання в електростатичному полі.....	9
<i>Худавердян Г.</i> Формування технологічного обладнання тягово-транспортної машини категорії Т1/Н1 в АПК.....	18

Розділ 2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

<i>Хома В.</i> Ефективність роздільного регулювання тиску в шинах з умов прохідності та мобільності руху бездоріжжям.....	22
<i>Крайник Л., Кіхтан А., Габрієль Ю., Ужва А.В.</i> Методичні засади визначення базових параметрів гібридного приводу автомобіля високої прохідності.....	27
<i>Сукач О., Габрієль Ю., Шевчук В., Хімка С., Магац М., Домінік А.</i> Обґрунтування способу керування маніпуляторними установками вантажних автомобілів	35

Розділ 3 ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

<i>Тригуба А., Савка А., Татомір А., Падюка Р., Боярчук О.</i> Аналіз сучасних датчиків та обґрунтування доцільності автоматизованого моніторингу споживання корму свинями у фермерських господарствах.....	43
---	----

Розділ 4 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

<i>Левонюк В.</i> Аналіз перехідних процесів у лінії електропередачі з грозозахисними тросами під час керованої комутації.....	51
<i>Гречин Д., Дробот І.</i> Дослідження відхилень напруги у мережі електропостачання підприємства при експлуатації електрообладнання.....	61

Розділ 5 НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МАШИН

<i>Пилипака С., Воліна Т., Кресан Т., Захарова І., Семерак В.М.</i> Пружне згинання смуги під дією прикладених сил	70
<i>Колеснікова Т., Лиходій О., Ракаєв О., Махоркіна Т.</i> Дослідження впливу механізму зміни ступеня стиску на швидкість зниження ступеня стиску залежно від режиму роботи двигуна.....	76
<i>Бубняк Т., Семерак В., Пономаренко О., Богач М., Воліна Т.</i> Про напруження в композитах при нагріванні.....	84
<i>Кохан В.</i> Методологічний підхід до вибору військової автомобільної техніки.....	89
<i>Манзяк М., Хома В., Грубель М., Крайник Л., Сало Я.</i> Оцінка ефективності підвіски повнопривідного автомобіля для бездоріжжя	96

Розділ 6 МОДЕЛЮВАННЯ МАШИН, ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

<i>Котов Б., Калініченко Р., Степаненко С., Панцир Ю.</i> Математичне моделювання процесу охолодження зерна в установках з радіальною подачею повітря.....	101
<i>Баранович С., Стукалець І., Шеремета Р., Коробка С., Бабич М.</i> Методики дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах різного перерізу.....	108

Розділ 7
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ. УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ
ТА ПРОГРАМАМИ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

Тригуба А., Маланчук О., Ратушний А., Паньків О., Коваль Л., Шолудько Р., Андрушків О.
Адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами розвитку громад та регіонів.....113

Розділ 8
ІНЖЕНЕРІЯ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ ТА БЕЗПЕКИ
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Городецький І., Тимочко В., Магац М., Мазур І., Березовецький А., Мазурак М.В. Аналіз стану
виробничого травматизму як передумова управління процесами формування небезпечних подій.....127

CONTENT

Chapter 1 MACHINES AND OPERATION PROCESSES OF AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION

<i>Koruniak P., Shvets O.</i> Operation of the technological equipment of vibration type in an electrostatic field.....	9
<i>Khudaverdian H.</i> Formation of the technological equipment of the T1/N1 traction transport machine in the agricultural industry.....	18

Chapter 2 TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EFFICIENT MACHINE USE IN AGROENGINEERING

<i>Khoma V.</i> Efficiency of differential pressure regulation in tires under conditions of off-road passability and mobility.....	22
<i>Krainyk L., Kikhtan A., Habriiel Yu., Uzhva A.</i> Methodology of determining the basic parameters of all-terrain hybrid vehicles.....	27
<i>Sukach O., Habriiel Yu., Shevchuk V., Khimka S., Mahats M., Dominik A.</i> Justification of the method of controlling the manipulator installations of trucks.....	35

Chapter 3 POWER ENGINEERING OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

<i>Tryhuba A., Savka A., Tatomyr A., Padiuka R., Boiarchuk O.</i> Analysis of modern sensors and the feasibility of automated monitoring of feed consumption by pigs on farms...43

Chapter 4 ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS IN AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION

<i>Levoniuk V.</i> Analysis of transient processes in a power transmission line with lightning protection cables during controlled switching.....	51
<i>Hrechyn D., Drobot I.</i> Investigating voltage deviations in the enterprise's power supply network during the electrical equipment operation.....	61

Chapter 5 RELIABILITY AND TECHNICAL SERVICE OF MACHINES

<i>Pylypaka S., Volina T., Kresan T., Zakharova I., Semerak V.</i> Elastic bending of a strip under the action of applied forces.....	70
<i>Kolesnikova T., Lykhodii O., Rakaiev O., Makhorkina T.</i> Investigation of the influence of the mechanism of changing the compression ratio on the rate of reduction of the compression ratio depending on the engine operating mode.....	76
<i>Bubniak T., Semerak V., Ponomarenko O., Bohach M., Volina T.</i> On tension in composites under heating.....	84
<i>Kokhan V.</i> Methodological approach to choosing military vehicles.....	89
<i>Manziak M., Khoma V., Hrubel M., Krainyk L., Salo Ya.</i> Evaluation of the off-road suspension efficiency for all-wheel-drive vehicles.....	96

Chapter 6
MACHINES, PROCESSES AND SYSTEMS SIMULATION
IN AGROENGINEERING

Kotov B., Kalinichenko R., Stepanenko S., Pantzyr Yu. Mathematical modeling of grain cooling in bunker systems with radial air distribution.....101
Baranovych S., Stukalets I., Sheremeta R., Korobka S., Babych M. Methods of researching hydro-gas-dynamic processes in closed bypass channels of different cross-sections.....108

Chapter 7
INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS.
PROJECT MANAGEMENT IN AGROENGINEERING

Tryhuba A., Malanchuk O., Ratushnyi A., Pankiv O., Koval L., Sholudko R., Andrushkiv O.
Adaptive value approach to managing the projects of community and regional development.....113

Chapter 8
ENVIRONMENTAL ENGINEERING
AND AGRO-INDUSTRIAL PRODUCTION SAFETY

Horodetskyi I., Tymochko V., Mahats M., Mazur I., Berezovetskyi A., Mazurak M. Analysis of the state of occupational injury as a prerequisite for managing the processes of dangerous events formation.....127

УДК 631.362.3

**ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ
В ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОМУ ПОЛІ**

Петро Коруняк, к. т. н., Олексій Швець, к. т. н.

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

Коруняк П., Швець О. Функціонування технологічного вібраційного обладнання в електростатичному полі

Підвищення ефективності виробництва, збільшення випуску продукції і поліпшення її якості за одночасного зниження трудових затрат, удосконалення форм організації та управління виробництвом є основою розвитку машинобудування. Це забезпечується вдосконаленням існуючих і впровадженням нових видів устаткування, технологічних процесів і засобів їх механізації та автоматизації, створенням нових технологічних комплексів, де всі ці питання взаємопов'язані і комплексно вирішуються.

Транспортувальні засоби забезпечують безперервність, ритм роботи всіх структурних одиниць потокового виробництва – від складських операцій, подачі технологічного об'єкта, робочого процесу оброблення до виходу готової продукції. Найбільш трудомісткими з погляду автоматизації вважаються ті технологічні операції, які пов'язані з необхідним орієнтуванням виробів.

Найбільш розповсюдженим і ефективним засобом орієнтування технологічних об'єктів є вібраційні живильники з електромагнітним приводом. У цих пристроях процес орієнтування об'єкта (виробу) здійснюється під час вібраційного переміщення як на доріжці чаші, так і на будь-якій ділянці його руху до робочої позиції. Зручність управління і досконалість конструкції цього типу обладнання забезпечили йому провідне місце в автоматизованому виробництві.

Крім засобів автоматизації, вібраційна техніка набула широкого застосування в різноманітних технологічних процесах, зокрема під час сепарування. Орієнтування компонентів суміші відносно отворів решета значно підвищує ефективність просіювання. Одним зі способів реалізації такої задачі є поєднання вібраційних процесів з електричними властивостями компонентів суміші в електричному полі високої напруги. Безвідривний режим вібраційного транспортування робочої суміші і необхідна напруженість електричного поля поліпшують умови робочого процесу вібраційного сепарування.

За результатами досліджень встановлено, що забезпеченням відповідних параметрів роботи технологічного обладнання можна значно інтенсифікувати процес просіювання компонентів суміші через отвори решета і тим самим зменшити його робочу площу.

Поєднання розглянутих ефектів можна використати не лише під час міжопераційного транспортування виробів, а й у роботі пристроїв для їх групового касетування і вкладання, магазинів-накопичувачів для автоматичного орієнтування та позиціонування для захоплювальних пристроїв маніпуляторів і промислових роботів, автоматичних пристроїв завантаження технологічного обладнання. Важливим є те, що зазначені пристрої набули широкого застосування у виробничих процесах, пов'язаних з виробами, які мають незначні масово-геометричні параметри.

Ключові слова: автоматизація, вібрація, транспортування, коливання, орієнтування, насіння, сепарування, електричне поле.

Koruniak P., Shvets O. Operation of the technological equipment of vibration type in an electrostatic field

Increase of production efficiency and production output, improvement of its quality while reducing labor costs, upgrade of the forms of organization and production management are the basic elements of mechanical engineering development. This is ensured by the improvement of the existing and introduction of new types of equipment, technological processes and means of their mechanization and automation, creation of new technological complexes where all these issues are interconnected and comprehensively solved.

Means of transportation ensure the continuity and rhythm of work of all structural units of flow production, starting from warehouse operations, supply of a technological object, and the work process of processing to the output of finished products. In terms of automation, the most time-consuming technological operations are those that are associated with the necessary orientation of products.

The most common and effective means of technological object orienting are vibration feeders with an electromagnetic drive. In these devices, the process of orientation of the object (product) is carried out with vibrational movement both on the path of the bowl and on any part of its movement to the working position. The ease of operation and the perfect design of this type of equipment have provided it with a leading place in automated production.

In addition to automation, vibration technology has been widely used in various technological processes, in particular during separation. The orientation of the mixture components referring to the sieve openings significantly increases the screening efficiency. One of the ways to implement this task is to combine vibration processes with the electrical properties of the mixture components in a high-voltage electric field. Continuous mode of vibration transportation of the working mixture and the required electric field strength improve the conditions for the working process of vibration separation.

According to the results of the research, it is found that ensuring the appropriate operating parameters of the technological equipment can significantly intensify the process of sifting the mixture components through the sieve openings and thereby reduce its working area.

Combining the considered effects can be applied not only during the interoperational transportation of products but also in the operation of devices for their group cassette and stacking, storage magazines for automatic orientation and positioning for gripping devices of manipulators and industrial robots, and automatic loading devices for technological equipment. These devices must be widely used in production processes associated with products with small mass-geometric parameters.

Key words: automation, vibration, transportation, oscillation, orientation, seeds, separation, electric field.

Постановка проблеми. Автоматизація виробничих процесів – це комплекс заходів із розробки нових прогресивних технологій та проектування на їх основі високопродуктивного технологічного обладнання. Завдяки йому в певному алгоритмі здійснюються робочі та допоміжні операції без участі людини. Це дозволяє не лише зменшити допоміжний час, а й підвищити коефіцієнт використання і продуктивність обладнання, покращити умови праці, зменшити собівартість продукції.

З усієї сукупності технологічних операцій найбільш трудомісткими з погляду автоматизації вважаються ті, які пов'язані з необхідним орієнтуванням виробів під час оброблення, складання, контролю, пакування тощо. У загальному випадку технологічний процес можна представити як взаємодію технологічного об'єкта (виробів) із знаряддями праці (інструментом), що знаходяться у довільному положенні виробничого простору. Тому важливою складовою як комплексної механізації, так і автоматизації виробництва в цілому є процеси просторового маніпулювання такими об'єктами [5; 6].

Під час проектування засобів автоматизації на вибір способів і конструктивних рішень великий вплив мають конфігурація, розміри, маса та інші властивості цих об'єктів (заготовок деталей, виробів, частинок середовища), які піддаються тим чи іншим технологічним операціям [6; 16].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На виробництві за умови перебування технологічного об'єкта в ємності навалом (насіпом) для забезпечення автоматичної подачі часто виникає необхідність його урухомлення та надання йому напрямленого переміщення. Існує широкий спектр способів і засобів автоматичного маніпулювання виробами. З погляду силової взаємодії під час переміщення, орієнтування, суміщення і фіксування вони поділяються на механічні, вібраційні, пневматичні, магнітні та електричні. Такі пристрої оснащуються власним приводом або ж приводяться в дію від

обслуговуваного обладнання.

Деталі, заготовки, вироби (або довільні компоненти-складові) повинні певним чином транспортуватися, відбиратися (вийматися) і відповідно орієнтуватися та позиціонуватися для виконання наступних технологічних операцій. Як правило, їх подачу можна здійснювати за допомогою бункерних завантажувальних пристроїв, конструкції яких можуть містити бункер (ємність), механізми захоплення та орієнтування, накопичувач, відсікач, живильник, привід тощо. Характерним для їх роботи є те, що матеріал перебуває в інтенсивному і постійному переміщенні (зрушується, урухомлюється).

На думку багатьох вчених та інженерів, універсальними для подачі об'єктів оброблення є вібраційні бункерні живильники (ВБЖ). Відомий цілий ряд конструкцій, серед яких найефективнішими і найрозповсюдженішими є віброживильники з електромагнітним віброприводом. Визначальною особливістю цих пристроїв є те, що переміщення виробів у них здійснюється не в результаті сумісного руху з робочим органом, а внаслідок вібрації останнього. Ця обставина зумовлює низку важливих технологічних та експлуатаційних переваг вібраційного способу транспортування. Під дією вібрації вироби чи компоненти суміші одержують напрямлене переміщення поверхнею робочого органа (прямолінійного лотка) до наступної позиції технологічного процесу [5–7; 14].

Зручне поєднання зі системою керування автоматизованого обладнання, достатньо просте регулювання швидкості, програмування її зміни та напрями руху, безінерційність механічної системи (тобто можливість практично миттєвої зупинки і початку руху), відсутність поверхонь тертя, простота обслуговування та експлуатації, безпека експлуатації, висока енергоощадність, можливість завантаження і розвантаження в довільній точці транспортування – це далеко не повний перелік важливих технологічних і експлуатаційних переваг використання вібраційних засобів переміщення.

У віброживильниках процес орієнтування об'єкта (виробу) здійснюється під час вібропереміщення як на доріжці чаші, так і на будь-якій ділянці його руху до робочої позиції. важливих технологічних і експлуатаційних переваг використання вібраційних засобів переміщення.

Оскільки абсолютно тверде вільне тіло має шість степенів вільності, то під час цього процесу воно втрачає п'ять степенів вільності і залишається лише один. Як правило, виріб може містити в собі як одну, так і декілька ознак орієнтування, які залежать від зовнішньої та внутрішньої форми (конфігурації), ознак симетричності, положення центру ваги, фізичних властивостей виробу, властивостей транспортувальної поверхні. Враховуючи всі ці ознаки і поетапно їх реалізувавши, об'єкт набуває необхідного положення.

Вібраційна техніка знайшла своє місце в різних галузях автоматизованого виробництва для виконання основних та допоміжних операцій у різноманітних технологічних процесах. Її використовують не лише як лінійний транспорт, а й як пристрої для автоматичного завантаження технологічного обладнання, групового касетування і вкладання виробів, магазинів накопичувачів тощо. Важливо зауважити, що зазначені пристрої набули широкого застосування у виробничих процесах, пов'язаних з виробами з незначними масово-геометричними параметрами, і мають нечітке орієнтування.

На практиці найчастіше використовуються прямолінійні гармонійні коливання, як такі, що відносно просто з технічного погляду реалізуються. Для визначення й опису режиму руху виробу вібрувальною поверхнею користуються узагальненим безрозмірним параметром перевантаження ξ [5–7; 14], який визначається відношенням нормальної складової пришвидшення до нормальної складової пришвидшення земного тяжіння:

$$\xi = \frac{A_n \omega^2}{g \cos \alpha},$$

де A_n – амплітуда коливань у напрямі, перпендикулярному до площини робочого органа;
 ω – кутова частота коливань;
 g – пришвидшення земного тяжіння;
 α – кут нахилу транспортувальної поверхні.

Параметр перевантаження (коефіцієнт режиму руху) ξ характеризує «відривність», швидкість руху виробу по поверхні лотка. Якщо $\xi \leq 1$, він рухається без відриву від поверхні з проковзуванням, а за умови $1 \leq \xi \leq 1,16$ – відбувається плавний рух без помітного відриву, тоді як при $\xi = 1,16 \dots 1,7$ має місце відривний режим руху (з підкиданням, стрибкоподібно). У процесі проектування ВБЖ значення параметра перевантаження вибирають з умови забезпечення

необхідної плавності руху деталей вібрувальною поверхнею.

Режими руху з проковзуванням реномендується використовувати для переміщення тонких і нежорстких деталей, але, як показали дослідження, вони забезпечують незначні швидкості переміщення (близько 4...5 м/хв). Більші швидкості переміщення і високу продуктивність завантажувальних пристроїв можна реалізувати за умови використання режимів руху з відривом (саме у такий спосіб забезпечують максимальні значення ККД і стабільність процесу).

Крім живлення технологічного обладнання, зорієнтованими виробами вібраційні пристрої використовуються і в інших виробничих процесах, наприклад, під час сепарування суміші на перфорованих деках у повітряному середовищі [7]. У процесі проектування і вдосконалення засобів вібраційного розділення сипкої суміші необхідно враховувати, що вібрація не лише пришвидшує робочий процес розділення, а й сприяє її переміщенню [3; 6; 7; 14]. Основним параметром для досягнення найбільшого ефекту сепарування є середня швидкість транспортування, яка, своєю чергою, залежить від частоти і амплітуди, а також і форми коливань. Важливими чинниками цього процесу є ступінь завантаження сепаратора, рівномірність подачі матеріалу до нього, оптимальна товщина його шару [4; 7; 14].

Для вібраційних сепараторів характерні декілька режимів транспортування, кожний з яких вибирається залежно від матеріалу, геометричних параметрів і форми його частинок. Так, у процесі руху частинок з підкиданням вірогідність просіювання істотно зменшується внаслідок зменшення часу контакту частинок зі ситом. Своєю чергою, для режиму просіювання без підкидання характерний надлишковий тиск шарів продукції, що збільшує сили тертя між частинками нижнього шару. Режим просіювання з підкиданням вважається ефективнішим для подовжених частинок у разі розділення за товщиною на ситах з овальними отворами.

Водночас слід зазначити, що форма частинок сипкого тіла впливає також на вибір самих коливань. З досвіду відомо, що для просіювання частинок, форма яких близька до сферичної, оптимальними є колові поступальні коливання сита в горизонтальній площині. Якщо ж форма частинок видовжена, то ефективнішими є прямолінійні коливання, які, своєю чергою, забезпечують певне орієнтування їх відносно отворів.

Займаючись питаннями автоматизації виробничих процесів, на кафедрі машинобудування ЛНУП здійснювати в електричному полі високої напруги [9; 21–23]. Так, на прикладі технологічної операції сепарування суміші зерна

продовгуватої форми (овес, пшениця, ячмінь, жито та ін.) з метою підвищення ефективності процесу розділення її на фракції над решето створювалось електростатичне поле. Враховуючи електричні властивості зерна, створювався такий його ступінь напруженості, за якого насінина, відносно її поздовжньої осі, на вібрвальній поверхні орієнтується терпендикулярно до решета.

Як показали результати експериментальних досліджень, електричне поле позитивно впливає на інтенсивність просіювання насіння різних культур крізь решето. За цих умов значно зменшується його робоча площа, а отже, покращується технічна характеристика пристрою. Слід зауважити, що дослідження проводились на лабораторному обладнанні з однокомпонентними коливаннями в заданому напрямі вібропереміщення у безвідривному режимі [1; 15; 18].

Для підвищення продуктивності і забезпечення безвідривного режиму роботи пристрою доцільним є використання незалежних (поздовжніх та нормальних) коливань, які належать до двокомпонентних. Такий вид коливань реалізується внаслідок сумування двох однокомпонентних прямолінійних коливань (повернутих у просторі одне відносно одного на деякий кут). Серед найрозповсюдженіших двокомпонентних коливань є коливання, які характеризуються еліптичною траєкторією [6–8; 14].

Постановка завдання. З метою підвищення ефективності роботи віброрешітного електросепаратора необхідно дослідити його роботу за умов реалізації незалежних двокомпонентних коливань.

Виклад основного матеріалу. Коливальні системи вібраційних транс портувальних засобів з незалежними коливаннями та електромагнітним віброприводом будуються за тримасовою та двомасовою схемами. Незалежне збурення поздовжніх і нормальних коливань завдяки електромагнітним приводам уможливило реалізацію еліптичних траєкторій у безвідривному режимі з високим коефіцієнтом ККД, а також дає змогу здійснити дистанційне регулювання параметрів вібротранспортування.

У дослідженнях використовувався вібраційний транспортер, виконаний за тримасовою коливною системою (рис. 1). Він складається з робочого органу 1 (двоярусного решета) і реактивних елементів 2, 3, зв'язаних пружними системами 4, 5 поздовжніх і нормальних коливань, виконаними у вигляді плоских пружин. Поздовжні і нормальні до транспортувальної поверхні (решета) коливання збурюються електромагнітними віброприводами 6, 7. Із зсувом фаз між збурювальними зусиллями робочий орган буде здійснювати коливання за еліптичною траєкторією.

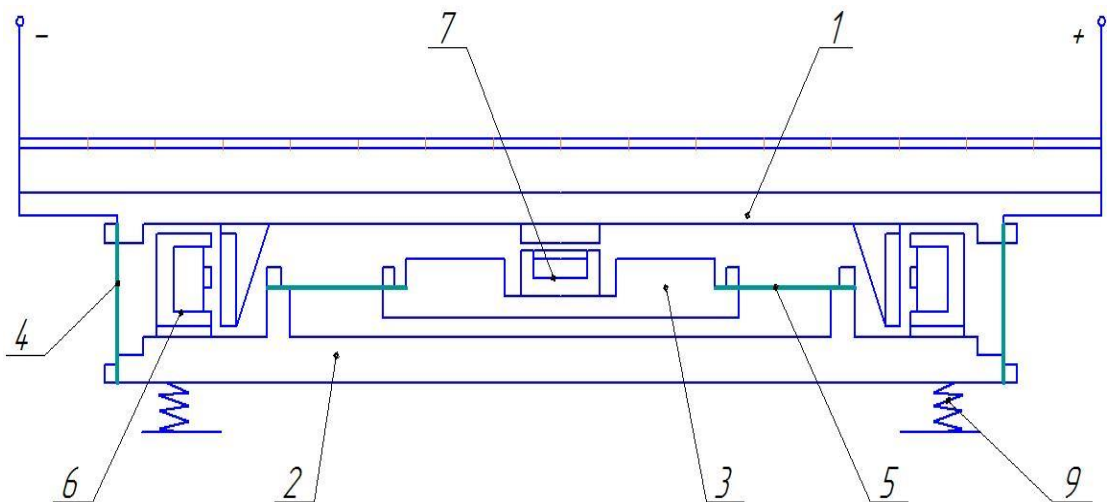


Рис. 1. Принципова схема віброрешітного електросепаратора з незалежно збурювальними коливаннями
Fig. 1. Schematic diagram of a vibration separator with independently disturbing oscillations

Для дослідження роботи запропонованого пристрою поверхню його робочого органу (решето) заключимо в нерухому декартову систему координат $Ox_0y_0z_0$ [3; 12]. Відносно неї решето здійснює коливання з частотою $\nu = 25$ Гц та амплітудою A під кутом α до горизонтальної площини (рис. 2).

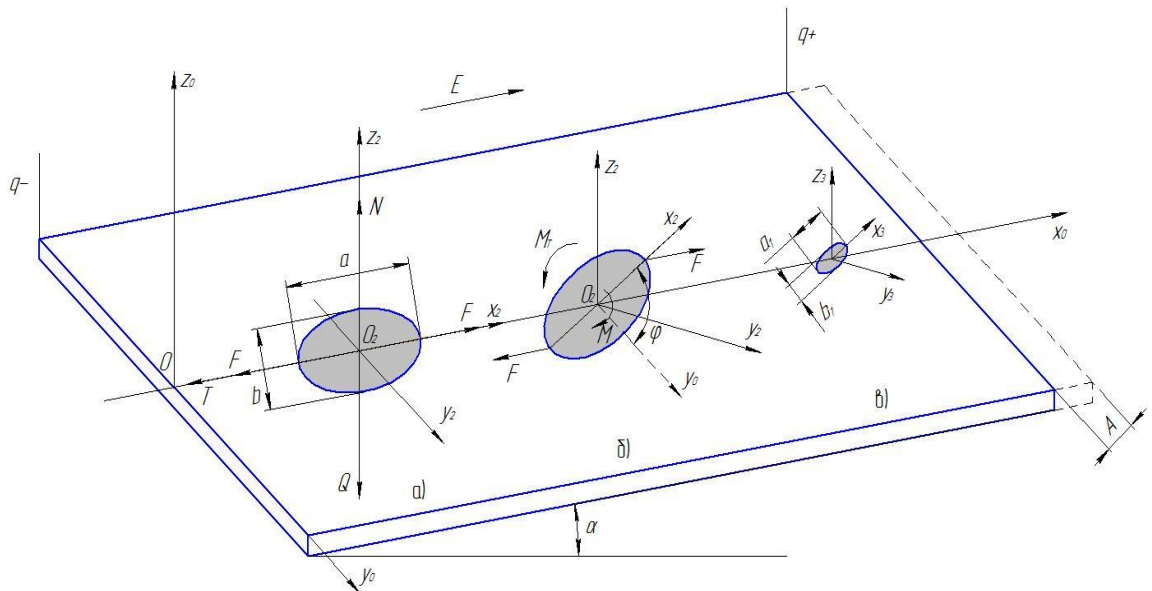


Рис. 2. Розрахункові схеми:

а – схема дії сил на насініну; б – схема виникнення обертового моменту; в – пляма контакту насініни з площиною

Fig. 2. Calculation schemes:

a – diagram of the action of forces on the seed; б – scheme of the torque generation; c – spot of the seed with the plane contact

За цих умов рівняння коливань у проєкціях на осі координат матимуть вигляд:

$$x_1(t) = A \cos \alpha \sin(\omega t); \quad z_1(t) = A \sin \alpha \sin(\omega t), \quad (1)$$

де $\omega = 50\pi$ рад/с – кутова швидкість.

Вважаємо, що насініна масою m має форму еліпсоїда обертання, рівняння якого відносно головних центральних осей $O_2x_2y_2z_2$ має вигляд

$$\frac{x_2^2}{a^2} + \frac{y_2^2}{b^2} + \frac{z_2^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

де $a > b$ – півосі еліпсоїда обертання; вісь O_2z_2 – вертикальна

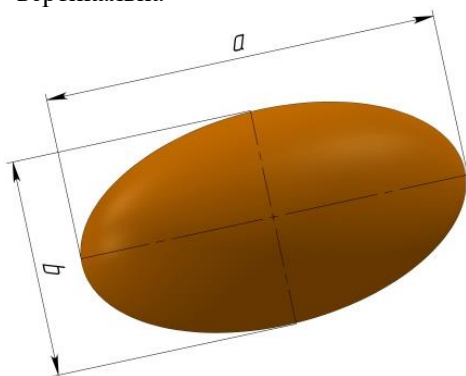


Рис. 3. Насініна у формі еліпсоїда обертання

Fig. 3. A seed in the shape of an ellipsoid of rotation

Під дією вібрації насіння переміщується відносно решета в напрямі осі Ox_0 . При цьому на нього діють: сила ваги $Q = mg$, нормальна реакція N (напрявлена вертикально вгору) і сила тертя T (завжди спрямована протилежно до відносної

швидкості насініни). Крім того, насініна перебуває в однорідному електростатичному полі, вектор напруженості \vec{E} якого паралельний до осі Ox_0 (див. рис. 2, а).

Зазвичай насіння електрично нейтральне, але під дією електростатичного поля заряди протилежних знаків величиною q і $(-q)$ зосереджуються на протилежних кінцях по більшій півосі. Унаслідок цього на насініну діятимуть ще дві протилежно напрямлені сили $F = Eq$, які утворюють пару сил з моментом

$$M = 2aEq \cos \varphi, \quad (3)$$

де $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ – кут між осями O_2x_2 і Oy_0 .

Момент M намагається обернути насініну навколо осі O_2z_2 (див. рис 2, б). У цій ситуації йому протидіє момент сил тертя M_T , який можна визначити на підставі теорії Герца про контактну взаємодію двох тіл (насінини і решета, див. рис 2, в). Згідно з цією теорією площинка контакту обмежена еліпсом

$$\frac{x_3^2}{a_1^2} + \frac{y_3^2}{b_1^2} = 1; \quad a_1 \geq b_1, \quad (4)$$

а розподіл тиску обчислюємо за формулою

$$p(x_3, y_3) = \frac{3N}{2\pi a_1 b_1} \sqrt{1 - \frac{x_3^2}{a_1^2} - \frac{y_3^2}{b_1^2}}. \quad (5)$$

Осі O_3x_3 і O_3y_3 паралельні відповідно осям O_2x_2 і O_2y_2 . Ексцентриситет e еліпса (4) ($e^2 = 1 - b_1^2/a_1^2$) не залежить від сили N та фізичних властивостей тіл і визначається з трансцендентного рівняння

$$\left(\frac{1}{e^2} - 1\right) \left(\frac{K(e)}{E(e)} - 1\right) = \frac{b^2}{a^2 + b^2}, \quad (6)$$

де $K(e) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \theta}}$ – повний еліптичний інтеграл першого роду;

$E(e) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-e^2 \sin^2 \theta} d\theta$ – повний еліптичний інтеграл другого роду.

Розв'язуючи рівняння (6), можна знайти значення півосей еліпса (4) за формулами

$$a_1 = \left(\frac{3NE(e)(K_1+K_2)a^2b}{2(1-e^2)(a^2+b^2)}\right)^{1/3}; \quad b_1 = a_1\sqrt{1-e^2}, \quad (7)$$

де $K_i = \frac{1-v_i^2}{\pi E_i}$ ($i=1,2$);

E_i і v_i – модулі Юнга і коефіцієнти Пуассона матеріалів насінини та решета відповідно.

Момент M_T можна виразити через подвійний інтеграл

$$M_T = f \iint_{\Omega} p(x_3, y_3) \sqrt{x_3^2 + y_3^2} dx_3 dy_3, \quad (8)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання;

Ω – область контакту, обмежена еліпсом (4).

Далі, підставляючи у (8) вираз (5) для тиску і здійснивши заміну змінних

$$\begin{aligned} x_3 &= a_1 \rho \cos \theta, \quad y_3 = b_1 \rho \sin \theta; \\ 0 &\leq \rho \leq 1; \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi, \end{aligned} \quad (9)$$

виконаємо інтегрування по ρ . У результаті цього одержуємо компактну формулу для обчислення моменту M_T

$$M_T = \frac{3fNa_1}{8} E(e). \quad (10)$$

Диференціальне рівняння руху насінини відносно решета матиме вигляд

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= T - m \frac{d^2x_1}{dt^2}; \quad m \frac{d^2z}{dt^2} = N - m \frac{d^2z_1}{dt^2} - mg; \\ I_z \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= M - M_T, \end{aligned} \quad (11)$$

де $I_z = m(a^2 + b^2)/5$ – момент інерції насінини відносно осі O_2z_2 ;

$T = fN \text{sign}\left(-\frac{dx}{dt}\right)$ – сила тертя при відносному русі насінини.

Оскільки рух безвідривний, то $z=0$, $N \geq 0$. Тоді з другого рівняння (11) можна знайти нормальну реакцію:

$$N = mg - mA \sin \alpha \omega^2 \sin(\omega t); \quad A \sin \alpha \leq \frac{g}{\omega^2}. \quad (12)$$

Враховуючи викладене, диференціальні рівняння (11) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2x}{dt^2} &= fN \text{sign}\left(-\frac{dx}{dt}\right) + mA \cos \alpha \omega^2 \sin(\omega t); \\ \frac{m(a^2+b^2)}{5} \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= 2aEq \cos \varphi - \frac{3fNa_1}{8} E(e) \end{aligned} \quad (13)$$

Ці диференціальні рівняння розв'язувались у середовищі *MATLAB* методом Рунге-Кутта четвертого порядку точності при заданих значеннях параметрів m , a , b , E , q , f , A і B .

Для досліджень було вибрано два види насіння еліптичної форми, а саме пшениці та вівса, які мали такі характеристики:

- насіння пшениці: $a = 3,3$ мм, $b = 1,9$ мм, $m = 0,04$ г, $q = 5,2 \cdot 10^{-11}$ Кл, $E_1 = 10^4$ МПа – модуль пружності, $\nu_1 = 0,3$ – коефіцієнт поперечної деформації.

- насіння вівса: $a = 8$ мм, $b = 1,5$ мм, $m = 0,03$ г, $q = 6,7 \cdot 10^{-11}$ Кл, $E_1 = 10^4$ МПа – модуль пружності, $\nu_1 = 0,3$ – коефіцієнт поперечної деформації.

Параметри роботи сепаратора були такими: $g = 9,81$ м/с²; $f = 0,4$; $\nu = 25$ Гц; $\omega = 2\pi\nu$ рад/с;

$E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль пружності матеріалу решета; $\nu_2 = 0,25$.

Результати досліджень показують, що зі збільшенням амплітуди коливань A шлях, який

проходить насінина за одиницю часу, зростає. Так, зі зростанням амплітуди від 2 до 4 мм шлях, пройдений насіниною за 1 с, зростає удвічі, а при збільшенні амплітуди до 6 мм він зростає більш як у 3,5 раза.

Помістивши насінину в електричне поле, під дією заряду, який накопичуватиметься на ній, створюватиметься сила F , під дією якої виникає обертовий момент M , який, своєю чергою, намагатиметься повернути насінину еліптичної форми довшою віссю a вздовж ліній дії електричного поля. За наведеними вище диференціальними рівняннями можна визначати положення насінини на коливній площині в електричному полі високої напруженості. Оскільки в нашому випадку силова дія поля спрямована в горизонтальній площині і збігається з напрямом коливань, то під час переміщення кут φ між осями O_2x_2 і Oy_0 буде змінюватися, що призводитиме до бажаного орієнтування насінини.

На рис. 4 наведено графічні залежності руху насінини вздовж решета за різних амплітуд коливань системи.

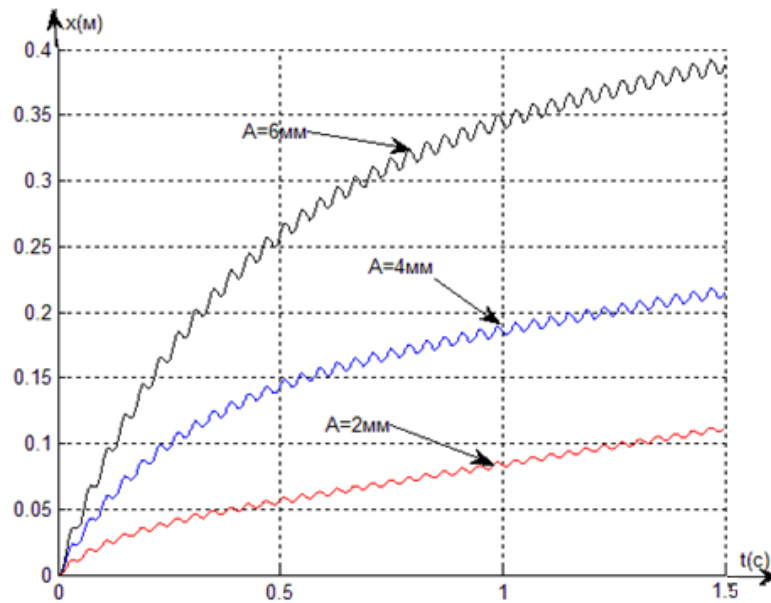


Рис. 4. Графік руху насіння вздовж решета при різних амплітудах горизонтальних коливань решета
Fig. 4. Graph of seeds moving along the sieve at different amplitudes of the sieve horizontal oscillations

На рис. 5 і 6 наведені графіки зміни кута повороту насіння пшениці і вівса при різних значеннях напруженості електростатичного поля.

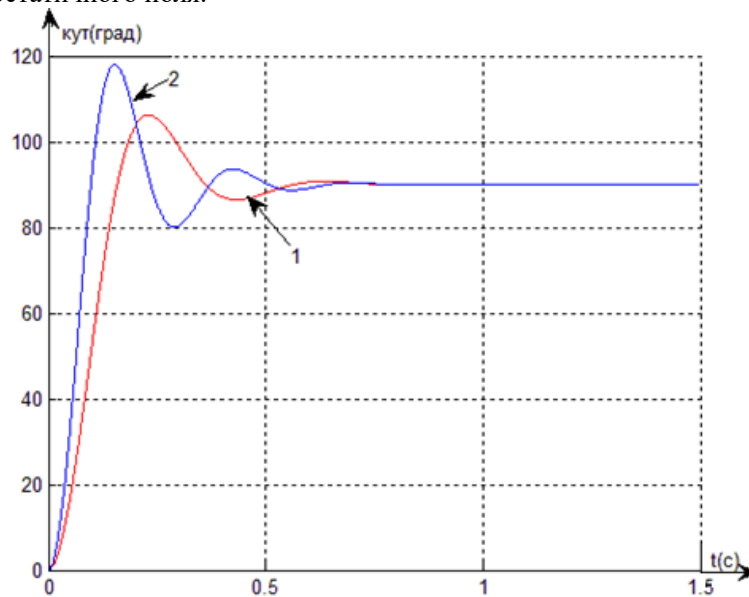


Рис. 5. Графік зміни кута повороту насіння пшениці при різних значеннях напруженості електростатичного поля:

1 – за напруженості $E=2\text{ кВ/см}$; 2 – за напруженості $E=4\text{ кВ/см}$

Fig. 5. Graph of changes in the angle of wheat seeds rotation at different values of the electrostatic field intensity:

1 – at voltage of $E=2\text{ kV/cm}$; 2 – at voltage of $E=4\text{ kV/cm}$

Величина напруженості електричного поля майже не впливає на час орієнтування насінин, однак із збільшенням її значення поворот насінини стає урівноваженим. Так, при напруженості 4 кВ/см кут повороту становить 120° .

Розміри насінин еліптичної форми характеризуються осями еліпсоїда a і b . Дослідивши поведінку вівса і пшениці в електричному полі, встановлено, що їх геометричні

параметри не впливають на час їх орієнтування. Так, при різниці довшої осі a насіння вівса в $5,7\text{ мм}$ (майже у $2,5$ раза), порівняно з насінням пшениці з отриманих графіків (рис. 5 і 6), видно, що час зміни кута φ від 0° до 90° становить менше 1 секунди ($0,75 \dots 0,8\text{ с}$).

На рис. 7 наведено результати впливу початкового положення насінини на ефективність його орієнтування.

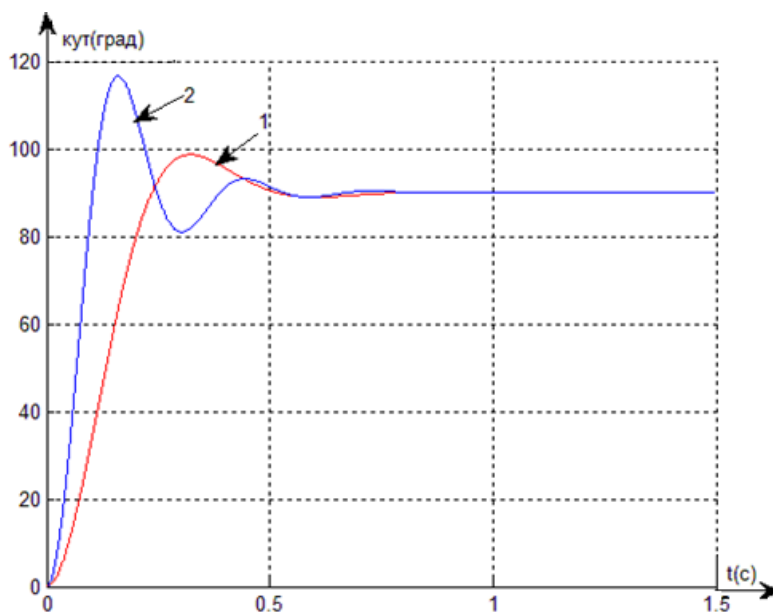


Рис. 6. Графік зміни кута повороту насіння вівса при різних значеннях напруженості електростатичного поля: 1 – за напруженості $E=1$ кВ/см; 2 – за напруженості $E=3$ кВ/см

Fig. 6. Graph of changes in the angle of oat seeds rotation at different values of the electrostatic field intensity: 1 – at voltage of $E=1$ kV/cm; 2 – at voltage of $E=3$ kV/cm

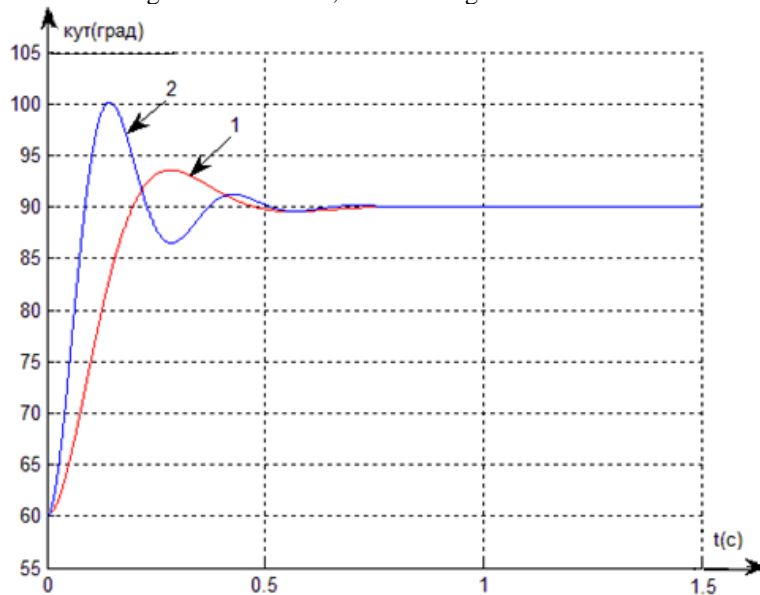


Рис. 7. Графік зміни кута повороту насіння вівса при різних значеннях напруженості електростатичного поля при $\varphi_0=60^\circ$: 1 – за напруженості $E=1$ кВ/см; 2 – за напруженості $E=3$ кВ/см

Fig. 7. Graph of changes in the angle of oat seeds rotation at different values of the electrostatic field strength at $\varphi_0=60^\circ$:

1 – at voltage of $E=1$ kV/cm; 2 – at voltage of $E=3$ kV/cm

Встановлено, що хаотичне (початкове) положення насінини в електричному полі також не має суттєвого впливу на час орієнтування насінин (рис. 7). Однак максимальний кут φ , на який повертатиметься насінини від свого початкового положення, зменшується зі збільшенням початкового кута φ_0 .

Висновки

Аналіз одержаних результатів показує, що використання двокомпонентних коливань робочого органу (решета) значно підвищує продуктивність обладнання. Порівняно з однокомпонентними коливаннями вона зростає на 18...25 %.

Оптимальне значення напруженості електричного поля в робочій зоні вібраційного електросепаратора, необхідне для орієнтування насіння в напрямі переміщення, повинно становити 3 кВ/см. Кількість непросіяного через решето з прямокутними отворами насіння становить менше 30 %.

За результатами досліджень встановлено, що забезпеченням відповідних параметрів роботи технологічного обладнання можна значно інтенсифікувати процес просіювання компонентів суміші через отвори решета і тим самим зменшити його робочу площу, а отже, поліпшити технічну характеристику сепаратора.

Крім того, поєднання розглянутих ефектів можна використати не лише під час сепарування чи міжопераційного транспортування матеріалів, а й у роботі пристроїв для їх автоматичного завантаження в технологічне обладнання, групового касетування і вкладання магазинів накопичувачів, де питання орієнтування виробів, особливо з незначними масово-геометричними параметрами, набувають важливого значення.

Бібліографічний список

1. Бацуровська І. О. Електротехнології: навч. посіб. Миколаїв: МНАУ, 2021. 258 с.
2. Бржезицький В. О., Козюра В. В., Козюра В. М. Застосування електричних і магнітних полів у промисловому та сільськогосподарському виробництві. Ч. 2: Технології, засновані на силовій дії електричних і магнітних полів: навч. посіб. Київ: ФЕА НТУУ «КПІ», 2016. 119 с.
3. Божедарник В. В., Сулим Г. Т. Елементи теорії пружності. Львів: Світ, 1994. 558 с.
4. Заїка П. М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування насіння. Харків: Око, 2006. Т. 3. 408 с.
5. Кодра Ю. В., Стоцько З. А., Гаврильченко О. В. Завантажувальні пристрої технологічних машин. Розрахунок і конструювання: навч. посіб. Львів: Бескид Біт, 2008. 356 с.
6. Коруняк П. С., Керницький І. С., Ніщенко І. І. Автоматизоване вібраційне маніпулювання виробами та вібрманіпулятори: монографія / за ред. В. В. Снітинського. Львів: Сполом, 2021. 256 с.
7. Коруняк П. С., Керницький І. С. Вібраційні машини у технологічних процесах та технологіях: навч. посіб. Львів: Сполом, 2019. 436 с.
8. Коруняк П. С., Ніщенко І. І., Керницький І. С. Транспортувальні машини. Основи конструювання та розрахунку вібраційних транспортувальних машин: навч. посіб. Львів: Сполом, 2017. 244 с.
9. Матвійчук В. А., Рубаненко О. Є., Стаднійчук І. П. Електротехнології в АПК: навч. посіб. Вінниця: Твори, 2020. 272 с.
10. Михайлов А. Д. Машина, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки зерна і насіння. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2012. 78 с.
11. Ніколасенко К. В., Олійник Т. А., Прилипенко В. Д. Магнітні та електричні методи збагачення корисних копалин: підручник. Київ: Фенікс, 2011. 295 с.
12. Павловський М. А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002. 510 с.
13. Підвищення ефективності роботи вібраційного сепаратора / О. Швець, П. Коруняк, С. Баранович, С. Березовецький. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. 3 (106). С. 36-43.
14. Повидайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2004. 248 с.
15. Русаков В. Ф. Електрика та магнетизм: навч. посіб. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2020. 244 с.
16. Технологічні процеси та виробничі машини: підручник / П. С. Коруняк та ін.; за ред. В. В. Снітинського. Львів: Сполом, 2022. 452 с.
17. Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посіб. / за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. Харків: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005. 930 с.
18. Фізичні основи технології сепарування насіння сільськогосподарських культур / В. О. Паранюк, С. Й. Ковалишин, В. І. Мельничук, О. П. Швець. *Збірник наукових праць УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого: Техніко-технологічні аспекти розвитку та впровадження нової техніки і технологій для сільськогосподарства України*. 2007. Вип. 10 (24). С. 77–86.
19. Швець О., Барановський М. Дослідження можливості сепарування насіння райграсу пасовищного. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2020. № 24. С. 63–68.
20. Швець О., Коруняк П. Віброрешітний електросепаратор зерна. *Вчені Львівського національного університету природокористування виробництва: каталог інноваційних розробок*. Львів: ЛНУП, 2022. Вип. 22. С. 35.
21. Швець О., Коруняк П. Вібраційний електросепаратор. *Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXIII Міжнар. наук.-практ. форуму (4–6 жовт. 2022 р.)*. Львів: ЛНАУ, 2022. С. 428-431.
22. Швець О., Коруняк П. Підвищення ефективності просіювання зерна на віброрешітному електросепараторі. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Агроінженерні дослідження*. 2022. № 26. С. 64-70. doi:10.31734/agroengineering2022.26.064.
23. Швець О. П. Спосіб інтенсифікації процесу розділення зерна на решетах. *Вчені Львівського національного аграрного університету виробництва: каталог інноваційних розробок*. Львів: ЛНАУ, 2020. Вип. 20. С. 53.

Стаття надійшла 30.07.2023

УДК 629.113.001

ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНОЇ МАШИНИ КАТЕГОРІЇ T1/N1 В АПК**Г. Худавердян, аспірант**

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

Худавердян Г. Формування технологічного обладнання тягово-транспортної машини категорії T1/N1 в АПК

Представлено доопрацьовану модель руху універсальних повнопривідних колісних тягово-транспортних засобів типу Mercedes-Benz Unimog по поверхні, що деформується (згідно з WES-методикою армії США) в програмному середовищі MATLAB Simulink, а саме програмний модуль для визначення максимального тягового зусилля, яке може бути реалізоване на тій чи іншій опорній поверхні. Це натомість дозволяє дослідити вплив конструктивних параметрів та експлуатаційних умов на тягово-зчіпні властивості, здійснити підбір відповідного обладнання для технологічних, та причепа для транспортних операцій. Розглянуто способи підвищення тягово-зчіпних властивостей колісного транспортного засобу та зменшення негативного впливу на родючість ґрунту. Використовуючи цю імітаційну модель, отримали значення залишкового тягового зусилля універсальної колісної машини типу Mercedes-Benz Unimog (на базі проєкту АТ «Укравтобуспром» – ТУР ВТ-041 «Автотрак») і встановлено її тяговий клас згідно з класифікацією та підібрано відповідне технологічне обладнання і причеп. Оцінка адекватності опрацьованої методики здійснена на базі зіставлення результатів експериментальних даних щодо колісного трактора Т-150К та результатів відповідного імітаційного моделювання – розрахунку за допомогою опрацьованого вищезгаданого програмного модуля. Проблема недостатнього доступу до малотоннажних колісних машин для малих фермерських та комунальних господарств важлива та актуальна. Здійснення імпорту такої техніки часто стає накладним та складним процесом. У світлі досвіду розвитку країн Західної Європи після Другої світової війни і сучасної ситуації, розглядається концепція універсальної колісної машини категорії N1/T1, типу Автотрак/Унімог. Ця концепція має на меті створення транспортного засобу, який може виконувати різні завдання в умовах малих фермерських господарств та комунальних підприємств, об'єднує в собі функції невеликого трактора з великою тягою та повнопривідної вантажівки, що може пересуватися як по дорогах, так і по бездоріжжі.

Ключові слова: колісна машина, повний привід, імітаційна модель, технологічне обладнання, опорна поверхня, максимальне тягове зусилля.

Khudaverdian H. Developing the technological equipment for the T1/N1 traction transport machine used in the agro-industrial complex

The article introduces a modified model for the movement of universal all-wheel drive traction vehicles of the Mercedes-Benz Unimog type on a deformable surface (according to the WES methodology of the US Army). The model is created in the MATLAB Simulink software environment, namely a software module for determining the maximum traction force that can be implemented on any support surface. By investigating the influence of design parameters and operating conditions on traction properties, this model helps in selecting appropriate equipment for technological operations, and a trailer for transportation purposes. The researchers also explore ways to increase the traction properties of a wheeled vehicle and reduce the negative impact on soil fertility. Through this simulation model, the researchers obtained the value of the free traction force of a universal wheeled vehicle of the Mercedes-Benz Unimog type (based on the project of the Open Joint Stock Company “Ukravtobusprom” – TUR VT-041 “Avtotrak”), determined its traction class according to the classification, and selected the appropriate technological equipment and a trailer. The adequacy of the elaborated methodology is assessed by comparing the results of experimental data of the wheeled tractor T-150K and the results of the corresponding simulation model, i.e. calculation by applying the above-mentioned module. The article highlights the problem of insufficient access to low-tonnage wheeled vehicles for small farms and utility companies. Importing such equipment often becomes an expensive and complicated process. To address this issue, it is expedient to study the expertise of the Western European countries after the Second World War and the current situation and to develop a concept of a universal wheeled vehicle of the N1/T1 category of the Avtotrak/Unimog type. This concept aims to create a vehicle that can perform various tasks in the conditions of small farms and utility companies by combining the functions of a small tractor with high traction and an all-wheel drive truck that can move on and off-road.

Key words: wheeled machine, four-wheel drive, simulation model, technological equipment, support surface, maximum traction force.

Постановка проблеми. Оскільки універсальні тягово-транспортні колісні машини (КМ) типу Автотрак/Унімог призначені виконувати як транспортні операції (рух з причепом), так і технологічні (оранка, культивування, косіння і т.п.),

вони повинні мати змогу оснащуватися відповідним технологічним обладнанням та причепом. Для забезпечення ефективного використання технологічного обладнання та причепа при виконанні сільськогосподарських робіт

продуктивності та зменшення експлуатаційних витрат – необхідно здійснити правильний підбір такого обладнання та причепа відштовхуючись від максимального тягово зусилля, що може реалізувати КМ на тій чи іншій опорній поверхні (ОП), а саме від її класу тяги. Одним із способів підвищення тягово-зчіпних властивостей КМ є використання спарених коліс, який набув широкого застосування в агросфері. Цей спосіб забезпечує більшу площу контактну з ґрунтом, тим самим покращує тягово-зчіпні характеристики КМ. Це особливо важливо при роботі на мокрих та слабких ґрунтах, коли звичайні шини можуть просідати [1]. Також за рахунок збільшення контактної площі спарених шин зменшується тиск на ґрунт, що може допомогти зберегти його плодючість та запобігти ерозії.

Імітаційне комп'ютерне моделювання [12] та математичний опис динаміки руху універсальної КМ дозволяє визначити вільне тягове зусилля з умов залишкової потужності (по двигуну), яке можливо реалізувати на відповідній ОП, оцінити ефективність способів підвищення тягово-зчіпних властивостей, визначити клас тяги КМ для подальшого підбору технологічного обладнання та причепа.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попри те, що активний розвиток універсальних транспортних засобів почався ще у післявоєнній Німеччині з Mercedes-Benz Unimog [14; 15], актуальними вони є і дотепер, зокрема в Україні для малих фермерських господарств. Для їх ефективного використання підбір технологічного обладнання та причепа потрібно здійснити відповідно до класу тяги таких КМ. Дослідження тягових показників повнопривідних автомобілів типу Автотрак на базі МЕЗ-330 «Автотрактор» у своїх працях висвітлили Погорілий С.П., Дунь С.В [2; 9; 10]. Зокрема у статті [10] подано результати тягових випробувань у реальних польових умовах.

Оскільки повнопривідні універсальні КМ проєктуються як для руху дорогами з твердим покриттям на швидкості 90 км/год, так і для технологічних операцій на малих швидкостях (5-15 км/год.), постає проблема реалізації залишкової потужності двигуна при русі полем. Способи і пристосування, які покращують тягові властивості КМ, розглядає у своїх працях Болтянський О.В. [4].

Розрахунок максимального тягового зусилля, який може розвинути повнопривідна КМ на відповідній ОП, що деформується на етапі проєктування шляхом імітаційного моделювання в програмному середовищі MATLAB Simulink [6], дозволяє досягти суттєвого економічного ефекту порівняно з використанням експериментальних методів.

Постановка завдання. Завдання нашого дослідження – доопрацювання вже наявної імітаційної моделі руху повнопривідної колісної техніки [13] для оцінки тягових характеристик КМ, можливості реалізації вільного тягового зусилля силового приводу на відповідній опорній поверхні з відомими фізико-механічними характеристиками [7] за WES (англ. Waterway Engineering Station) методикою [5] армії США, перевірка отриманої моделі на адекватність шляхом визначення запасу тягово зусилля для існуючих КМ, підбір відповідного технологічного обладнання та причепа. Моделювання зводиться до визначення найбільшого тягового зусилля, що може реалізувати КМ на відповідній ОП (класу тяги), запасу тягового зусилля при виконанні універсальною КМ [8] технологічних операцій обробітку ґрунту та при русі з причепом.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до поставленого завдання, вже наявна імітаційна модель у програмному середовищі MATLAB Simulink, яка дозволяє відтворити рух КМ з навісним обладнанням у процесі обробітку ґрунту з дотриманням певного діапазону швидкості з умов агротехнології (оранка, як найбільш енергозатратна операція обробітку ґрунту, звично здійснюється зі швидкістю руху 6–8 км/год) та рух КМ з причепом, потребувала певних змін і розвитку [13]. Саме тому ми розробили окрему підсистему для розрахунку найбільшого тягового зусилля, що може розвинути повнопривідна КМ на відповідній ОП, запас тягового зусилля при виконанні транспортних та технологічних операцій (рис. 1).

Моделювання проводили на базі КМ проєкту АТ «Укравтобуспром» – ТУР ВТ-041 «Автотрак» [8] повною масою 3,5 т., спорядженою масою 2,5 т., двигун IVECO 8040 потужністю 78 кВт, обладнаний новими вітчизняними шинами мод. 140K (365/90R18) [11].

За результатами імітаційного моделювання вільне тягове зусилля КМ Автотрак становить 15,6 кН (з використанням одинарних шин), що натомість дозволяє віднести його до класу тяги 1,4 (Аналоги -колісні трактори МТЗ-80 і модифікації). Перевірку моделі на адекватність було здійснено на базі наявного колісного трактора Т-150К [3]. Результати комп'ютерного розрахунку показали, що тягове зусилля трактора при русі по стерні становить 26,688 кН, що відповідає його заявленому класу тяги 3 та підтверджує достатню точність оцінки класу тяги по ТУР ВТ-041 «Автотрак».

За результатами імітаційного моделювання руху повнопривідної КМ ТУР ВТ-041 «Автотрак» було підібрано відповідне технологічне обладнання та причеп вітчизняного виробництва (табл. 1).

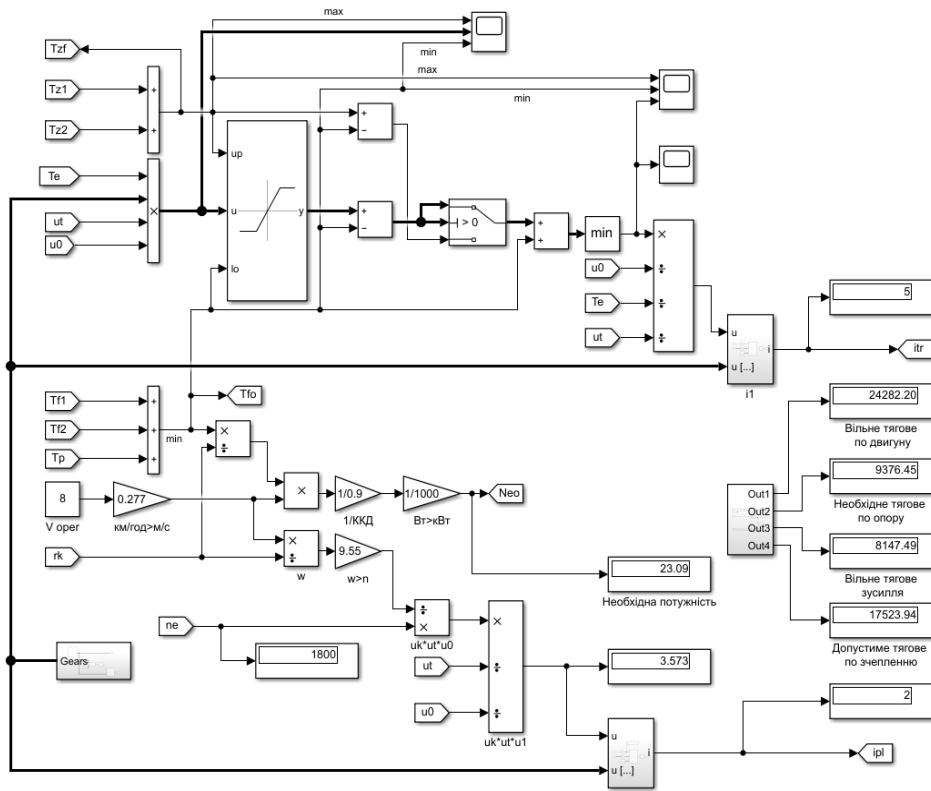


Рис. 1. Підсистема визначення запасу тягового зусилля у програмному середовищі MATLAB Simulink
Fig. 1. Subsystem for determining the reserve of traction force in the MATLAB Simulink software environment

Максимальне тягове зусилля на стерні (клас тяги) повнопривідної КМ Автотрак (на базі проєкту АТ «Укравтобуспром» – ТУР ВТ-041 «Автотрак») визначали як із використанням одинарних, так і подвійних шин 365/80 R18. Результати подано на рис.2.

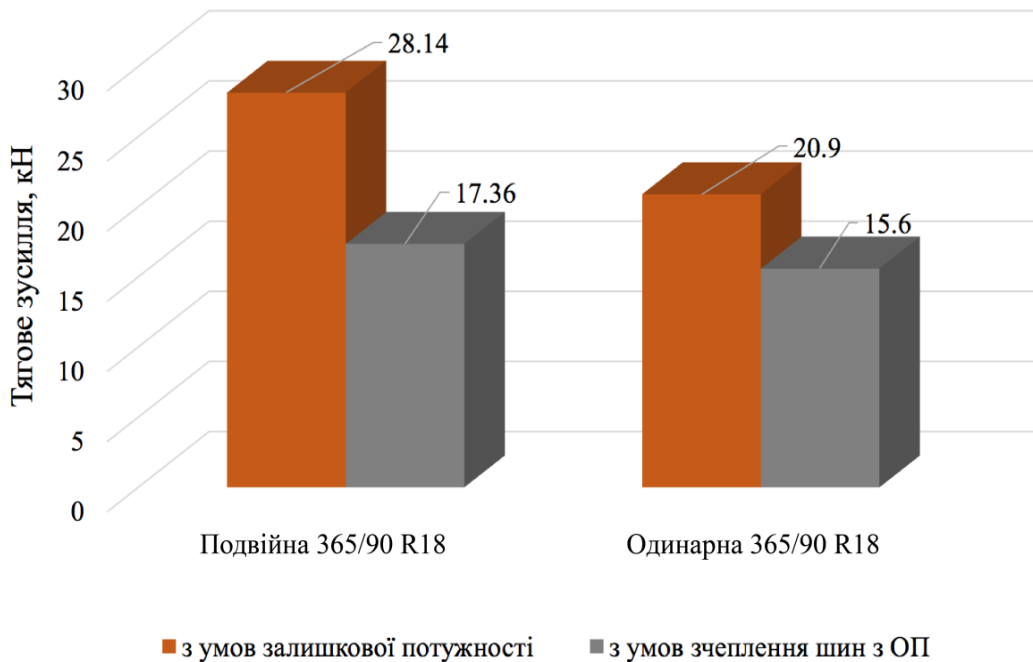


Рис. 2. Тягові характеристики повнопривідної КМ ТУР ВТ-041 «Автотрак» з різними типами ошиновки.
Fig. 2. Traction characteristics of all-wheel drive KM TUR VT-041 “Avtotrak” with different types of tires.

Таблиця 1. Технологічне та транспортне обладнання для КМ Автотрак.

Table 1. Technological and transport equipment for КМ Avtotrak.

Вид робіт	Назва машини або агрегату	Марка машини або обладнання
Обробіток ґрунту	Навісний трикорпусний плуг	ПЛН-3-35
	Культиватор причіпний	КПС-4Г
	Навісна дискова борона	АГД-2,1
Сівба (садіння)	Сіялка зернова	СЗ-3,6
	Навісна картоплесаджалка	СПК-4
Скошування трав	Косарка дискова навісна	КДН-210
Підбирання трав	Прес-підбирач рулонний	ПР-Ф-145
Транспортні операції	Причіп двовісний	2ПТС-4

Висновки. Розроблена підсистема імітаційної моделі у програмному середовищі MATLAB Simulink для розрахунку найбільшого тягового зусилля, що може розвинути повнопривідна КМ на відповідній ОП. Така підсистема дає змогу визначити клас тяги КМ із заданими параметрами і підібрати відповідне технологічне обладнання та причепа на етапі проєктування, якісно оцінити вплив способів покращання тягових властивостей, зокрема такий як використання спарених коліс.

Бібліографічний список

- Абрамов, В.Н., Чистов М. П., Веселов А. А., Колтуков А. А. Оценка и выбор пневматических шин регулируемого давления для армейских автомобилей / под. общ. ред. В.В. Шипилова. Бронницы: ФГУП 21 НИИИ МО РФ, 2006. 223 с.
- Адамчук В. В., Погорілий С. П., Черняк Р. Є., Дунь С. В. Результати експериментальних досліджень тягових показників МЕЗ-330 «Автотрактор», 2018.
- Бугара В.А., Ватуля Н.Н., Вайнштейн Л.А., Коваль І.А., Левітанус А.Д., Огий Г.Є. Довідник по тракторах Т-150 і Т-150К / за ред. Б.П. Кашуби. Вид. друге, перероблене і доповнене. Харків: Прапор, 1975.
- Болтянський О.В., Стефановський О.Б., Волков С.В. Способи підвищення тягово-зчіпних властивостей енергетичного засобу на транспортних роботах / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Мелітополь, Україна, 2020.
- Грубель М. Г., Крайник Л. В., Купріненко О. М. Методологія оцінки опорної прохідності колісної військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 4. С. 22-31.
- Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України: науково-виробничий журнал*. Київ, 2020. № 2. С. 21-28.
- Грубель М. Г., Фтемов Ю. О., Хома В. В. Експериментальні дослідження параметрів опорної прохідності зразків колісної військової автомобільної техніки. *Системи озброєння та військова техніка: науково-технічний журнал*. Харків: Харківський НУПС, 2019. № 4(60). С. 7-15.
- Крайник Л. В., Худавердян Г. А. Концепція та формування вітчизняного універсального автомобіля типу автотрак/унімог для фермерських та комунальних господарств. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: X-та Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція* : тези доповідей (Вінниця, 14-15 квітня 2022р.). Вінниця, ВНТУ, 2022. С. 178-180.
- Погорілий С. П. Результати експериментальних досліджень МЕЗ-330 «Автотрактор з плугом ПНН-5-40». *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. (47 (2)). С. 227-231.
- Погорілий С. П., Дунь С. В., Черняк Р. Є. Дослідження тягових показників мез-330 «Автотрактор», 2018. С. 19-23.
- Худавердян Г.А. Обґрунтування розмірності шин універсального колісного тяготно-транспортного засобу. *Актуальні проблеми сучасної науки: теоретичні та практичні дослідження молодих учених: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції*, 2023.
- Худавердян Г.А., Хома В.В. Технологічні процеси обробітку ґрунту: комп'ютерне моделювання. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали III Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції 19-20 жовтня 2022 р.* Рівне : НУВГП, 2022. 301с. Електронне видання. С. 299-301.
- Khudaverdian H., Khoma V., Krainyk L. Simulation modeling of field movement of four-wheel drive vehicles in the MATLAB Simulink software environment. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Agroengineering studies*. 14. 2022. No 26. P. 164–170. <https://doi.org/10.31734/agroengineering>

Стаття надійшла 01.08.2023

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ЕФЕКТИВНЕ МАШИНОВИКОРИСТАННЯ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

УДК 629.373.3-3.032.26

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗДІЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ В ШИНАХ З УМОВ ПРОХІДНОСТІ ТА МОБІЛЬНОСТІ РУХУ БЕЗДОРІЖЖЯМ

Віталій Хома, аспірант

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

Хома В. Ефективність роздільного регулювання тиску в шинах з умов прохідності та мобільності руху бездоріжжям

У статті розглядається проблема підвищення ефективності повнопривідних автомобілів підвищеної і високої прохідності за допомогою оптимального регулювання тиску повітря в шинах. Система регулювання тиску повітря в шинах забезпечує «адаптацію» коліс до різних фізико-механічних властивостей опорної поверхні, що зменшує глибину колії та збільшує площу поверхні контакту з ґрунтом. Проте використання систем, що встановлюють однакові значення тиску повітря в шинах всіх коліс, не дозволяє оптимізувати тиск залежно від фізико-механічних властивостей опорної поверхні та навантаження на колеса. Таким чином, пропонуємо застосування систем, що дозволяють регулювати тиск повітря в шинах окремо для кожного колеса, що забезпечить підвищення ефективності колісних машин. Досліджено вплив цього чинника на опорну прохідність і вказано на його значущість. Зазначено, що зі зміною тиску повітря в шинах і кожним новим проходом колеса по опорній поверхні фізико-механічні характеристики ґрунту змінюються. Актуальним залишається питання формування єдиної закінченої методики оцінки прохідності колісних транспортних засобів та алгоритмів вибору основних конструктивних параметрів. Розглянуто підходи до моделювання процесу руху автомобіля на деформованій опорній поверхні з урахуванням змін фізико-механічних характеристик ґрунту. Дослідження виявили, що зниження тиску повітря в шинах може покращити параметри опорної прохідності на деформованому покритті, але результати залежать від типу ґрунту, розмірів рушія та нормальних середніх тисків. Використовуючи імітаційну модель руху КМ бездоріжжям, опрацьовану в MATLAB Simulink, було отримано значення максимально можливих швидкостей руху бездоріжжям, що демонструють достатню адекватність з експериментальними дослідженнями щодо автомобілів підвищеної прохідності, але потребують додаткових експериментальних досліджень та оцінки рівня адекватності. Отримані результати є основою параметричної оптимізації системи розподілу тиску в шинах повнопривідних автомобілів.

Ключові слова: повний привід, ефективність, роздільне регулювання тиску, прохідність, опорна поверхня.

Khoma V. Efficiency of differential pressure regulation in tires under conditions of off-road passability and mobility

The article discusses the problem of increasing the efficiency of full-drive high-passability vehicles by optimizing the air pressure in tires. The tire pressure control system provides "adaptation" of the wheels to the different physical and mechanical properties of the supporting surface, which reduces the depth of the track and increases the contact surface area with the ground. However, using systems that set the same air pressure values in the tires of all wheels does not allow for optimizing the pressure depending on the physical and mechanical properties of the supporting surface and the load on the wheels. Therefore, the author proposes to use the systems that allow for separately regulating the air pressure in the tires of each wheel, which will increase the efficiency of wheeled vehicles. The impact of this factor on the load-carrying capacity is examined and its significance is indicated. It is noted that with a change in tire pressure and each new pass of the wheel over the supporting surface, the physical and mechanical characteristics of the ground change. The question of forming a unified complete methodology for evaluating the passability of wheeled vehicles and selecting the main design parameters remains relevant. Approaches to modeling the process of vehicle movement on a deformed supporting surface with consideration of the changes in the physical and mechanical characteristics of the soil are considered. The research found that reducing tire pressure can improve the load-carrying capacity parameters on a deformed surface, but the results depend on the type of soil, the size of the vehicle, and the normal average pressures. Using a MATLAB Simulink-based off-road vehicle simulation model, the author obtained values for the maximum possible off-road speeds, which demonstrate sufficient adequacy with experimental studies on high-passability vehicles, but require additional experimental research and adequacy assessment. The obtained results serve as the basis for the parametric optimization of the tire pressure distribution system in full-drive vehicles.

Key words: full drive, efficiency, separate pressure regulation, permeability, supporting surface.

Постановка проблеми. Сучасні повнопривідні автомобілі підвищеної і високої прохідності оснащені системою регулювання тиску повітря в шинах, яка забезпечує «адаптацію» коліс до різних фізико-механічних властивостей опорної поверхні (ОП). При зниженні тиску повітря в шинах зменшується тиск на ґрунт, збільшується площа поверхні контакту, зменшується глибина колії, але збільшується деформація шини, збільшуються витрати енергії на внутрішнє тертя в оболонці шини, зменшується допустима швидкість нагрівання шин, знижується термін служби шини. Тому залежно від фізико-механічних властивостей ОП вибирається оптимальний тиск повітря в шинах. Сьогодні застосовуються системи регулювання тиску повітря в шинах, що встановлюють однакові значення тиску повітря в шинах всіх коліс. Однак умови взаємодії з ґрунтом у різних коліс різні через властивості ОП і різне навантаження на колеса. На більшості ОП колеса другої і наступних осей рухаються по зміненому впливом передніх коліс ґрунту (найчастіше зі збільшеною щільністю і зменшеною товщиною шару м'якого ґрунту). У результаті цього деформація шин і радіуси кочення в передніх і задніх коліс виходять різними. До цього додаються ще різні навантаження на колеса. Забезпечення оптимальних для кожного колеса тисків повітря в шинах може бути одним із способів підвищення ефективності колісних машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Можливість автомобіля рухатися бездоріжжям або розмоклою ґрунтовою чи сухою піщаною поверхнею залежить значним чином від характеристик і конструкції шин. Поряд з геометричними розмірами (діаметр і ширина, рисунок та глибина протектора) можливість регулювання тиску повітря в шині є визначальним чинником у цьому плані. Особливе місце процесу регулювання тиску повітря в шинах та його вплив на опорну прохідність акцентуються багатьма вченими. Актуальним залишається питання формування єдиної закінченої методики оцінки прохідності колісних машин (КМ), а також алгоритмів вибору основних конструктивних параметрів. Проведенню наукових досліджень та пошуку рішень існуючих проблем, вивченню аспектів опорної прохідності КМ, а також пов'язаним із ними питанням теорії кочення колеса по ОП присвячено велику кількість праць. Особливий інтерес становлять праці В. Ю. Усікова, Я. С. Агейкіна, М. Ф. Кошарного, В. В. Ларіна, М. G. Bekker, Z. Janosi, A. R. Reese, J. Y. Wong та багатьох інших [1–13].

Математичне моделювання процесу взаємодії еластичного колеса з деформованим ґрунтовим покриттям є структурною частиною матема-

тичної моделі взаємодії шини з деформованою ОП. На сьогодні вироблено декілька підходів до опису процесу прямолінійного руху КМ з урахуванням черговості руху кожної осі та зміни фізико-механічних характеристик ґрунту ОП після чергового проходу окремого колеса. Враховувати характер змін фізико-механічних характеристик ґрунту за результатами проходів колеса через варіювання питомого опору ґрунту вдавлюванню та степеневому показника, що характеризує закон зміни опору ґрунту вдавлюванню, запропонував Н. Ф. Кошарний у праці [4].

Вивченню впливу конструктивних параметрів автомобіля (параметри ходової частини, число осей автомобіля, навантаження на колесо, характеристики підвіски, конструкція трансмісії, коефіцієнт опору коченню та коефіцієнт тяги, тиск повітря в шинах) на глибину утвореної колії приділив значну увагу Я. С. Агейкін [13]. У працях розглянуто досить широкий спектр конструктивних та експлуатаційних чинників, параметрів прохідності.

Науковець В. В. Ларін [5] сформулював загальні тенденції при зниженні тиску повітря в шинах з різними нормальними середніми тисками в плямі контакту, а саме:

- зниження витрат потужності та збільшення кута долання підйому на середньо- і сильно деформованих ґрунтах;
- зменшення впливу тиску повітря в шинах при збільшенні числа осей;
- зниження тиску повітря в шинах на слабдеформованих ґрунтах щодо оптимального значення збільшує витрати потужності, але дозволяє збільшити кут подоланого підйому.

Як виявив В. В. Ларін, кількісне покращання параметрів опорної прохідності при зміні тиску повітря в шинах залежить від низки чинників, а саме від типу ґрунту, розмірів рушія та нормальних середніх тисків, що визначають несучу здатність ґрунтової основи.

Усіма вищезазначеними авторами визнається значущість процесу регулювання тиску повітря в шинах, більшість із них приділяє цьому чиннику значну увагу у своїх дослідженнях впливу конструктивних чинників на прохідність КМ. Автори зазначають, що зі зміною тиску повітря в шинах і кожним новим проходом колеса по ОП, фізико-механічні характеристики ґрунту і товщина шару ґрунту, що деформується, змінюються. Незважаючи на загально визнане величезне значення зміни тиску повітря в шинах при русі в умовах бездоріжжя, дуже мало уваги приділяється необхідності встановлення раціонального тиску повітря в кожному колесі залежно від типу ОП, навантаження, що припадає на колеса, та умов взаємодії колеса, що деформується, з ґрунтом.

Постановка завдання. Метою дослідження є оцінка ефективності підвищення показників прохідності та мобільності (насамперед максимально можливої швидкості руху) повнопривідних автомобілів на бездоріжжі за допомогою роздільного регулювання тиску в шинах. Для досягнення мети поставлені такі завдання:

- розробка математичної моделі і дослідження мобільності повнопривідних автомобілів на бездоріжжі у взаємозв'язку з характеристиками автомобіля, тиском повітря в шинах та різними типами ОП;
- аналіз отриманих результатів і оцінка адекватності розробленої комп'ютерної моделі.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до поставленого завдання опрацьована раніше структура алгоритму імітаційного моделювання руху автомобіля бездоріжжям у програмному

середовищі MATLAB Simulink [2; 3] потребує певних змін. Відповідно до вищезгаданого завдання було розроблено підсистему роздільного регулювання тиску в шинах, що дозволяє відтворити такі варіанти руху різними ОП:

- рух з мінімально допустимим тиском у шинах – p_0 ;
- рух з номінальним тиском у шинах – p_w ;
- рух із різним тиском у шинах у такому співвідношенні: $p_1 = 0,2p_w$, $p_2 = 0,5p_w$, $p_3 = 0,6p_w$, $p_4 = 0,7p_w$.

Максимально можлива швидкість руху визначалася для декількох зразків повнопривідної КМ, короткі технічні характеристики яких наведені в табл. 1, при русі трьома ділянками бездоріжжя (табл. 2). Результати моделювання подані на рис. 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики повнопривідних КМ

Table 1. Technical specifications of all-wheel drive vehicles

Назва	Колісна схема	Маса, кг	Потужність двигуна, кВт	Шини	Мінімальний тиск в шинах p_0 , мПа	Максимальний тиск в шинах p_w , мПа
КрАЗ 5233	4x4	12 000	265	530/75 R21	0,08	0,49
КрАЗ 6322	6x6	18 000	265	530/75 R21	0,08	0,49
БТР-4	8x8	24 000	460	365/80 R18	0,05	0,29

Таблиця 2. Фізико-механічні властивості досліджуваних ОП

Table 2. Physical and mechanical properties of the investigated off-road sections

Ділянка	СІ, кПа
Заболочений торф	200
Сухий пісок	350
Пластичний суглинок	500

З метою якісної оцінки отриманих у процесі моделювання результатів (рис. 2), варто відзначити таке:

- стосовно мобільності роздільна система регулювання тиску демонструє стабільно вищу ефективність незалежно від типу ґрунту та колісної схеми, у той час як ефективність централізованої падає на 50 % при русі зв'язними ґрунтами;

на заболочених ґрунтах обидві системи показали однакову ефективність, це пояснюється тим, що болото не ущільнюється і всі колеса рухаються в однакових умовах.

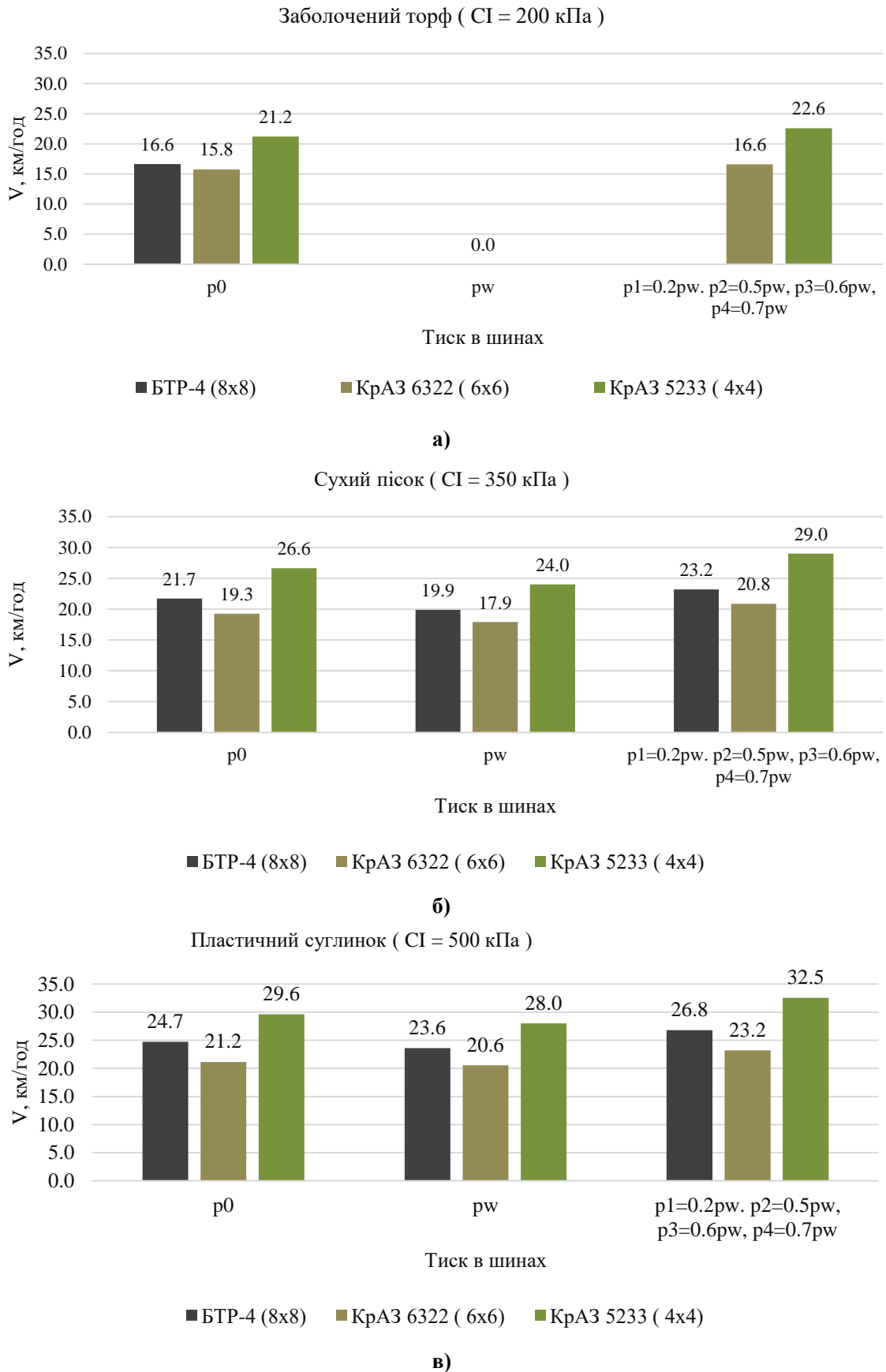


Рис. 1. Максимальна швидкість руху КМ: торфом (а), піском (б) та суглинком (в) за різного тиску в шинах

Fig. 1. Maximum speed of off-road movement of vehicles at different tire pressures

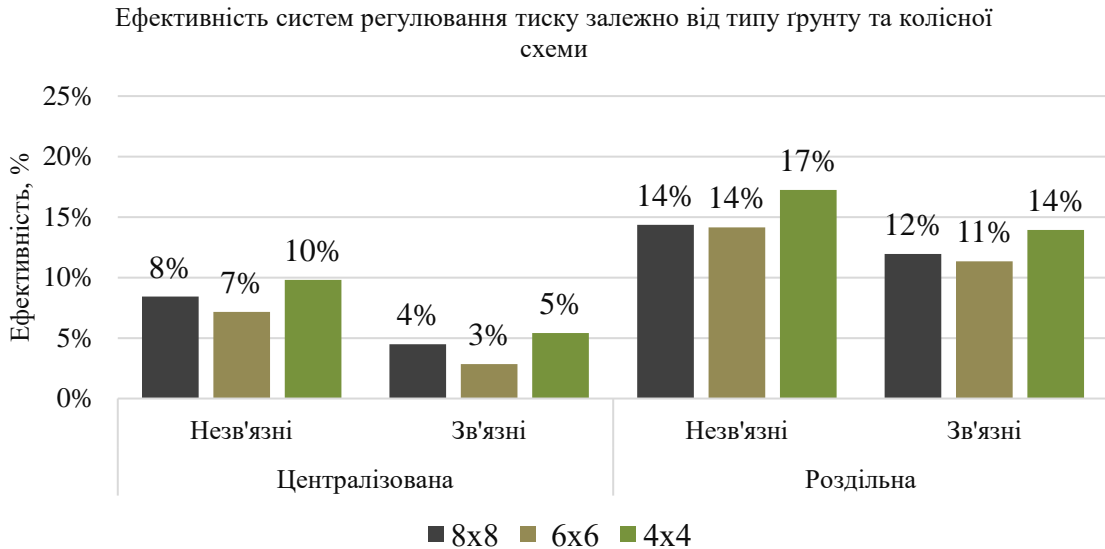


Рис. 2. Порівняльна оцінка ефективності систем регулювання тиску в шинах
Fig. 2. Comparative evaluation of the effectiveness of the tire pressure regulation systems

Висновки. Отже, опрацьована в програмному середовищі MATLAB Simulink імітаційна модель руху КМ бездоріжжям з можливістю роздільного регулювання тиску в шинах дає змогу оцінити ефективність підвищення показників прохідності та мобільності повнопривідних автомобілів на бездоріжжі за допомогою роздільного регулювання тиску в шинах. Результати моделювання показали, що роздільна система регулювання тиску в шинах показала стабільно вищу на 50% ефективність порівняно з централізованою системою, незалежно від типу ґрунту та колісної схеми автомобілів. Отримані результати потребують, звичайно, відповідних експериментальних дослідів та оцінки рівня адекватності і є основою параметричної оптимізації системи розподілу тиску в шинах повнопривідних КМ.

Бібліографічний список

1. Агейкин Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Москва: Машиностроение, 1972. 184 с.
2. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України*. 2020. № 2. С. 21-28.
3. Грубель М. Г., Фтемов Ю. О., Хома В. В. Експериментальні дослідження параметрів опорної прохідності зразків колісної військової автомобільної техніки. *Системи озброєння та військова техніка*. 2019. № 4(60). С. 7-15.
4. Кошарный Н. Ф. Техничко-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости. Киев: Вища шк., 1981. 208 с.

5. Ларин В. В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2007. 419 с.

6. Усиков В. Ю. Повышение проходимости автомобилей многоцелевого назначения путем децентрализации регулирования давления воздуха в шинах: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2015. 167 с.

7. Janosi Z., Hanamoto B. The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. *Jnt. Conf. On the mechanics of S-V Systems*, 1-st, 1961, Report № 44.

8. Jo-Yung-Wong J., Reece A. R. Soil failure beneath rigid wheels. *Proc. 2-nd Jnt. Conf. Jnt. Soc. For Terrain Vehicle Systems-University of Toronto Press*, 1966. P. 425-445.

9. Reece A. R. The shape of the form tractor. *Proc. Inst. Mech. Engrs*. 1969-1970. Vol.184, part 3Q. P. 45-77.

10. Wong J. Y. Data processing methodology in the characterization of the mechanical properties of terrain. *Journal of Terramechanics*. 1980. Vol. 17, № 1. P. 13.

11. Wong J. Y. Optimization of the tractive performance of four wheel-drive off-road vehicles. *SAE Transactions*. 1970. Vol. 79, Pap. 700723. P. 23-65.

12. Wong J. Y., Reece A. R. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses. *Journal of Terramechanics*. 1967. Vol. 4, № 2. P. 7-25.

13. Wong Y. J. Theory of ground vehicle London. London; NewYork: Mc-GrawHill Booh Comp., 1993. 423 с.

Стаття надійшла 09.05.2023

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ ГІБРИДНОГО ПРИВОДУ АВТОМОБІЛЯ ВИСОКОЇ ПРОХІДНОСТІ

Любомир Крайник¹, д. т. н., Андрій Кіхтан¹, аспірант,
Юрій Габрієль¹, Анатолій Ужва², к.т.н

¹Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна
l.kraynyk@gmail.com, kwest@ukr.net

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,
uzhva_av@ukr.net

Крайник Л., Кіхтан А., Габрієль Ю., Ужва А. Методичні засади визначення базових параметрів гібридного приводу автомобіля високої прохідності

Гібридний привід знаходить зростаюче розповсюдження та вже присутній практично в більшості класів нової модельної генерації військової автотехніки (ВАТ) країн НАТО. Водночас як самі схеми приводу, так і базові параметри агрегатів приводу для умов бездоріжжя суттєво відрізняються від уже серійних гібридних приводів легкових автомобілів та повнопривідних кросоверів загального призначення і тих, що призначені для автоторіг з твердим покриттям. Проведений аналіз уже відомих конструкцій ВАТ з гібридним приводом дозволяє констатувати домінування інших, так званої послідовної (seriell) або змішаної (mish-hybrid) схем приводу, методика визначення необхідних базових параметрів основних агрегатів яких для умов бездоріжжя у загальнодоступних джерелах інформації фактично відсутня. Відповідно запропоновано визначення необхідних значень потужності тягового електродвигуна та системи «двигун внутрішнього згоряння – генератор», ємності батарей у функції запасу автономного ходу на електротязі та необхідного передатного діапазону трансмісії для руху бездоріжжям та автоторогами з твердим покриттям.

Передатні числа головної передачі та понижувальної передачі роздавальної коробки (повнопривідна схема), або коробки передач (при моноприводі задньомоторного компонування) формуються з умов забезпечення як реалізації максимальної потужності тягового електродвигуна на швидкості понад 120 км/год при русі на асфальтобетонній дорозі, так і на швидкостях 40-60 км/год типовим розмоклим бездоріжжям (обмеження з умов граничних віброколивних навантажень).

Опрацьовані схеми гібридного приводу автомобілів для бездоріжжя дозволяють також режим використання системи «двигун внутрішнього згоряння – генератор» як джерела автономного постачання електроенергії, що особливо актуально в польових умовах, з проблемністю доступу до стаціонарних електромереж. Змішана схема приводу дозволяє також забезпечити можливість руху автомобіля, щоправда обмежену, при виході з ладу двигуна внутрішнього згоряння або тягового електродвигуна, що важливо для ВАТ.

Ключові слова: автомобіль, бездоріжжя, гібридний привід, потужність, трансмісія, запас ходу, схеми приводу.

Kraïnyk L., Kikhtan A., Habriiel Yu., Uzhva A. Methodology of determining the basic parameters of all-terrain hybrid vehicles

The hybrid drive is becoming increasingly popular and is now being used in most of the new model generation of military vehicles (MV) in NATO countries. However, the drive schemes and basic parameters of the drive units for off-road conditions are significantly different from those used in serial hybrid drives for passenger cars and all-wheel drive general-purpose crossovers designed for paved roads.

The analysis of known MV constructions with hybrid drives confirms the dominance of the so-called serial or mix-hybrid drive schemes. There is a lack of methodology for determining the necessary basic parameters of the main units of such construction for off-road conditions in available sources of information. Therefore, it is proposed to determine the required power values of the traction electric motor and the "internal combustion engine-generator" system, the battery capacity for electric traction range, and the necessary transmission range for driving off-road and on paved roads.

The gear ratios of the main gear and the low gears of the transfer case (all-wheel drive scheme) or the gearbox (in the case of a single-drive rear engine layout) are formed to ensure the realization of the maximum power of the traction electric motor at a speed of more than 120 km/h when driving on an asphalt road and at speeds of 40-60 km/h on a typical wet all-terrain (restriction due to the conditions of extreme vibrational loads).

The studied schemes of hybrid drive off-road vehicles also allow using the "internal combustion engine-generator" system as a source of autonomous power supply, which is especially relevant in field conditions with problematic access to stationary power networks. The mixed drive scheme also provides the possibility of vehicle movement, albeit limited, in the situation of the failure of either the internal combustion engine or the traction electric motor, which is important for MV.

Key words: vehicle, all-terrain, hybrid drive, power, transmission, range, drive schemes.

Постановка проблеми. Автомобілі високої прохідності з гібридним приводом почали з 2021 року надходити на озброєння провідних армій НАТО зі суттєвим запізненням порівняно до вже звичних гібридних авто, і зокрема повнопривідних кросоверів загального призначення [1]. Цей тип автомобілів, насамперед у варіанті з можливістю заряджання батарей і від зовнішньої електромережі (plug-in), є актуальним і для аграрної та лісогосподарської сфер, насамперед з погляду економії моторного палива та, звісно, екології. Специфіка умов використання автомобілів на бездоріжжі зумовила й кардинальні зміни як щодо схем гібридного приводу, так і технічних параметрів і характеристик базових агрегатів – дизельного двигуна, генератора, тягового електродвигуна, передавальних чисел роздавальної коробки та головної передачі. Метою дослідження є формування методичних засад розрахунку – визначення вищезазначених технічних параметрів гібридного приводу автомобіля для бездоріжжя (з врахуванням і умов руху на автодорогах загального призначення та відповідних вимог).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тематика гібридного приводу в автомобілебудуванні відносно недавно, в останні два десятиліття, стала предметом активних досліджень і промислової реалізації. У фундаментальних монографіях з гібридного приводу в загальних рисах опрацьовано методичні засади визначення необхідних (для конкретного класу автомобіля) значень потужності двигунів, передавальних чисел трансмісії та ємності батарей щодо насамперед паралельної схеми (parallel) приводу, що практично домінує в легкових автомобілях та кросоверах загального призначення [2-6]. Однак констатувати наявність єдиної, загальноприйнятої методики розрахунку навіть щодо домінуючої, паралельної схеми приводу не можна. В Україні наукові дослідження гібридного приводу автомобілів, насамперед відомої харківської школи [3], зосереджені на експлуатаційних властивостях уже серійних імпортованих автомобілів. Власне виробництво автомобілів цього типу та відповідно і досліджень у сфері конструктивного синтезу та параметричної оптимізації гібридного приводу немає. У нечисленних зарубіжних власне тематичних дослідженнях та дисертаційних роботах фактично теж характерною є відсутність єдиної, загальноприйнятої методики визначення необхідних характеристик агрегатів. Зокрема, у дисертаційній роботі В. Czarnik [7] розглянуто різні схеми приводу з точки зору коефіцієнта корисної дії, однак без деталізації вибору характеристик базових агрегатів, хоча безперечно дослідження є цікавим для етапу формування самої структури –

схеми приводу. Питання вибору параметрів агрегатів приводу детально розглянуті в дисертаційній роботі А. Balasz [8]. Дослідження проведено стосовно легкового автомобіля зі звичною паралельною схемою гібридного приводу та послідовного підбору характеристик агрегатів під різні типові умови руху автомобіля (міські та рух автострадою). У дисертаційній роботі F. Weiss [9], виконаній у співпраці з Volkswagen, детально розглянуто питання власне формування структури самого приводу з умов мінімізації витрати пального (тобто і в аспекті к.к.д.) для типових умов руху в місті. У ролі останніх на базі імітаційного моделювання руху послідовно були використані типові їздові тести/цикли для автомобілів категорії M1 – так званий європейський NEFZ, світовий WLTC та американський FTP-72, а також запропонований під типові умови руху у ФРН [9]. По суті, близьким є й дослідження – формування оптимальних характеристик батареї та безступеневої трансмісії (варіаторної – CVT – Continuously Variable Transmission) для паралельної схеми гібридного приводу [10].

Питання оптимізації гібридного приводу паралельної схеми опрацьоване і в роботі S. Gollbuff [11], де як інструментарій для оцінки – вибору оптимальних значень потужностей двигунів та ємності батарей використано спеціально опрацьовану комп'ютерну програму – Powertrain Systems Analysis Toolkit (PSAT). Дослідження проведено, однак тільки щодо паралельної схеми приводу легкових автомобілів. Актуальною для послідовної схеми приводу є дослідження щодо вибору оптимальних значень передавальних чисел трансмісії при відомому тяговому електродвигуні під умови руху типовим їздовим європейським тестом/циклом NEFZ та мінімізації енергозатрат при фіксованій відповідно до циклу NEFZ (NEDC) динаміці руху [12]. У цьому дослідженні (зрештою, як і у вищезгаданих) оцінка ефективності вибору параметрів базових двигунів приводу базується на порівняльній оцінці результатів імітаційного моделювання руху у зазначених їздових циклах при покрокових змінах цих параметрів.

Фактично визначення цих параметрів базується на методі ітераційного, покрокового пошуку з прив'язкою до певних типових умов руху – їздових циклів/тестів.

У цьому плані заслуговують на увагу дослідження [13; 14], що безпосередньо присвячені розрахунку – вибору основних параметрів базових агрегатів приводу. Для паралельної схеми приводу використано різні алгоритми оптимізації з умови мінімізації витрати моторного пального, зокрема так званий Algorithmen Dividing Rectangles Complex (DIRECT) [14], а для оцінки ефективності отриманих результатів – уже відоме

програмне середовище імітаційного моделювання руху автомобіля ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator). Для розрахунку витрати моторного пального використовується теж уже достатньо розповсюджена програма Powertrain Systems Analysis Toolkit (PSAT). Фактично ці ж програмні середовища використані і в праці J. Nan [15], що присвячена визначенню оптимальної ємності паливних елементів (fuel cell), у випадку їхнього використання замість літій-іонних акумуляторів у гібридному приводі паралельної схеми для легкових автомобілів (аналогічно як і в дослідженні O. Hegazy та J. van Mierlo [16] та дисертаційній роботі L. Sarioglu [17]). Використання паливних елементів для ВАР з гібридним приводом в умовах бойових дій з обмеженими можливостями підзарядки від стаціонарної електромережі є актуальним, однак визначення необхідної ємності паливних елементів необхідно провести уже для іншої схеми приводу, характерної для цього класу машин. Фактично параметричної оптимізації гібридного приводу послідовної (seriell) схеми, що домінує у відповідних моделях ВАР, присвячена праця A. Hasanzaden [18], однак щодо міських автобусів з характерним циклічним рухом на автодорогах I категорії. В основу алгоритму параметричної оптимізації приводу покладено дещо інші алгоритми – так званий Genetic Algorithm, використання якого характерне і для дослідження J. P. Ribau [19], представленого на черговому світовому науковому конгресі з автомобілебудування FISITA у 2012 р. та теж присвяченого приводу за послідовною (seriell) схемою щодо міських автобусів, де вона набула розповсюдження. Параметрична оптимізація приводу послідовної схеми, нетипової щодо легкового автомобіля з прив'язкою до так званого світового реального їздового циклу є предметом дослідження R. Patil [20]. Водночас є конструкції автобусів та легких вантажівок категорій M2/N2 з паралельною схемою приводу, що є предметом дослідження C. Dessai та S. Williamson [21] з врахуванням відповідної специфіки умов роботи приводу. При цьому використано два критерії: цільові функції оптимізації – мінімізація витрати палива та емісії токсичних компонентів у відпрацьованих газах (з використанням вищезгаданої програми PSAT). Шляхом послідовного перебору різних значень 7 параметрів приводу (так званого повного гібрида – Vollhybrid, без використання схеми заряджання батарей від зовнішньої електромережі – plug-in) визначена краща комбінація значень базових параметрів приводу. Схема повного гібрида паралельної схеми є предметом дослідження D. Buerchel та ін. [22] з умов визначення найкращого

поєднання значень потужностей двигуна внутрішнього згоряння та електричного двигуна/генератора та ємності батареї з умови збереження заряду батареї після проїзду легковим автомобілем нового європейського їздового циклу NEFZ/NEDC.

Двокритеріальний підхід щодо оптимізації параметрів приводу є характерним і для дисертаційної роботи S. Moses [23], виконаної у технічному університеті Берліна, та публікації M. Jain [24] щодо автобуса з використанням паливних елементів. При цьому у роботі [23] щодо визначення параметрів агрегатів, що забезпечують рух легкового автомобіля на ефектотязі (без використання двигуна внутрішнього згоряння, що є актуальним і в нашому випадку) у ролі критеріїв оптимізації використано значення запасу автономного ходу на батареї та вартість батарей. У роботі [24] – енергозатратність руху та вартість паливних елементів. Двокритеріальний підхід до визначення параметрів приводу характерний і для дисертаційної роботи B. S.-M. Fan [25] та публікації M. Hammadi [26].

Окремо слід виділити дослідження, що пов'язані з реальними конструкціями автомобілів категорії M1 концерну Volkswagen – VAG [27; 29], де детально опрацьовано формування необхідних потужностей бензинового двигуна (щоправда, стосовно паралельної схеми приводу) та тягових електромоторів з прив'язкою до типових умов руху – тут до їздового циклу NEFZ/NEDC, що є логічним з точки зору використання цього циклу/тесту у нормативній базі – Правилах ЄЕК ООН при проведенні сертифікації – оцінки експлуатаційних властивостей автомобілів загального призначення.

Постановка завдання. Проведений огляд та аналіз доступних у відкритих джерелах досліджень у сфері параметричної оптимізації гібридного приводу автомобілів засвідчив фактичну відсутність єдиної загальноприйнятої методики визначення параметрів базових вузлів приводу. Відомі дослідження базуються на засадах варіативного підбору параметрів з оцінкою ефективності на базі результатів імітаційного моделювання руху у типових умовах, здебільшого типових їздових циклів для легкових автомобілів. Інформація щодо вибору для повнопривідних автомобілів для бездоріжжя, зі зрозумілих причин специфіки основної сфери використання такої техніки, фактично відсутня. Таким чином, метою дослідження є формування, на основі проведеного огляду, методичних основ визначення необхідних параметрів/характеристик основних вузлів гібридного приводу нестандартної схеми [1] повнопривідного автомобіля високої прохідності.

Виклад основного матеріалу. З вище викладеного випливає однозначна нереальність використання класичних методів теорії автомобіля щодо визначення необхідної потужності двигуна та параметрів трансмісії з умов динаміки та енергетики руху та реальне застосування двоетапної процедури варіативного підбору параметрів базових агрегатів гібридного приводу з оцінкою ефективності в типових умовах руху та послідовним уточненням – оптимізацією параметрів з умов обраних критеріїв (енергозатратності руху/ лінійної витрати моторного палива – електроенергії, чи ще, додатково, емісії токсичних компонентів чи вартості основних елементів приводу, насамперед батарей). У даному випадку додатково накладаються різноманітність умов руху бездоріжжям, насамперед опорними поверхнями (ОП), що деформуються, з необхідністю використання додатково відповідних емпіричних залежностей щодо взаємодії шин з ОП та динаміки руху складним рельєфом [29]. У цьому плані окремо слід виділити додатково й певні специфічні вимоги щодо переборення /переїзду автомобілями цієї сфери використання певних макропрофільних перешкод – підйомів, ескарпів, канав тощо, що формує значення понижувальної передачі роздавальної коробки трансмісії [30]. З аналізу доступної бази

патентів США та ЄС щодо власне схем і структур гібридного приводу повнопривідних автомобілів для бездоріжжя, як от наприклад [31], випливає, що паралельна схема приводу, що домінує в серійних автомобілях [2–6], не є розповсюдженою і використовується тільки у малотоннажних моделях з включенням другої ведучої осі за схемою так званого «електронного кардана» з окремим тяговим електродвигуном приводу цієї осі. Більш розповсюдженою є послідовна (seriell) схема, зрідка з можливістю переходу у важких умовах руху на змішану (mish-hybrid) [1]. Комп'ютерне моделювання руху з гібридним приводом послідовної схеми (на прикладі автобуса) опрацьовано в роботі [32], однак для умов бездоріжжя суттєво ускладнюється не тільки через введення опису деформації ОП, роздільно для передньої та задньої осей, а й щодо введення пружно-демпфуючих характеристик підвісок кожної з осей та врахування – розрахунку принаймні поздовжніх кренів та динаміки перерозподілу навантажень на осі. Відповідно, у розвиток раніше опрацьованої еквівалентної моделі руху автомобіля з класичним приводом від двигуна внутрішнього згоряння для програмного середовища MATLAB Simulink [33; 34] динаміка та енергетика (у кВт/100км та л/100км) руху описується системою рівнянь (рис. 1):

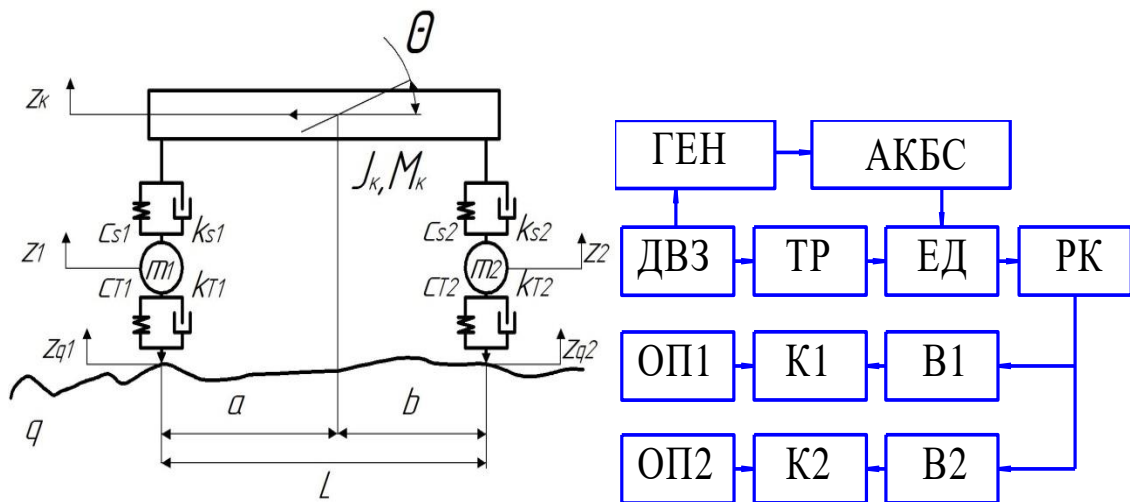
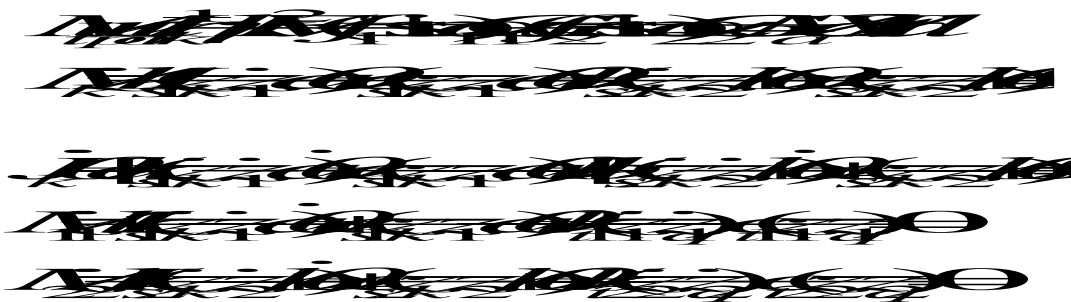


Рис. 1. Еквівалентна динамічна схема автомобіля схеми 4x4 на бездоріжжі (а) та структура гібридного повного приводу послідовної-змішаної схеми (б), де ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння, ЕД – тяговий електродвигун, ТР – вузол узгодження кінематики ДВЗ та ЕД при змішаній схемі приводу, ГЕН – електрогенератор, АКБС – батарея акумуляторів з системами інвертора та контролю, РК – роздавальна коробка, В1, В2 – передня та задня ведучі осі, К1, К2 – відповідно колеса/шини, ОП1, ОП2 – фізико-механічні характеристик ОП під передньою та задньою осями

Fig. 1. Equivalent dynamic diagram of the off-road 4x4 car scheme (a) and hybrid all-terrain drive structure of the mixed scheme (b), where ICE – internal combustion engine, TM – traction motor, TP – unit of kinematic coordination of ICE and TM under mixed drive, GEN – electric generator, BIMS - battery with inverter and monitoring systems, TC – transfer case, B1, B2 – front and rear drive axles, K1, K2 – wheels respectively, SS1, SS2 – physical and mechanical characteristic of SS (support surface) under the front and rear axles



де для послідовної схеми: $M_t = M_{ed}$, змішаної – $M_t = M_{ed} + M_d$,

де $z_k, z_1, z_2, z_d, z_{cp}$ – відповідно вертикальні переміщення підресорених мас (кузова), передніх та задніх непідресорених мас (осей), висот мікропрофілю опорної поверхні під передньою та задньою осями,

M_k, M_1, M_2 – підресорені маси автомобіля та непідресорені маси передньої та задньої осей;

$c_{s1}, c_{s2}, k_{s1}, k_{s2}$ – відповідно пружні та демпфуючі характеристики передньої (1) та задньої (2)

підвісок;

$c_{r1}, c_{r2}, k_{r1}, k_{r2}$ – пружні та демпфуючі характеристики шин на передній та задній осях;

θ – кут поздовжнього крену кузова;

M_t – крутний момент двигуна приводу ведучих коліс, де M_{ed} – тягового електродвигуна,

M_d – двигуна внутрішнього згорання, K – коефіцієнт трансформації моменту у трансмісійному вузлі з'єднання ДВЗ з ЕД (рис. 1,б);

u_p, u_0 – передавальні числа роздавальної коробки та головної передачі;

η_t – к.к.д. трансмісії; r_k – радіус кочення колеса;

kF – коефіцієнт аеродинамічності та площа поперечного перерізу кузова автомобіля;

f_1, f_2 – коефіцієнти сумарного опору рухові коліс (коченню та деформації ґрунту) кожної з осей;

α_1, α_2 – кут поздовжнього нахилу опорної поверхні/бездоріжжя;

M_a – маса автомобіля; δ – коефіцієнт інерції обертливих мас.

Слід зазначити, що математична модель опису руху тут двовісного автомобіля без доріжжям суттєво відрізняється від звичної для автодоріг з твердим покриттям одномасової еквівалентної моделі у зв'язку з: для зволжених ґрунтових та сухих піщаних поверхонь значення коефіцієнтів зчеплення шин з ОП та сумарного опору рухові зближені між собою і часто власне домінують для формування динаміки руху є обмеження сили зчеплення шин з ОП з необхідністю розрахунку та контролю співвідношення з потенційно тяговим зусиллям на кожному з кроків числового інтегрування рівняння (1); макро- і мікропрофіль ОП під передньою та задньою осями звично відчутно відрізняється і далекий від горизонтальної рівної поверхні автодоріг та зумовлює суттєві коливання кузова, насамперед у вертикальній площині, та поздовжні крени, що, своєю чергою, змінюють динаміку перерозподілу навантажень на осі та взаємодію шин з ОП; умови взаємодії шин передньої та задньої осей з ОП, що деформується, суттєво

відрізняються як за різного опору деформації ОП – формування колії (насамперед при прямо-лінійному русі), так і вищезазначених коливань значень навантажень на осі.

Паралельне числове інтегрування системи рівнянь (2)-(5) дозволяє не тільки отримати динаміку змін статичних навантажень на осі G_1 і G_2 , а й через фільтр зіставлення з відповідними граничними значеннями сил зчеплення шин з ОП та роботи/блокування міжосьового диференціала, коригувати максимальне значення сили тяги. Останнє може бути і нижчим відповідного значення крутного моменту зовнішньої характеристики двигуна для взаємопов'язаних частот обертання вала двигуна – швидкості руху. Аналітичний опис взаємодії коліс з ОП/бездоріжжям базується на загальноприйнятих (окрім СРСР/РФ) у террамеханіці емпіричних залежностях, що забезпечують достатню збіжність результатів моделювання і експерименту [29; 34].

приводу є енергозатратність руху, що, своєю чергою, власне і формує значення необхідної ємності батарей як з умов забезпечення так званого нульового енергобалансу в типових умовах руху, так і визначального для військових гібридних автомобілів запасу автономного ходу на електротязі (з умов локалізації руху тепловізорами противника). Це, своєю чергою, є базовим для визначення необхідних характеристик системи «двигун внутрішнього згоряння – генератор» (зокрема з умов роботи двигуна в зоні мінімальних питомих витрат палива та часткового завантаження – забезпечення необхідного експлуатаційного ресурсу).

Враховуючи розмаїття умов руху бездоріжжям, слід констатувати доцільність використання в цьому разі режиму руху зі швидкістю 40-45 км/год розмоклим, фактично у зоні переходу до пластичного стану ґрунтовим бездоріжжям зі значенням комплексного показника фізико-механічних характеристик ОП – конусного індекса СІ 380-420 кПа та менш характерної для України сухої піщаної поверхні з значеннями СІ в діапазоні 1-20 кПа [36; 37]. Сумарне передавальне число трансмісії (добуток відповідних чисел

понижувальної передачі роздавальної коробки та головної передачі) задається кінематикою виходу на частоту обертання вала тягового електродвигуна – виходу на максимальну потужність та початку зниження максимального крутного моменту [1].

Отримане значення необхідної потужності необхідно перевірити на умови забезпечення регламентованих в арміях НАТО максимальної швидкості 110-120 км/год на асфальтобетоні та крутість підйому. Фактично ці два етапи розрахунку – імітаційного моделювання в програмному середовищі MATLAB Simulink [34] дозволяють уточнити й розмежувати передавальні числа головної передачі та понижувальної в роздавальній коробці (рис. 2). Це дозволяє перейти до розрахунку необхідних потужностей генератора та двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) приводу, необхідними передумовами чого є оцінка – розрахунок енергозатратності руху для вищезгаданих умов (кВт/100км) та відповідної необхідної ємності батарей для забезпечення заданого автономного запасу ходу на електротязі (при непрацюючому ДВЗ), див. рис. 2.



Рис. 2. Структура алгоритму розрахунку необхідних характеристик базових агрегатів гібридного приводу послідовної схеми автомобіля для бездоріжжя

Fig. 2. Structure of the algorithm for analyzing the necessary characteristics for the basic units of hybrid drive serial scheme of all-terrain car

Отримані попередні результати, що вимагають ще оцінки адекватності моделі результатам експериментальних досліджень, засвідчили, що для легкого автомобіля для бездоріжжя повною масою 1400 кг (типу тактичне багі КВ 02 «Мамай» [1]) достатньо потужності тягового електродвигуна 50 кВт (65 кВт при використанні причепа категорії О1) при передавальних числах головної передачі в діапазоні 3,9-4,1 та пони-

жувальної передачі роздавальної коробки в діапазоні 2,5-2,7 (колеса 225/80R15). Необхідна ємність батарей для 20 км запасу ходу типовим бездоріжжям становить 7-8 кВт.год, потужність електрогенератора (з умов дотримання балансу акумуляторів) – близько 30 кВт, відповідно з умови роботи ДВЗ у зоні мінімальних питомих витрат палива, двигун робочим об'ємом 0,9-1,2 л.

Змішана, послідовно-паралельна схема приводу (mish-hybrid) потребує відповідних змін вищевикладеної методики і є предметом подальших досліджень.

Висновки. Очевидна необхідність розробки, промислового виробництва та поставок в умовах війни ЗС України автотехніки з гібридним приводом для бездоріжжя, що дозволяє на порядок збільшити дистанцію локації руху тепловізорами ворожої бронетехніки, потреба в яких підтверджується як вітчизняними публікаціями [39; 40], так і вже прийняттям на озброєння машин цього типу в арміях НАТО [41] зумовила опрацювання відповідних методик теорії і конструктивного синтезу машин цього типу. Зрозуміло, що вимоги екології в цій сфері, на відміну від автомобілів загального призначення, не є першочерговим пріоритетом. Однак, окрім військової, автомобілі з гібридним приводом для бездоріжжя є актуальними і для аграрної та лісогосподарських сфер, ремонтних бригад у польових умовах – як з погляду економії моторних палив, так і як мобільне джерело електроенергії для живлення відповідного обладнання.

Вищевикладені методичні основи дозволяють здійснити при відомих значеннях повної маси автомобіля поетапний розрахунок необхідних значень потужності тягового електродвигуна та передавальних чисел двоступеневої роздавальної коробки та головної передачі з умов забезпечення заданих необхідних максимальних швидкостей руху як на асфальтобетонних дорогах, так і незначно зволоженого бездоріжжя. Окрім того, залежно від заданого значення запасу автономного ходу тільки на електротязі – необхідну ємність батарей та потужність системи «двигун внутрішнього згоряння – генератор» (для схеми послідовного гібридного приводу).

З врахуванням актуальних потреб у військовій автотехніці на базі наведеної методики визначені необхідні параметри та характеристики гібридного приводу легкого ударного автомобіля переднього краю – багті ТУР КВ 02Н [1]. Звичайно, для автомобілів інших вагових категорій та сфер використання (аграрна чи лісогосподарська) необхідні відповідні уточнення, зрештою як і для змішаної схеми приводу.

Бібліографічний список

1. Концептуальні основи формування гібридного приводу автомобіля високої прохідності / Л. Крайник, А. Кіхтан, В. Кохан, М. Волошук. *Військово-технічний збірник НАСВ ім. гетьмана П. Сагайдачного*. 2022. № 27. С. 10-18.
2. Hofmann P. *Hybridfahrzeuge*. Wien und New York: Springer Verlag, 2010. 348 s.

3. Гібридні автомобілі / О. В. Бажинов, О. П. Смирнов, С. А. Серіков, А. В. Гнатов, В. А. Колесніков, під ред. О. В. Бажинова. Харків: ХНАДУ, 2008. 327 с.

4. Reif K. *Konventionrller Antriebsstrang und Hybridantriebe: mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen /Vieweg+Teubner Verlag*, 2010.

5. Reif K., Noreikat K. E. *Krafffahrzeug-Hybridantriebe: Grundlage, Komponenten Systeme, Anwendungen. /ATZ/MTZ-Fachbuch*. Vieweg Verlag, 2012. 438 s.

6. Chris Mr., Abul Masrur, David W. Goo. *Hybridfahrzeuge.Grundlagen und Anwendungen mit Perspektiven fuer die Praxis /Wiley-VCH Verlag*. Weinheim, 2014. 512 s.

7. Czapnik B. *Methodik zur Synthese, Analyse und Bewertung von Antriebskonzepten: Dissertation*, TU Braunschweig, Shaker Verlag, 2013. 192 s.

8. Balazs A. *Optimierte Auslegung von ottomotorischen Hybridantriebsstraengen. unter realen Fahrbedingungen: Dissert. Dr-Ing., RWTH Aachen*, 2015. 176 s.

9. Weiss F. *Optimale Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstraenge: Dissertation*. TU Chemnitz, AutoUni-Schriftenreihe, Bd.122, Springer Verlag, 2017. 192 s.

10. Zoelch U. *Ein Beitrag zu optimaler Auslegung und Betrieb von Hybridfahrzeugen. Berichte aus der Fahrzeugtechnik*. Shaker Verlag, 1998.

11. Gollbuff S. *Design Optimization of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle. SAE Technical Paper Series SAE International*. 2007.

12. Sensitivity Study on the Design Methodology of an Electric Vehicle / F. Le Berr et al. *SAE Technical Paper Series*. 2012.

13. GaoW., Mi C. *Hybrid Vehicle Design using global optimisation Algorithms. Int. Journal of Eletric and HybridVehicles*. 2007. No. 190. P. 57-70.

14. *Optimal Design of automotive hybrid powertrain systems / R. Fellini et al. EcoDesign 99: First international Symposium. Enviromentally Consious Design and Inverse Manufacturing*, 1999. P. 400-405.

15. *Optimal design of hybrid fuell cell vehicles / J. Han et al. Proceedings of the 4th International Conference on Fuell Cell Science. Engineering and Technology*. 2006. P. 273-282.

16. Hegazy O., van Mierlo J. *Particle Swarm Optimization for optimal powertrain component sizing and design of fuel cell hybrid electric vehicle. 12th International Conference on : Optimation of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*. 2010. P. 601-609.

17. Sarioğlu L. *Conceptual Design of Fuel-cell Vehicle Powertrains: Dissertation*. TU Braunschweig, 2013. 192 s.

18. *Optimum Design of Series Hybrid Electric Buses by Genetic Algorithm / A. Hasanzadeh et al.. Proceedings of the IEEE International Symposium on: Industrial Electronics*. 2005. Bd. 4. P. 1465-1470.

19. *Plug-in hybrid vehicle powertrain design optimization: energy consumption and cost / J. P. Ribau et al. FISITA World Auomotive Congress. FISITA-Paper*, 2012.

20. *Design Optimization of a Series Plug-in hybrid Electric Vehicle for Real-world driving conditions / R. Patil et al. SAE International Journ Engines*. 2010. No. 3.1. P. 655-665.

21. Desai C., Williamson S. S. Particle swarm optimization for efficient selection of hybrid electric vehicle design parameters. *IEEE: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2010. P. 1623-1628.
22. Verification of the optimum hybridization factor as design parameter of hybrid electric vehicles / D. Buecherl et al. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2009. VPPC09. P. 847-852.
23. Moses S. Optimierungstrategien fuer die Auslegung und Bewertung energieoptimalen Fahrzeugkonzepte: Dissertaion. Dr.-Ing., TU Berlin, 2014.
24. Genetic algorithm based optimal powertrain component sizing and control strategy design for a cell hybrid electric bus / M. Jain et al. *Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2009. vPP09, IEEE 2009. P. 980-985.
25. Fan B. S.-M. Multidisciplinary Optimization of Hybrid Electric Vehicles: Component Sizing and Power Management Logic: Dissertation. University of Waterloo, Canada, 2011. 172 p.
26. Multidisciplinary approach for modeling and optimization of Road Electric Vehicles in conceptual design level / M. Hammadi et al. *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*. 2012. P. 1-6.
27. Pischinger S., Seibel J. Optimierte Auslegung von Ottomotoren in Hybrid-Antriebsstraengen. *ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift*. 2007. H.7. S. 36-41.
28. Eghtessad M. Optimale Antriebsstrangkonfigurationen fuer Elektrofahrzeuge: Dissertation. Dr.-Ing., TU Braunschweig, Shaker Verlag, 2014. 184 s.
29. Wong Y. J. Theory of ground vehicle. London; New-York: Mc-Graw Hill Book Co., 1993.423 p.
30. Крайник Л., Сенишак М. Особливості вибору передатних чисел роздавальної коробки трансмісії автомобіля високої прохідності. *Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання: тези доп. 25-26 березня 2021 року*. Львів: Вид-во НУ «ЛП», 2021. С. 105-106.
31. Patent US No 20170355259A1 Hybrid Utility Vehicles, Jun.5, 2017. 37 p.
32. Крайник Ю. Л., Гула О. І. Моделювання динаміки та енергетики циклічного руху міського автобуса з різними типами приводу. *Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. Вісник НУ „Львівська політехніка”*. Львів, 2015. С. 177-180.
33. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Автошляховик України*. 2020. № 2. С. 21-28.
34. Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прохідність військових автомобілів. Київ: ВД „Професіонал”, 2023. 182 с.
35. Velordocchia M., Rondinelli E. Design and Development of Motors Hybrid Vehicle for Military Applications. *SAE Technical Paper*. 2010. 01-0659, 2000. 20 p. URL: [www.sae.org> publications>technical papers>2010-01-01659](http://www.sae.org/publications/technicalpapers/2010-01-01659) (Last accessed: 22.04.2023).
36. Development of Design Tool for Hybrid Power Systems of Hybrid Electric Military Combat Vehicles / Dong Wang Choi et al. URL: [https://www.iri.upc.edu>VPPC_10>uploads>PDF>paper>95-69868.html](https://www.iri.upc.edu/VPPC_10/uploads/PDF/paper>95-69868.html) (Last accessed: 14.04.2023).
37. Combined Battery Design Optimization and Energy Management of Series Hybrid Military Truck / Lifan Liu et al. URL: https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/jnri_PDF/Journals/32.pdf (Last accessed: 10.04.2023).
38. Mayer M. Analyse gesamtsystematischer Zusammenhaenge von hybriden Antriebsstrangkonzepthen bezueglich kundenrelevanten Anforderungen: Dissertation. Dr.-Ing., TU Siegen, 2020. 212 s.
39. Кондратенко О. П., Дубина О. М. Оцінювання енергетичних параметрів силової установки транспортного засобу з гібридною трансмісією на різних швидкісних режимах роботи. *Озброєння і військова техніка, спеціальні засоби: зб. наук. праць Академії внутрішніх справ МВСУ*. Харків, 2009. Вип. 2 (14). С. 4-9.
40. Удосконалення електричної складової електробагі подвійного застосування / О. Литвин, В. Скляр, В. Сікалюк, Д. Сахно. *Технічні науки та технології: зб. наук. праць ЧДДТУ*. 2019. № 4 (19). С.155-161.
41. Mittal V., Novoselich B., Rodriguez A. Hybridization of US Army Combat Vehicles. *SAE Technical Paper* 2022-01-0371. doi: 10.4271/2022-01-0371.

Стаття надійшла 12.05.2023.

ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ

²Олег Сукач, к. т. н., ¹Юрій Габрієль, ²Віктор Шевчук, к. т. н., ¹Степан Хімка, к. т. н., ¹Мирон Магац, к. т. н., ²Андрій Домінік, к. т. н.

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,
вул. Клепарівська, 35, м. Львів, Україна

Сукач О., Габрієль Ю., Шевчук В., Хімка С., Магац М., Домінік А. Обґрунтування способу керування маніпуляторними установками вантажних автомобілів

Під час перевезень часто виникає необхідність завантаження або розвантаження вантажів поза межами стаціонарних складів, у полі тощо. Для цих потреб прийнято використовувати вантажні автомобілі, обладнані маніпуляторами. Найчастіше в маніпуляторах використовується гідропривід, який забезпечує належну потужність і продуктивність й може інтегруватись у штатну гідросистему автомобіля.

Для обґрунтування ефективної системи керування гідроприводом маніпулятора розроблено модель борта вантажного автомобіля, що складається з таких складових частин: бортова платформа, поворотний модуль, силова частина (стріла, балка), гідропривід, електротехнічна частина (привід, управління), вантажозахоплювач з сервоприводом.

Запропоновано раціональну модель електронної системи керування гідроприводом крана-маніпулятора для використання в універсальних кран-маніпуляторних установках на автомобільних, самохідних та причіпних шасі. Це дає можливість підвищити ефективність навантажувально-розвантажувальних операцій, зменшуючи при цьому кількість техніки та працівників, залучених до вантажопереробки поза межами складів.

Запропонована архітектура керування маніпуляторними установками з невисокою вартістю її реалізації та простим зрозумілим налаштуванням. Використання запропонованої технології та схеми електронного керування забезпечує управління складною системою приводів, дозволяє проводити гнучкі налаштування за потребою користувача. Наприклад, керувати кран-маніпулятором дистанційно через радіоканал чи обмежити величину ходу в певних напрямках.

Для управління виконавчими механізмами крана-маніпулятора використовувалася апаратно-обчислювальна платформа з мікроконтролером Arduino із середовищем розробки програмного забезпечення Processing/Wiring на мові програмування, яка є підмножиною C/C++ і забезпечує: безперерйну роботу механізмів під час роботи; їх пуск і гальмування; інформативність, точність і оперативність механізмів; мінімальні статичні та динамічні навантаження зі зниженою інерційною дією під час переміщення вантажу.

Ключові слова: кран-маніпулятор, гідропривід, сервопривід, електронна система керування.

Sukach O., Habriiel Yu., Shevchuk V., Khimka S., Mahats M., Dominik A. Justification of the method of controlling the manipulator installations of trucks

Transportation often requires loading and unloading cargo in areas beyond fixed warehouses, such as the field. To meet these needs, trucks equipped with manipulators are typically utilized. Hydraulic drives are commonly used in these manipulators, as they provide sufficient power and performance and can be easily integrated into a car's standard hydraulic system.

To substantiate the effective control system of the manipulator's hydraulic drive, a model of the truck's side was developed, consisting of an on-board platform; rotary module, power part (arrow, beam), hydraulic drive, electrical part (drive, control), and cargo lifter with servo drive.

A rational model of the electronic hydraulic drive control system of a manipulator crane for use in universal crane-manipulator installations on an automobile, self-propelled, and trailer chassis is proposed. This helps to increase the efficiency of loading and unloading operations while reducing the number of equipment and workers involved in cargo handling outside warehouses.

The authors propose an architecture of control of manipulator installations with a low cost of its implementation and a simple, understandable setting. The use of the proposed technology and electronic control scheme provides control of a complex system of drives, and allows for flexible settings according to the user's needs, e.g. to control the manipulator crane remotely via a radio channel or limit the amount of movement in certain directions.

To control the executive mechanisms of the manipulator crane, a hardware-computing platform with an Arduino microcontroller was used with the Processing/Wiring software development environment in the programming language, which is a subset of C/C++ and ensures: uninterrupted operation of the mechanisms during operation; their start and braking; informativeness, accuracy, and efficiency of mechanisms; minimal static and dynamic loads with reduced inertial action during cargo movement.

Key words: manipulator crane, hydraulic drive, servo drive, electronic control system.

Постановка проблеми. Під час перевезень часто виникає необхідність у переміщенні вантажів, які різняться габаритами [1; 15], масою, формою та особливостями поведіння. Також виникає необхідність завантаження або розвантаження поза межами стаціонарних складів, на будівництві, у зоні щільної житлової забудови, у полі тощо. Для цих потреб прийнято вико- ристовувати вантажні автомобілі, обладнані маніпуляторами, що забезпечує низку переваг, серед яких: зменшення кількості одиниць техніки, підвищення ступеня їх використання; зменшення кількості працівників, підвищення продуктивності їхньої праці; зменшення загальних затрат на перевезення [14].

Маніпулятори широко представлені на ринку України, їх ціна різниться залежно від вантажопідйомності та функціональних можливостей. Вартість найбільш технологічних маніпуляторів може перевищувати вартість самого автомобіля, тоді як простіші зразки можуть бути частково механізовані, а їх ціна буде невисокою.

Найчастіше в маніпуляторах вико- ристовується гідропривід, який може бути автономним або ж використовувати штатну гідро- систему автомобіля [13]. Система управління таким маніпулятором, виконана у вигляді моно- блоку гідророзподільників з механічними важелями й розміщена на рамі автомобіля. Для комбінованих типів приводу системи керування маніпуляторами є складнішими й досить варті- сними. Тому актуальним є обґрунтування простої та ефективної системи керування маніпулятором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За загальноприйнятою класифікацією кран- маніпуляторні установки поділяють за типом підвішування вантажу: жорстке, гнучке [2; 15] на стрілі (для переміщення вантажів використовують трос з гаком, стропи, петлі). За способом складання ланок їх поділяють на: Z-подібні, L- подібні та телескопічні установки. За конструктивним виконанням стріли Z-подібні стріли використовують переважно європейські виробники техніки.

Для приводу робочих органів та силових частин вантажопідйомних машин найчастіше застосовуються об'ємні гідроприводи безпосередньої дії, в яких гідронасос нагнітає рідину, яка передає зусилля безпосередньо до виконавчого механізму – гідроциліндра або гідромотора. Об'ємні гідроприводи знайшли широке застосування через можливість змінювати обертальний рух на поступальний й простоту регулювання робочих швидкостей виконавчих пристроїв, реверсного переміщення робочих органів та здатність реалізовувати великі передатні числа [3].

Переважна більшість досліджень стосується динаміки та режимів [1; 7; 13] руху ланок стрі-

лової системи, їх стійкості та режимів руху вантажу різної маси [12], однак мало уваги приділяється питанням розробки нових конструкторських маніпуляторів та їх випробування.

Постановка завдання. Використання універсальних кран-маніпуляторних установок на автомобільних, самохідних та причіпних шасі дає змогу підвищити ефективність навантажувально- розвантажувальних операцій, зменшуючи при цьому кількість техніки та працівників, залучених до вантажопереробки поза межами складів.

Метою дослідження є обґрунтування раціональної моделі електронної системи керування гідроприводом крана-маніпулятора з такими конструктивними та експлуатаційними вимогами:

- застосування системи управління, що забезпечує механізм приводу маніпулятора інформативність, точність та слідкуючу дію механізмів під час переміщення;
- велика кількість степенів вільності шарнірних з'єднань, гнучкість та плавність роботи механізмів;
- можливість подальшого розширення функціональних можливостей та елементної бази (дистанційного керування, передачі відеозображення з вантажозахоплювача, сенсорів відстані, руху);
- підтримання початкового рівня прохідності, маневреності автомобіля;
- забезпечення необхідної мобільності завдяки складанню маніпулятора в транспортне положення з габаритами, що не перевищують аналогічних розмірів автомобіля;
- можливість використання додаткових елементів керування та адаптивність їх налаштувань.

Виклад основного матеріалу. Існують різні конструктивні рішення й підходи щодо [3] розробки маніпуляторів. Їх поділяють за типом приводу (пневматичний, електричний, гідравлічний); мобільністю (стаціонарний або рухливий); системою координат переміщення (прямокутна, циліндрична, сферична, ангулярна); способом управління (механічний, електричний, електронний). Головне питання, що виникає при розробці маніпуляторів, – вибір кінематичної схеми, структури елементної бази та алгоритму роботи. Найпрогресивніші маніпулятори подібні до людської руки, мають плече, кисть і зап'ястя й можуть рухатися з аналогічними степенями вільності (ангулярна система). Тоді як для простіших операцій досить лише два ступені рухливості (прямокутна, циліндрична система). Можливість рухатися в циліндричній системі координат дозволяє розширити робочу зону маніпулятора й обертатися навколо своєї осі на 360 град. Сферична система являє собою робочу

зону у вигляді сфери, маніпулятори з такою системою координат виділяються універсальністю та покращеними технічними можливостями.

Така кінематична схема складніша за попередні, тому виникають труднощі з виготовленням складних механізмів, їх міцністю, стійкістю та управлінням, однак він може переміщатися складнішою траєкторією і виконуватися для складних траєкторій переміщення.

Принципова схема [5] й пропонується кінематична конфігурація маніпулятора (рис. 1)

передбачає використання широкої робочої зони завдяки переміщенню основи поворотного модуля в циліндричній системі координат, тоді як вантажозахоплювач переміщується у сферичній системі, за рахунок чого досягається вища гнучкість рухомих ланок. Точність й повторюваність системи забезпечується роздільною здатністю керуючих сигналів, люфтів у з'єднаннях, алгоритмів керування та зовнішніх впливів.

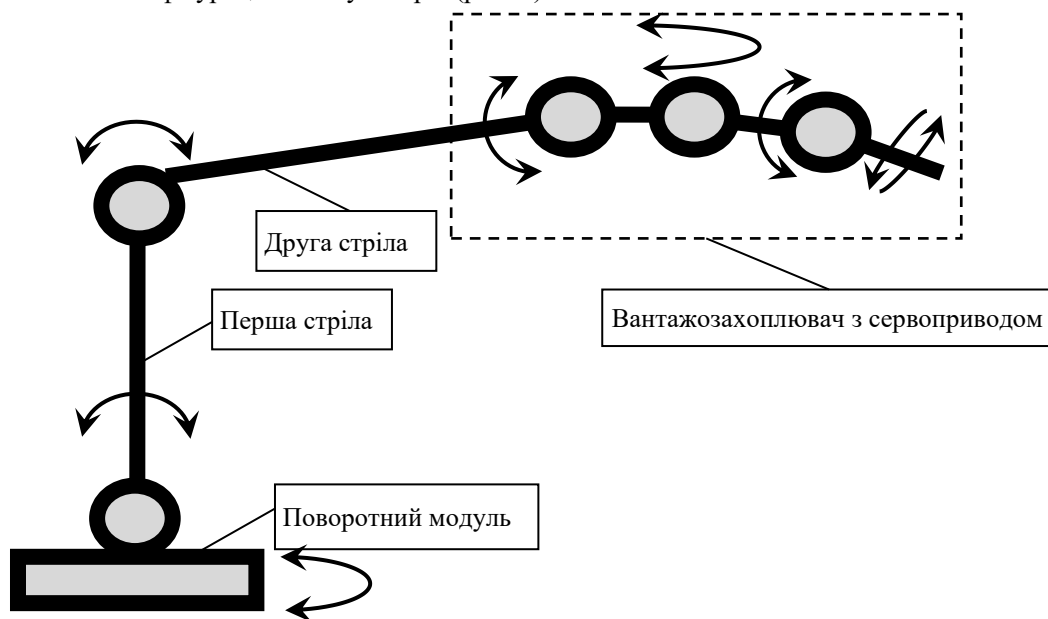


Рис. 1. Принципова кінематична схема маніпулятора
Fig. 1. Basic kinematic scheme of the manipulator

Управління маніпулятором включає декілька функціональних блоків: генерування та сприйняття сигналів, обробки даних та силового приводу виконавчих механізмів [5; 6; 11]. Принципову функціональну схему та алгоритм роботи запропонованого маніпулятора наведено на рис. 2.

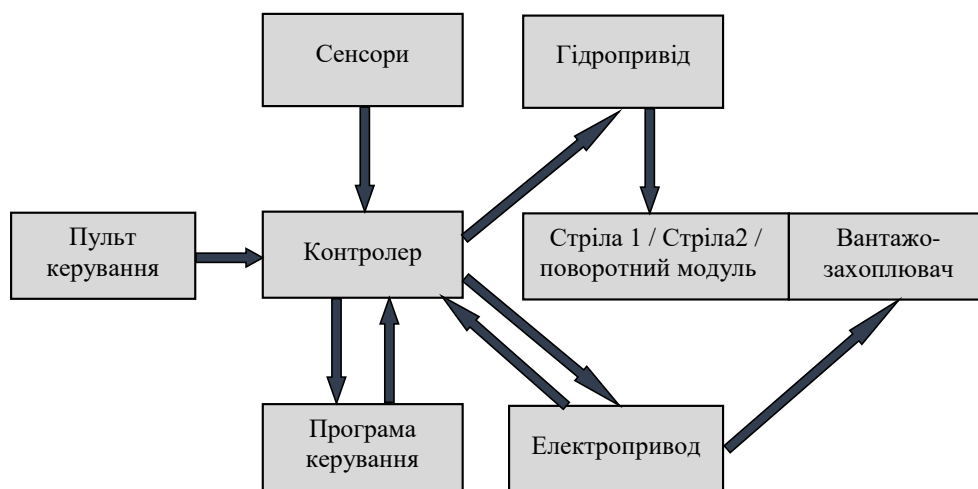
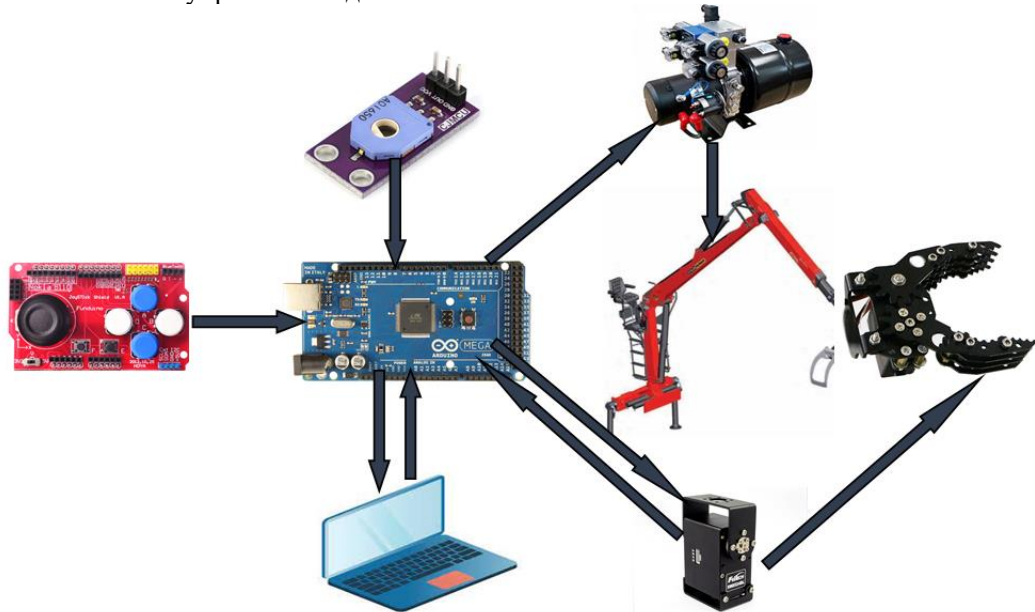


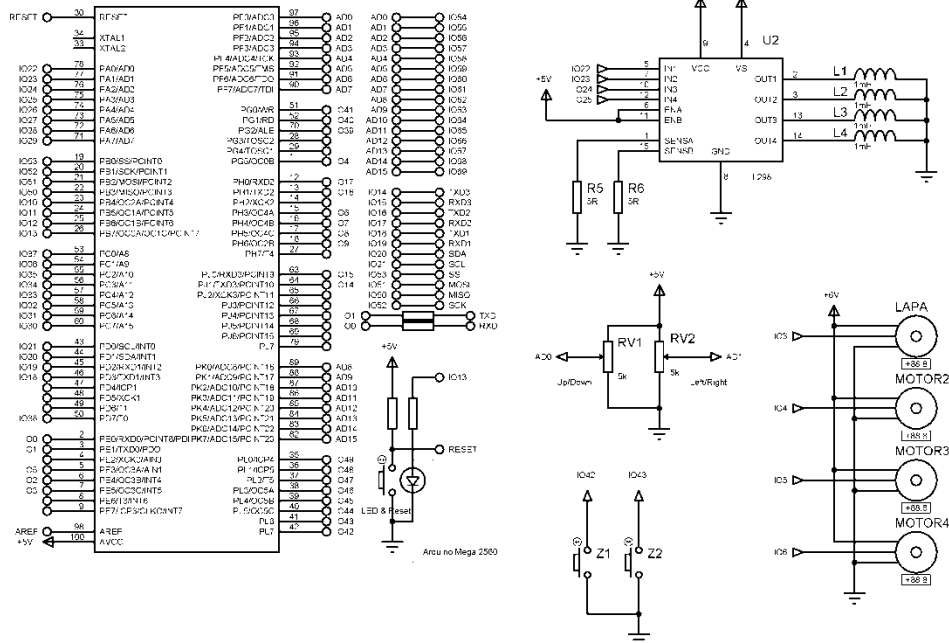
Рис. 2. Функціональна схема та алгоритм керування маніпулятора
Fig. 2. Functional diagram and control algorithm of the manipulator

На наступному етапі здійснено обґрунтування й вибір технології та елементної бази для реалізації принципової схеми управління маніпулятором. Проведено підбір компонентів для забезпечення алгоритму роботи гідро- та електроприводу усіх ланок маніпулятора. Для силового приводу сформовано гідравлічний блок з електронно-керованими розподільниками та блок живлення напругою 5/24 В. Управління маніпулятором здійснюється за допомогою двох джойстиків та кнопок. Сигнали управління з джойстиків

дають змогу керувати усіма ланками, забезпечуючи їх переміщення в усіх степенях вільності. Реалізована система керування містить такі елементи: блок живлення 24В 5А, Arduino Mega [7], драйвери керування електромагнітними клапанами системи гідроприводу на базі мікросхем L298 – 2 шт., джойстики керування з кнопками – 2 шт., сервопривід вантажозахоплювача, елемент перетворювача DC/DC з вихідною напругою 7В для живлення сервоприводів (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Схема керування маніпулятором:

а – елементна база; б – схема підключення елементів в програмі Proteus

Fig. 3. Manipulator control scheme:

a – element base; b - scheme of connecting elements in the Proteus program

Для управління електричними виконавчими механізмами маніпулятора використано апаратну обчислювальну платформу з мікроконтролером Arduino [4; 8; 9] та програмним середовищем розробки Processing/Wiring на мові програмування, що є підмножиною C/C++. Перевагою використання цієї платформи є доступність електронних компонентів та відкритих програмних кодів (стандартних бібліотек), що є у вільному доступі, для найбільш популярних схем управління [10]. На більшості плат Arduino бібліотека Servo підтримує керування не більше 12 сервоприводами, а на Arduino Mega – 48.

Бібліотеки для керування сервоприводами (Servo) і для роботи з приймачами/передавачами на 433 МГц VirtualWire використовують аналогічне переривання. Це означає, що їх можна використовувати в одній схемі одночасно, тобто

використовувати провідне або безпроводне управління [7].

На рис. 3 зображено фрагмент електричної схеми маніпулятора. Змінні резистори RV1 та RV2 – елементи джойстика керування. При центральному положенні джойстика резистори перебувають у середньому положенні (що відповідає значенню АЦП 512 одиниць), під час впливу на джойстик значення відповідного каналу змінюються від 0 до 1023 одиниць, залежно від чого і приводиться в дію відповідний гідравлічний контур маніпулятора. При переведенні джойстиків у вихідне положення гідро розподільники перебувають у нейтральному положенні і насосна станція працює в холостому режимі, а стріла маніпулятора залишається нерухомою [3].

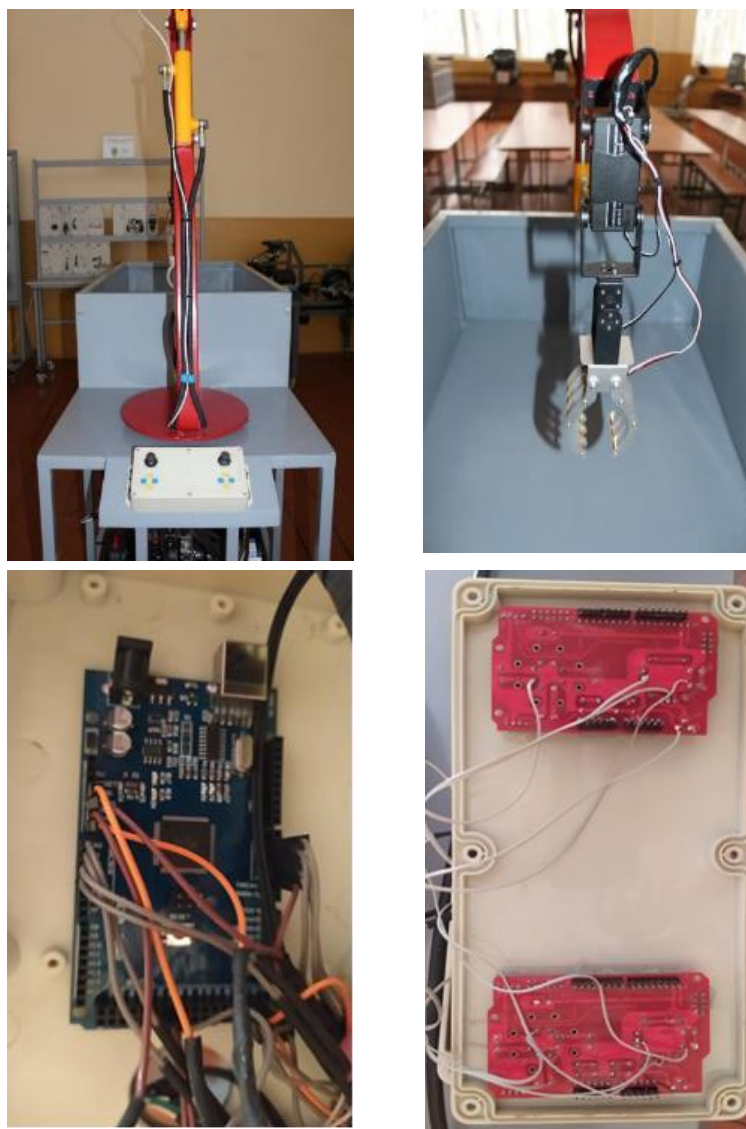


Рис. 4. Електронна схема управління маніпулятором на базі програмно-апаратної платформи Arduino
Fig. 4. Electronic manipulator control scheme based on the Arduino hardware and software platform

Перевірка коректності побудови електричної схеми та її працездатності проводилась за допомогою моделі, складеної у середовищі Proteus. Згідно з моделлю, за допомогою кнопок керування Z1 та Z2 маємо можливість керувати вантажозахоплювачем, тобто стискати або розтискати захват.

Сервоприводи зазвичай мають обмежений кут обертання 180 градусів, або ж постійне обертання. У нашому випадку кожна пара сервоприводів керується окремим джойстиком, а замикання-розмикання «руки» керується за допомогою кнопок (рис. 4).

Використання ШІМ сигналу для керування електромагнітними розподільниками гідрос-

танції дозволяє змінювати швидкість переміщення робочих органів маніпулятора внаслідок зміни поперечного перерізу гідророзподільника. Це відбувається залежно від потреби, тобто від ступеня натискання на джойстик керування. Програмно передбачено невелику «зону нечутливості» для запобігання небажаним переміщенням маніпулятора при незначному впливі на джойстики чи кнопки.

До основних складових частин крана-маніпулятора належать: бортова платформа; поворотний модуль; силова частина (стріла, балка); гідропривід; електротехнічна частина (привід, управління); вантажозахоплювач із сервоприводом (рис. 5).

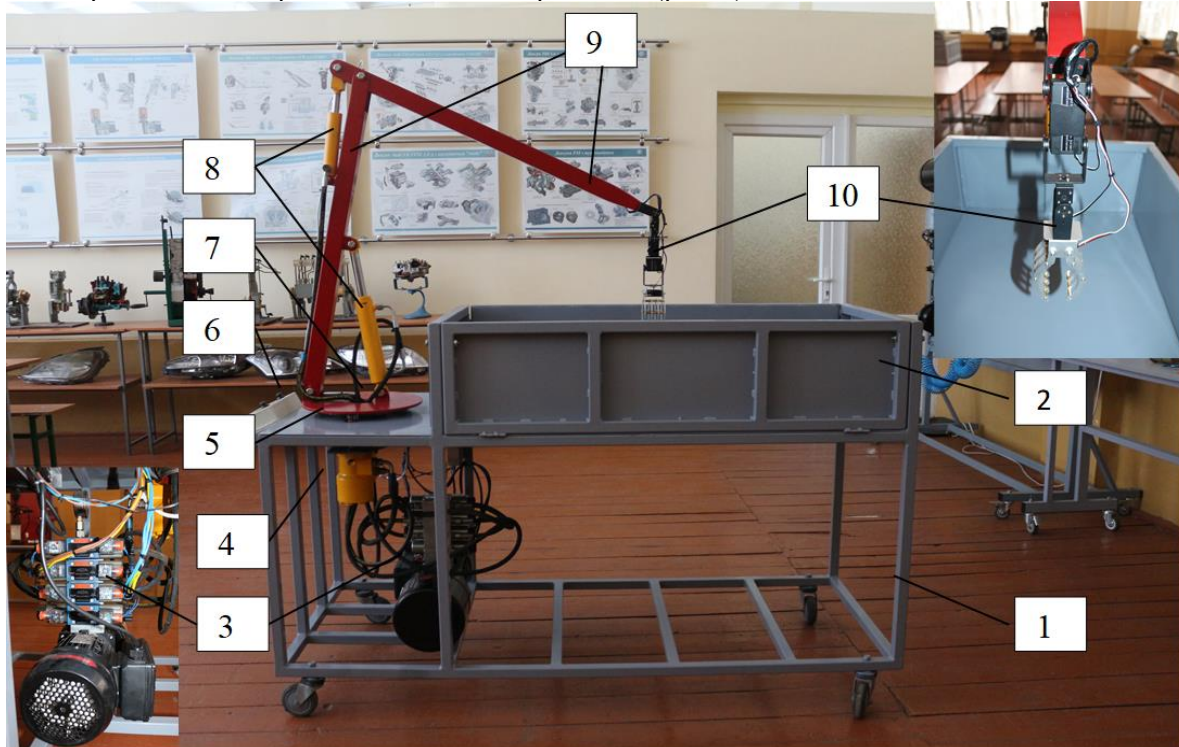


Рис. 5. Електронно-керований маніпулятор: 1 – монтажна рама; 2 – вантажна платформа з відкидними бортами; 3 – гідростанція для гідроборта НРР 160/6/0,75; 4 – поворотний механізм; 5 - монтажна плита поворотного модуля; 6 – пульт керування; 7 – поворотний модуль; 8 – гідроциліндри; 9 – перша та друга стріла; 10 – вантажозахоплювач із сервоприводом

Fig. 5. Electronically controlled manipulator: 1 – mounting frame; 2 – cargo platform with folding sides; 3 – hydraulic station for hydroboard HPP 160/6/0.75; 4 – rotary mechanism; 5 mounting plate of the rotary module; 6 – control panel; 7 – rotary module; 8 – hydraulic cylinders; 9 – first and second arrows; 10 – cargo lifter with a servo drive

Для монтажу гідроприводу крана маніпулятора використано гідростанцію для гідроборта НРР 160/6/0,75 потужністю 0,75 кВт. Монтаж блока розподільників відбувається через набірний каскад монтажних плит із запобіжними клапанами (рис. 6).

Найбільш функціонально ефективною та надійною є типова «схема підключення гідроприводу 64», що дає змогу працювати системі в холостому режимі під тиском близько 20 бар. У разі ввімкнення гідророзподільника тиск у напірній лінії зростає й подається до каскаду розпо-

дільників. Відповідно до запропонованої схеми використано електронно керовані гідро розподільники серії WE6G з можливістю стандартизованого плитного монтажу, завдяки чому досягається загальна простота конструкції та компактність гідроблоку керування. Переріз напірної лінії гідророзподільника становить 6 мм, максимальний робочий тиск – 315 бар, продуктивність – до 40 л/хв.

Управління гідроприводом стріл маніпулятора та поворотного модуля відбувається за допомогою розподільників WE6 серії E, які

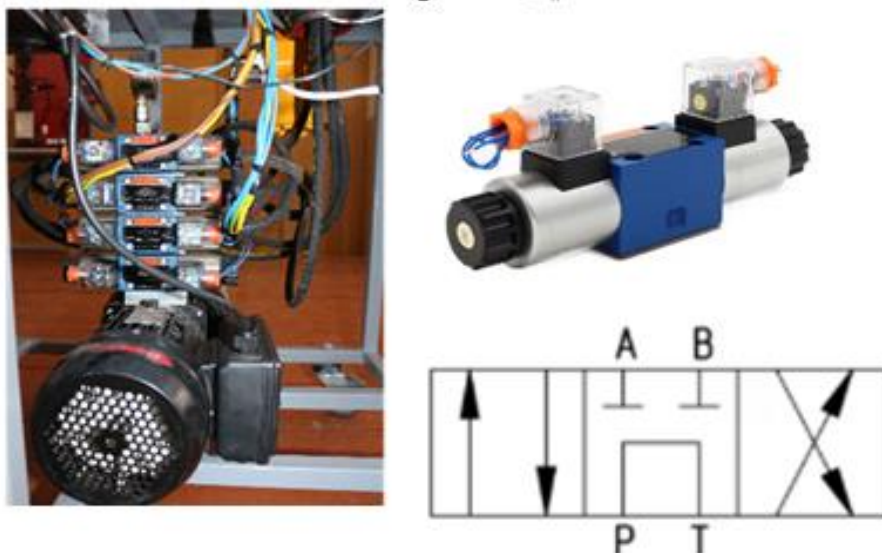


Рис. 6. Блок електромагнітних розподільників гідроприводу маніпулятора
Fig. 6. Block of electromagnetic distributors of the manipulator hydraulic drive

забезпечують підключення робочих органів за «типовою схемою 44». Вони також забезпечують [3] трипозиційне регулювання з можливістю підключення чотирьох ліній. У нейтральному положенні всі лінії закриті, а при подачі сигналу на один з електромагнітів відбувається з'єднання напірної лінії з першим виходом робочого органа, тоді як інший вихід з'єднаний зі зливом. Переміщення золотника гідроапарата відбувається двома електромагнітними котушками робочою напругою 12В, 24В або 110...220 В. Повернення золотника розподільника у вихідне положення відбувається за допомогою пружини.

Для перевірки справності електромагнітів приводу золотника гідророзподільника використано світлодіодну індикацію. Монтажний розмір стандартний та уніфікований і забезпечує належну взаємозамінність, тоді як монтаж здійснюється гвинтами М5х50.

Щоб забезпечити одночасну роботу всіх робочих органів гідроприводу крана маніпулятора, розроблено принципову схему підключення елементів. У процесі монтажу встановлено напрями потоків робочої рідини через гідророзподільники при прямому та зворотному ході гідроциліндрів. Підібрано компоненти гідросистеми відповідно до технічного завдання та схеми підключення: насосна установка – 1 шт.; гідроциліндр – 2 шт.; гідромотор – 1 шт.; гідророзподільник WE6 G (64 схема) – 1 шт.; гідророзподільник WE6 E (44 схема) – 3 шт.; дросель ПГ77-12 – 1 шт.; гідроклапан зворотний ПГ51-22 – 1 шт.; регулятор витрати зі зворотним клапаном МПГ 55-32 – 1 шт.

Для обертання маніпулятора навколо своєї осі використано поворотний модуль, виготовлений у вигляді плити діаметром 350 мм, до якої кріпиться вал, змонтований через конічні роликові підшипники в гільзі. До плити за допомогою

гвинтів змонтовано маховик зі зубчастим вінцем. У контакт з маховиком через шарнірне кріплення підведено гідромотор з привідною шестернею, завдяки чому приводиться в рух поворотний модуль у двох напрямках. Для приводу поворотного модуля використано шестеренний гідромотор зовнішнього зачеплення з двома синхронними шестернями. При обертанні шестерень рідина в западинах зубів переноситься із зони всмоктування до зони нагнітання. Однак така простота конструкції має низку недоліків - у місці зачеплення шестерень утворюється зона замкненого об'єму, що призводить до пульсації тиску на виході насоса та шумності його роботи.

Висновки. Обґрунтовано раціональну модель електронної системи керування гідроприводом крана-маніпулятора для використання в універсальних кран-маніпуляторних установках на авто-мобільних, самохідних та причіпних шасі. Це дає змогу підвищити ефективність навантажувально-розвантажувальних операцій, зменшуючи при цьому кількість техніки та працівників, залучених до вантажопереробки поза межами складів.

Запропоновано архітектуру керування маніпуляторними установками з невисокою вартістю її реалізації та простим зрозумілим налаштуванням. Використання запропонованої технології та схеми електронного керування забезпечує управління складною системою приводів, дозволяє проводити гнучкі налаштування за потребою користувача, наприклад, керувати кран-маніпулятором дистанційно через радіоканал чи обмежити величину ходу в певних напрямках.

Бібліографічний список

1. Аулін В. В., Великодний Д. О. Методи формування системи транспортно-технологічного,

- забезпечення в АПК. *Транспорт і логістика: проблеми та рішення*: зб. наук. праць за матеріалами VIII Міжнар. наук.-практ. конф., 23-25 трав. 2018 р. Одеса: КУПРІЄНКО С. В., 2018. С. 15-17.
2. Бакай Б. Я. Попереднє представлення рівняння динаміки маніпулятора методом Лагранжа-Ейлера. *Науковий вісник НЛТУ України*. Львів: Вид-во НЛТУ України, 2011. Вип. 21.18. С. 322–327.
 3. Буренніков Ю. А., Неміровський І. А., Козлов Л. Г. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навч. посіб. Вінниця, 2013. 273 с.
 4. Antonelli G. Underwater Robots. *Springer Tracts in Advanced Robotics*. 2018. Vol. 123. 136 p.
 5. Bozorg-Haddad O., Solgi M., Loáiciga H. Meta-Heuristic and Evolutionary Algorithms for Engineering Optimization. Hoboken, USA: John Wiley & Sons Inc, 2017. 304 p.
 6. Chander A., Chatterjee A., Siarry P. A. New Social and Momentum Component Adaptive PSO Algorithm for Image Segmentation. *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38, iss. 5. P. 4998–5004.
 7. Design of a Fractional Order PID Controller for an AVR Using Particle Swarm Optimization. Control / M. Zamani, M. Karimi-Ghartemani, N. Sadati, M. Parniani. *Engineering Practice*. 2009. Vol. 17. P. 1380-1387. doi: 10.1016/j.conengprac.2009.07.005.
 8. Evolutionary Artificial Neural Networks by Multi Dimensional Particle / S. Kiranyaz, T. Ince, A. Yildirim, M. Gabbouj. *Swarm Optimization. Neural Networks*. 2009. Vol. 22, iss. 10. P. 1448-1462. doi: 10.1016/j.neunet.2009.05.013.
 9. Greer R., Haas C., Gibson G. *Advances in Control Systems for Construction Manipulators*. Austin, 2014. 615 p.
 10. Heo J., Lee K., Garduno-Ramirez R. Multiobjective Control of Power Plants Using Particle Swarm Optimization Techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. Vol. 21, iss. 10. P. 552-561. doi: 10.1109/TEC.2005.858078.
 11. Lewis F. L., Dawson D. M., Abdallah C. *T. Robot Manipulator Control Theory and Practice*. New York, 2004. 607 p.
 12. Loveikin V., Romasevich Y., Spodoba O. Mathematical model of the dynamics varying the radius jib system loader crane with a load at adjustment. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. 01. P. 141-149. doi: 10.31548/machenergy.
 13. Romasevych Y., Loveikin V. A Novel Multi-Epoch Particle Swarm Optimization Technique. *Cybernetics and Information Technologies*, Bulgarian Academy of Sciences. 2018. Vol. 18(3). P. 62-74. doi: 10.2478/cait2018-0039.
 14. Shramenko N., Muzylyov D., Shramenko V. Methodology of costs assessment for customer transportation service of small perishable cargoes. *International Journal of Business Performance Management*. 2020. No 21(1-2). P. 132–148.
 15. The optimization of trucks fleet schedule in view of their interaction and restrictions of the European agreement of work of crews / M. Oliskevych, S. Kovalyshyn, M. Magats, V. Shevchuk, O. Sukach. *Transport Problems*. 2020. Vol. 15(2). P 157–170.

Стаття надійшла 20.08.2023

ЕНЕРГЕТИКА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

УДК 681.5.08

**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДАТЧИКІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ
АВТОМАТИЗОВАНОГО МОНІТОРИНГУ СПОЖИВАННЯ КОРМУ СВИНЯМИ
У ФЕРМЕРСЬКИХ ГОСПОДАРСТВАХ**

**Анатолій Тригуба, д. т. н., Андрій Савка, аспірант, Андрій Татомир, к. т. н.,
Роман Падюка, к. т. н., Олег Боярчук, к. т. н.**

*Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: trianamik@gmail.com, rs27mail@gmail.com, andrew.tatomyr@gmail.com,
padyukaroman@gmail.com, boyarchuko@ukr.net*

Тригуба А., Савка А., Татомир А., Падюка Р., Боярчук О. Аналіз сучасних датчиків та обґрунтування доцільності автоматизованого моніторингу споживання корму свинями у фермерських господарствах

Виконано аналіз процесу автоматизованого моніторингу споживання кормів свинями в різних фермах. Встановлено особливості процесу споживання корму, які лежать в основі ефективного управління годівлею та оптимального росту тварин. Виконано аналіз сучасних датчиків для автоматизованого моніторингу споживання кормів свинями та обґрунтовано доцільність їх використання. Встановлено основні типи датчиків, які автори пропонують застосувати для автоматизованого моніторингу. До них належать датчики ваги, руху, об'єму та для відслідковування індивідуального споживання корму. На підставі проведеного аналізу встановлено, що для моніторингу споживання корму за допомогою датчиків руху перевагу надають використанню методології аналізу зображень. Для моніторингу індивідуального споживання свинями корму рекомендують використати технологію радіочастотної ідентифікації (RFID), яка використовує радіохвилі для зчитування та захоплення інформації, що зберігається на мітці, прикріпленій до об'єкта. Кожен з окремих видів цих датчиків має свої переваги та недоліки за показниками точності, надійності, вартості та простоти встановлення. Встановлено, що, незважаючи на недоліки існуючих датчиків для автоматизованого моніторингу споживання корму свинями, вони мають значні переваги перед ручним моніторингом годівлі, включаючи збір даних у режимі реального часу, підвищену точність і зниження витрат на робочу силу. Означено задачі, які слід розв'язувати під час автоматизованого моніторингу кормів. Вирішення основних із них дає змогу підвищити точність збору даних та, відповідно, ефективність годування тварин. Встановлено, що автоматизований моніторинг споживання кормів із використанням сучасних датчиків має великий потенціал для підвищення ефективності та рентабельності свинарства. Вибір датчиків для автоматизованих систем моніторингу споживання кормів значною мірою впливає на ефективність та надійність систем і є напрямом подальших досліджень.

Ключові слова: моніторинг, автоматизовані процеси, споживання кормів, датчики.

Tryhuba A., Savka A., Tatomyr A., Padiuka R., Boiarchuk O. Analysis of modern sensors and the feasibility of automated monitoring of feed consumption by pigs on farms

An analysis was conducted on the process of automated monitoring of feed consumption by pigs on different farms to establish the peculiarities of the feed consumption process. Effective feeding management and optimal animal growth are based on these peculiarities. The feasibility of using modern sensors for automated monitoring of feed consumption by pigs was substantiated. The authors suggest using different types of sensors, including weight, movement, volume, and individual feed consumption sensors. The study established that image analysis methodology is preferred when using motion sensors to monitor feed consumption. Radio frequency identification (RFID) technology is recommended for monitoring individual feed consumption by pigs. RFID technology uses radio waves to read and capture information stored on a tag attached to the object. Each type of sensor has its advantages and disadvantages in terms of accuracy, reliability, cost, and ease of installation. Despite the shortcomings of existing sensors for automated monitoring of pig feed intake, they have significant advantages over manual feeding monitoring, including real-time data collection, increased accuracy, and reduced labor costs. The study defines the tasks that should be solved during the automated monitoring of fodder. Solving the main tasks can increase the accuracy of data collection and, accordingly, the efficiency of animal feeding. The study concludes that the use of modern sensors for automated monitoring of feed consumption has great potential for increasing the efficiency and profitability of pig farming. The choice of sensors for automated feed consumption monitoring systems significantly affects the efficiency and reliability of the systems and is a direction for further research.

Key words: monitoring, automated processes, feed consumption, sensors.

Постановка проблеми. Галузь свинарства в Україні на 40 % забезпечує населення м'ясною продукцією. При цьому існує низка невирішених науково-прикладних задач [1–5; 21]. Зокрема, споживання корму є критичним чинником у свинарстві, оскільки воно безпосередньо впливає на продуктивність тварин, ефективність використання корму та екологічну стійкість. Автоматизований моніторинг споживання кормів на свинофермах стає все більш актуальним у зв'язку з необхідністю точної та своєчасної інформації про поведінку свиней при годівлі. Традиційні ручні методи моніторингу споживання корму вимагають багато часу, праці та вразливі до людських помилок. З удосконаленням сенсорних технологій автоматизовані системи моніторингу можуть стати більш точними, надійними та економічно ефективними, що дозволить фермерам збирати дані про споживання корму в режимі реального часу, виявляти будь-які відхилення або зміни в поведінці годівлі та відповідно коригувати графіки годівлі. Завдяки автоматизованому моніторингу споживання кормів на свинофермах відбувається відчутне заощадження кількості витраченого корму, що забезпечує його економію більше ніж 10 % [10]. Загалом це може дозволити фермерам оптимізувати використання кормів, покращити продуктивність свиней і зменшити витрати на корми, що забезпечить кращу прибутковість і стабільність операцій у свинарстві. Однією з потенційних задач в автоматизованих системах моніторингу споживання кормів свинями є забезпечення надійності і точності використовуваних датчиків [8–10; 19–21]. Несправності або неточності датчиків можуть призвести до неправильного збору даних, що, своєю чергою, може призвести до неправильних рішень щодо годівлі і може негативно вплинути на здоров'я та продуктивність свиней. Іншою потенційною задачею є вартість впровадження автоматизованих систем моніторингу, оскільки вони можуть потребувати значних інвестицій в обладнання та інфраструктуру [6; 12; 14; 20]. Крім того, для персоналу ферми може знадобитися потреба в навчанні для адаптації та ефективного використання цих систем, що може стати однією із задач для їх успішного впровадження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існує багато аналітичних статей та оглядів про датчики для автоматизації процесів, та лише невелику частину з них можна практично застосувати для моніторингу кормів, а саме публікації та дослідження таких авторів, як I. A. Velit, M. M. Skiba, C. V. Radmila, P. V. Sklyar, Suresh Neethirajan, Jun Bao, Qiuju Xie, Thomas van Klompenburg, Ayalew Kassahun, S. G. Matthews, A. L. Miller, I. Kyriazakis та ін. Було проведено комплексний пошук літератури, щоб

визначити дослідження, пов'язані з датчиками для моніторингу споживання корму свинями. Пошук проводився за допомогою різних наукових баз даних, зокрема PubMed, ScienceDirect і Google Scholar. Пошукові ключові слова включали «споживання корму для свиней», «моніторинг корму», «датчик моніторингу кормів», «дозування кормів» та «моніторинг свинарників». Автори були відібрані на основі їх відповідності темі цієї статті [11; 13; 15; 16].

Моніторинг кормів у свинарниках було розглянуто на основі датчиків, які здебільшого мають механічний принцип дії та невисоку точність. У зв'язку із стрімким розвитком комп'ютерно-інтеграційних технологій, здешевленням вартості електронних датчиків та інтеграцією різних компонентів у єдину розумну систему, питання використання високоточних електронних датчиків та методів для моніторингу кормів не було до кінця розкрито. Також існує кілька задач, пов'язаних із впровадженням автоматизованого моніторингу, включаючи вартість датчиків і систем моніторингу, потребу в надійних і точних алгоритмах аналізу даних і потенційні обмеження самих датчиків, такі як чутливість до чинників навколишнього середовища та потреба в регулярному обслуговуванні [17; 18; 23]. Незважаючи на означені науково-прикладні задачі, продовження досліджень і розробка автоматизованих систем моніторингу має потенціал змінити спосіб моніторингу та розподілу корму для свиней на фермах і підвищити загальну прибутковість.

Постановка завдання. Мета дослідження – виконати аналіз сучасних датчиків для автоматизованого моніторингу споживання корму свинями у фермерських господарствах, який базується на обґрунтуванні їх переваг і недоліків, що забезпечує означення задач та варіантів удосконалення конфігурацій зазначених систем для підвищення точності моніторингу споживання кормів, а також ефективності свинарства.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- здійснити аналіз сучасних датчиків для автоматизованого моніторингу споживання корму свинями у фермерських господарствах та обґрунтувати їх переваги і недоліки;

- означити задачі та варіанти вдосконалення конфігурацій систем автоматизованого моніторингу споживання корму свинями у фермерських господарствах.

Виклад основного матеріалу. Забезпечення якості та кількості споживання кормів має вирішальне значення для здоров'я та росту свиней у різних видах ферм. Проте кілька чинників можуть негативно вплинути на споживання корму свинями, включно зі стресовими чинниками навколишнього середовища, неоптимальною

якістю або складом корму та захворюваннями. Погане споживання корму може призвести до зниження приросту ваги, підвищення рівня захворюваності та смертності, а також зниження загальної продуктивності, що може мати значні економічні наслідки для фермерів. Таким чином, моніторинг споживання корму має важливе значення для раннього виявлення проблем і вжиття необхідних заходів для їх розв'язання. Однак традиційні ручні методи моніторингу забирають багато часу і можуть не охопити повного спектра поведінки окремих свиней при споживанні. Автоматизовані системи моніторингу, які використовують різні датчики та технології, можуть подолати ці обмеження, але вони мають власний набір можливих недоліків, таких як надійність і точність датчиків, керування даними та потреба в спеціалізованих датчиках для встановлення та обслуговування системи.

Точний моніторинг споживання корму може допомогти виробникам виявити стан здо-

ров'я тварин або задачі щодо якості кормів, а також оптимізувати способи годівлі для покращання продуктивності та ефективності свиней. Останніми роками зростає інтерес до використання датчиків для моніторингу споживання корму свинями, оскільки ці пристрої можуть надавати дані в реальному часі та зменшити потребу в трудомісткому і тривалому ручному моніторингу. Розглянемо основні типи датчиків для автоматизованого моніторингу, включаючи датчики ваги, руху, об'єму та оцінення індивідуального споживання корму.

Датчики ваги – це датчики, які вимірюють вагу корму в годівниці. Вони мають високу точність і можуть надавати інформацію про споживання корму в реальному часі. Зазвичай вагу корму вимірюють за допомогою визначення сили механічних зусиль, які корм прикладає до датчика, як зображено на рис. 1.

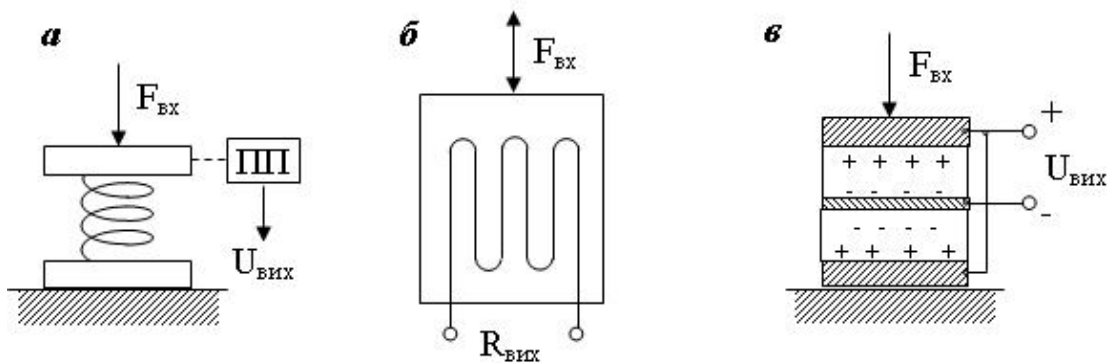


Рис. 1. Датчики механічних зусиль [17]: а – з пружинним елементом, б – тензометричний, в – п'єзометричний

Fig. 1. Sensors of mechanical forces [17]: a – with a spring element, b – tensometric, c – piezometric

Схема вимірювання навантаження кормів складається з металевої ємності для годівлі з прикріпленими до неї датчиками механічних зусиль. Коли до тензодатчика прикладається сила, він трохи деформується, спричинюючи зміну опору. Ця зміна опору потім перетворюється на електричний сигнал, який може бути зчитаний мікропроцесором. На базі різниці опору між попереднім і поточних значенням та наперед відомим об'ємом ємності можна обчислити вагу поданого корму. Датчики ваги мають низку переваг, серед яких низька вартість, простота та легкість монтажу, прості алгоритми моніторингу. Однак вони також мають деякі обмеження. До них належать потреба калібрування, нестійкість до пошкоджень або зношування, а також неточність. Незважаючи на ці обмеження, датчики механічних зусиль залишаються простим і надійним варіантом для моніторингу споживання корму свинями, особливо в ситуаціях, коли важливі міркування щодо вартості та простоти використання.

Для моніторингу споживання корму за допомогою датчиків руху пропонується використати методологію аналізу зображень, приклад якої зображено на рис. 2 [7]. Цей метод передбачає використання різноманітних марематичних і обчислювальних алгоритмів для обробки зображень, визначення і виділення корму і розрахунок об'єму на базі зображень годівниць і свиней.

Щоб використовувати аналіз зображень для моніторингу споживання корму, у свинарнику зазвичай встановлюють камери для зйомки зображень годівниць і свиней, дані з яких у режимі реального часу обробляють за допомогою марематичної моделі та алгоритмів нейронної мережі (CNN) чи машини підтримки векторів (Support Vector Machines), які можуть розпізнавати рівень корму. Аналізуючи зміни положення та розміру годівниць і свиней з плином часу, можна оцінити кількість корму, який споживають свині

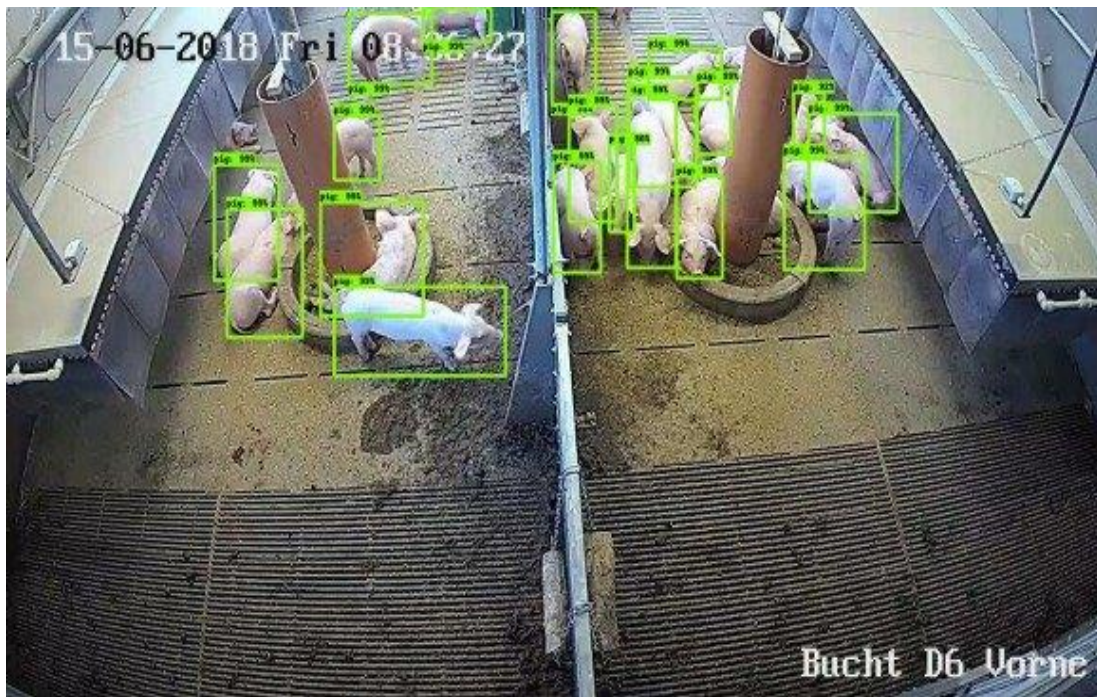


Рис. 2. Аналіз зображення для визначення рівня кормів [17]

Fig. 2. Image analysis to determine feed level [17]

Щоб використовувати аналіз зображень для моніторингу споживання корму, у свинарнику зазвичай встановлюють камери для зйомки зображень годівниць і свиней, дані з яких у режимі реального часу обробляють за допомогою математичної моделі та алгоритмів нейронної мережі (CNN) чи машини підтримки векторів (Support Vector Machines), які можуть розпізнавати рівень корму. Аналізуючи зміни положення та розміру годівниць і свиней з плином часу, можна оцінити кількість корму, який споживають свині.

Однією з переваг аналізу зображень є те, що його можна використовувати для моніторингу споживання корму без фізичного контакту зі свинями, що може бути меншим стресом для тварин і зменшити ризик передачі захворювання. Однак на аналіз зображення можуть впливати такі чинники, як умови освітлення, кут камери та наявність інших об'єктів на зображеннях, які можуть перешкоджати здатності програмного забезпечення точно відстежувати годівниці та свиней. Цей метод вимагає ретельного початкового калібрування та перевірки для забезпечення точних і надійних результатів.

Для моніторингу індивідуального споживання свинею корму автор рекомендує використати технологію радіочастотної ідентифікації (RFID), яка використовує радіохвилі для зчитування та захоплення інформації, що зберігається на мітці, прикріпленій до об'єкта. Мітки RFID потрібно прикріпити до окремих свиней, що дозволяє автоматично та безперервно відстежувати рух і поточне розміщення свині. Коли свині споживають корм, вага контейнера змен-

шується і зчитувач RFID може виявити цю зміну та передати дані про споживання корму для подальшого опрацювання.

Технологія RFID має кілька переваг, таких як можливість відстежувати споживання корму окремими свинями та визначати зміни в харчовій поведінці з часом. Це також дозволяє збирати точні та безперервні дані без втручання людини. Однак встановлення систем RFID може бути дорогим, і для їх ефективної роботи можуть знадобитися додаткове обладнання та інфраструктура, наприклад антени та зчитувачі. Крім того, точність і надійність зчитування RFID можуть бути обмежені, особливо в свинарниках зі значним поголів'ям, що створює шумне середовище.

Альтернативним варіантом для визначення кількості спожитого корму є використання датчиків об'єму. Виміряти об'єм корму можна одним із таких варіантів використання датчиків:

- електромагнітний датчик потоку корму, що проходить через трубу для його подачі (рис. 3, а) [16];

- ультразвуковий датчик, що забезпечує вимірювання відстані між верхньою частиною корму та верхньою частиною трубопроводу, на якому він закріплений. Це дозволяє обчислити об'єм спожитого корму, знаючи об'єм ємності (рис. 3, б) [22];

- термічний масовий датчик потоку, який безпосередньо вимірює масову витрату корму та заснований на різноманітних принципах роботи, що оцінюють розсіювання тепла (рис. 3, в) [22].

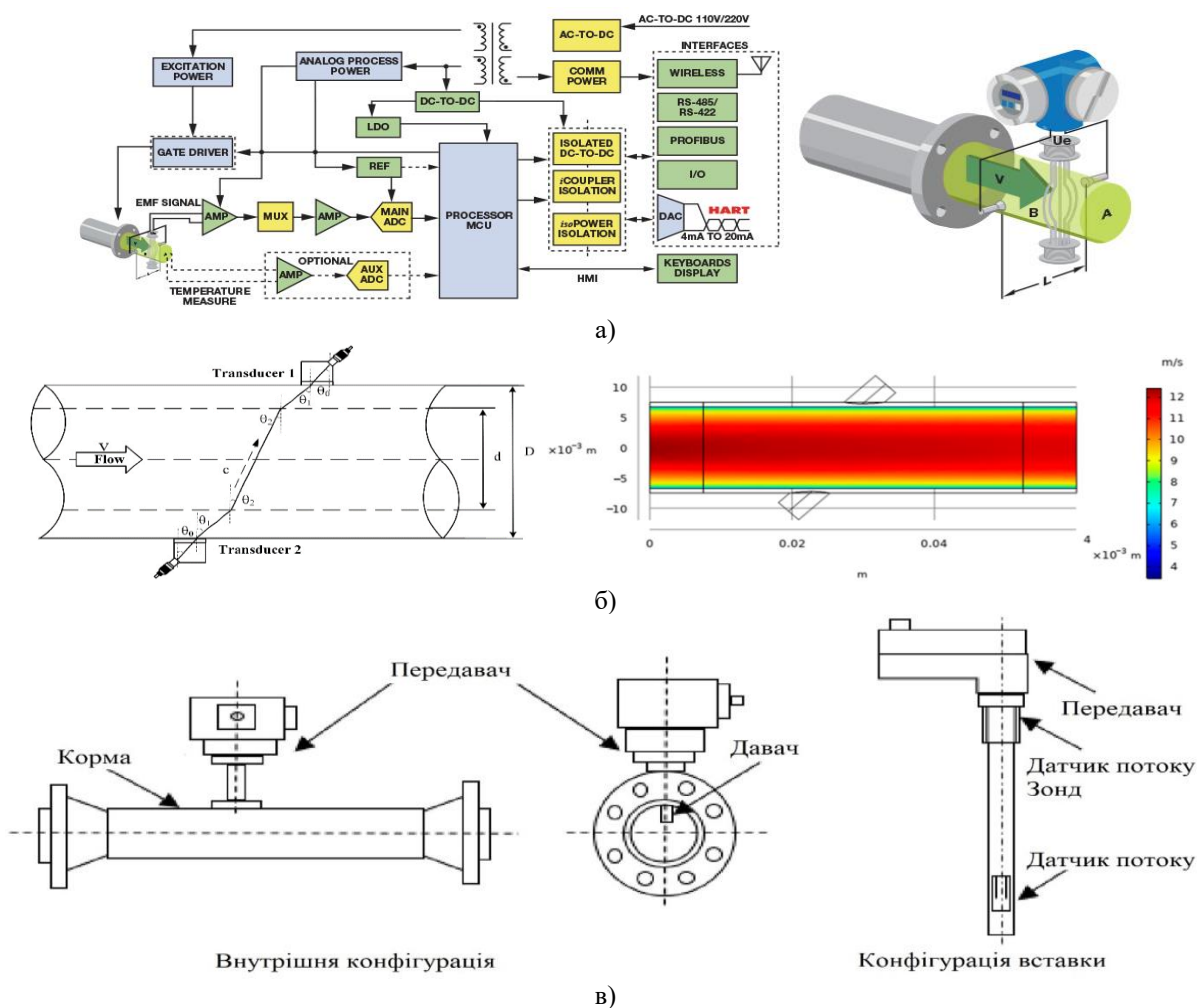


Рис. 3. Датчики визначення обсягу споживання кормів: а – електромагнітний датчик, б – ультразвуковий датчик, в – термічний масовий датчик
Fig. 3. Sensors for determining the volume of feed consumption: a – electromagnetic sensor, б – ultrasonic sensor, c – thermal mass sensor

Датчики об'єму можуть забезпечити постійний моніторинг і не вимагають прямого контакту зі свинями, що робить їх ненав'язливими. Однак на них може вплинути консистенція корму, тому для точного вимірювання потрібне калібрування. Крім того, вони можуть забиватися, якщо частинки корму занадто великі чи швидкість потоку надто низька.

У табл. 1 подано характеристики різних технологій з окремими типами датчиків для вимірювання витрат кормів. Використання електромагнітних датчиків має низьку середню точність виміру, від 0,2 % до 1 %. Датчик відзначається відсутністю рухомих частин і є корисним для використання для корозійних речовин. Використання датчиків перепаду тиску забезпечує середню точність виміру, від 0,5 % до 2 %. При цьому використання такого типу датчиків дає переваги в тому, що вони без рухомих частин і універсальні, оскільки можуть бути використані для рідин і газів. Ультразвукові датчики мають середню точність виміру від 0,3 % до 2 %. Цей тип датчиків відрізняється відсутністю рухомих

частин і можливістю використання для рідин і газів. Для всіх трьох проаналізованих варіантів вартість системи вимірювання перебуває в межах від 300 до 1000 доларів США. Водночас використання датчиків Коріоліса забезпечує найточніші вимірювання серед представлених. Зокрема, точність виміру є на рівні 0,1 %. Однак це потребує найвищих капіталовкладень у системи вимірювання, у межах від 3000 до 10000 доларів США. Його перевагами є універсальність, можливість використання для рідин і газів незалежно від тиску та температури. Вибір конкретного типу датчика для вимірювання витрат кормів залежить від бюджету та потреби в точності вимірювань. Хоча датчик Коріоліса найточніший, він також має найвищу вартість, тоді як електромагнітний та датчик перепаду тиску можуть бути вигідним варіантом вибору для фермерських господарств, що потребує менших бюджетів та відповідно зниження точності вимірювань. Ультразвуковий датчик забезпечує компроміс між точністю та вартістю системи вимірювання витрат кормів.

Таблиця 1. Сучасні технології вимірювання витрат кормів
Table 1. Modern technologies for measuring feed consumption

Показник	Тип датчиків для вимірювання витрат кормів			
	Електромагнітний	Перепаду тисків	Ультразвуковий	Коріоліса
Особливості вимірювання	Закон електромагнітної індукції Фарадея	Диференціальний: смісний або мостовий	Перехресна кореляція перетворювач/датчик	Диференціальна фаза
Середня точність виміру	0,2...1 %	0,5...2 %	0,3...2 %	0,1 %
Середня вартість системи вимірювання	300...1000 \$	300...1000 \$	300...1000 \$	3000...10000 \$
Переваги	Відсутність рухомих частин. Корисно для корозійних речовин. Двоспрямоване вимірювання потоку.	Без рухомих частин. Універсальний, може використовуватися для рідин та газів.	Немає рухомих частин. Універсальний, може використовуватися для рідин та газів.	Універсальний, може використовуватися для рідин та газів незалежно від тиску та температури.

На основі згаданих датчиків можна реалізувати систему автоматизованого моніторингу, виконавши такі основні етапи:

- визначити конкретні потреби та вимоги до системи моніторингу на основі розміру ферми, типу свиней і методів керування системою;
- визначити датчик або комбінацію датчиків, які найбільш підходять, на основі таких чинників, як точність, надійність, вартість і простота використання;
- виконати проектування системи та розробити апаратні і програмні компоненти системи моніторингу, включаючи розміщення датчиків, підключення та програмне забезпечення для збору й аналізу даних;
- виконати тестування, перевірку та калібрування системи моніторингу в реальних умовах, щоб забезпечити точність і надійність;
- навчити персонал ферми використовувати й підтримувати систему моніторингу.

Використовуючи описані вище датчики, система моніторингу споживання корму може надати цінну інформацію про харчову поведінку свиней, таку як кількість спожитого корму, частота годування, швидкість годування і тривалість годування. Вона також може виявити будь-які зміни в моделях споживання корму, які можуть вказувати на потенційну задачу оцінки здоров'я тварин або задачі щодо ефективності функціонування систем годування. Система може надавати інформацію про ріст і продуктивність свиней, дозволяючи фермерам відповідно коригувати свої стратегії управління годівлею. Крім того, автоматизований моніторинг може зменшити витрати на

оплату праці та підвищити точність і ефективність управління кормами, що забезпечить економію коштів і підвищення прибутковості.

Існує кілька типів датчиків, які можна використовувати для автоматизованого моніторингу кормів, включаючи датчики ваги, датчики руху, датчики об'єму та датчики для відслідковування індивідуального споживання корму. Кожен тип датчика має свої переваги та недоліки, які зображені у табл. 2.

У табл. 2 окремі типи датчиків порівнювали за можливостями моніторингу окремих показників, а також їх вартістю та сервісним обслуговуванням. Як видно з табл. 2, кожен тип датчиків має свої переваги та недоліки, а їх вибір залежить від конкретних потреб і вимог ферми. Більшість датчиків можна поєднувати в єдину систему моніторингу для досягнення кращих результатів. Наприклад, датчики руху і датчики об'єму для точного дозування корму і моніторингу активності та здоров'я свиней, чи датчик радіочастотної ідентифікації та датчики ваги для індивідуального моніторингу споживання корму.

Однією з головних задач, пов'язаних з автоматизованим моніторингом кормів, є забезпечення точності системи. Цього можна досягти ретельним калібруванням датчиків і регулярним обслуговуванням, щоб переконатися, що вони функціонують правильно.

З погляду вартості, автоматизовані системи моніторингу годівлі спочатку можуть бути дорогими. Однак довгострокові переваги у вигляді підвищення ефективності та зниження витрат на робочу силу можуть зробити їх вигідною інвестицією для багатьох ферм.

Таблиця 2. Основні переваги та недоліки датчиків для моніторингу спожитого корму
Table 2. Main advantages and disadvantages of sensors for feed intake monitoring

Тип датчика	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
Датчик ваги	Точний моніторинг продуктів споживання корму. Підвищення ефективності годування. Невисока вартість датчика.	Вимагає регулярного налаштування та калібрування	Ферми з невеликим бюджетом. У комбінації з радіочастотними мітками дозволяє визначити індивідуальне споживання корму.
Датчики руху	Можливість моніторингу зміни активності та здоров'я свинок, оцінювати показники молодості за рухом свиней, виявлення порушення режиму вирощування.	Не дозволяє точно розраховувати кількість спожитого корму. Вимагає розміщення кількох датчиків для точного моніторингу кількості свиней. Вартість.	Великі ферми з необхідним бюджетом, ферми для органічного вирощування свиней.
Датчик радіочастотної ідентифікації (RFID)	Можливість моніторингу індивідуального споживання корму кожною свинкою без втручання людини.	Висока вартість. Необхідність встановлення обладнання для збору даних.	Високопродуктивні ферми з великою кількістю свиней.
Датчик об'єму	Можливість точної зміни кількості спожитого корму. Можливість підвищення точності дозування корму.	Необхідність калібрування через чуттєвість до консистенції корму. Необхідність регулярного очищення датчиків.	Ферми середнього розміру та ферми з невеликим бюджетом, де потрібне точне дозування корму.

Загалом аналіз показав, що автоматизований моніторинг кормів має потенціал для підвищення ефективності й точності управління кормами на свинофермах. Надаючи дані про споживання корму в реальному часі, ці системи можуть допомогти фермерам оптимізувати свої стратегії годівлі та гарантувати, що свині отримують правильну кількість корму.

Із використанням зазначених датчиків пропонується кілька варіантів для підвищення точності моніторингу споживання корму. Зокрема, поєднання датчика ваги з датчиком об'єму може підвищити точність, забезпечуючи подачу правильної кількості корму. Крім того, використовуючи комбінацію цих датчиків, можна реалізувати резервний моніторинг, якщо один із датчиків вийде з ладу, чи додаткову перевірку об'єму поданого корму, що ще більше підвищить точність подачі корму. Іншим варіантом є використання штучного інтелекту або алгоритмів машинного навчання для аналізу даних, зібраних із різних датчиків, і підвищення точності оцінок щодо споживання корму. Ці методи можуть допомогти вирішити потенційні задачі з точністю вимірювання та забезпечити точний моніторинг споживання свинями корму.

Також для покращання економічних показників автоматизованої системи моніторингу можна використати недорогі датчики і обладнання, що може допомогти знизити загальну вартість системи. Наприклад, замість високоякісних камер або зчитувачів RFID можна використовувати простіші та менш дорогі датчики. Також можливим варіантом є реалізація системи, яка

ефективніше використовує дані. Це означає зменшення частоти збору даних або збір даних лише за необхідності, а також використання алгоритмів для більш ефективного аналізу даних.

Крім того, використання програмного та апаратного забезпечення з відкритим кодом також може допомогти зменшити витрати. Нарешті, оптимізація конструкції системи може допомогти знизити вартість обладнання та встановлення. У підсумку, річні витрати на систему автоматизованого моніторингу можуть бути значно меншими за витрати на працівників ферми та за рахунок економії кормів.

Висновки. 1. Проведений аналіз сучасних датчиків для автоматизованого моніторингу споживання кормів свинями у фермерських господарствах свідчить про наявність їх багатьох різновидів, що впливають на точність та якість отриманої інформації. Встановлено, що кожен вид датчиків впливає на конфігурацію систем моніторингу споживання кормів, а також має свої переваги і недоліки. Означені переваги і недоліки датчиків лежать в основі обґрунтування конфігурації систем моніторингу споживання кормів для заданих умов сільськогосподарських підприємств. Використання електромагнітних датчиків забезпечує відсутність рухомих частин і є корисним для корозійних речовин. Використання датчиків перепаду тиску та ультразвукових дає переваги в тому, що вони без рухомих частин і універсальні, оскільки можуть бути використані для рідин і газів.

2. Встановлено, що використання електромагнітних датчиків має низьку середню точність виміру, від 0,2 % до 1 %. Використання датчиків перепаду тиску забезпечує середню точність виміру, від 0,5 % до 2 %. Ультразвукові датчики мають середню точність виміру від 0,3 % до 2 %. Для всіх трьох проаналізованих варіантів вартість системи вимірювання перебуває в межах від 300 до 1000 доларів США. Водночас використання датчиків Коріоліса забезпечує найточніші вимірювання серед представлених. Зокрема, точність виміру є на рівні 0,1 % та відповідно потребує найвищих капіталовкладень у системи вимірювання, у межах від 3000 до 10000 доларів США.

2. Вибір конкретного типу датчика для вимірювання витрат кормів залежить від бюджету й потреби в точності вимірювань. Хоча датчик Коріоліса найточніший, він також має найвищу вартість, тоді як електромагнітний і датчик перепаду тиску можуть бути вигідним варіантом вибору для фермерських господарств, що потребує менших бюджетів та відповідно зниження точності вимірювань. Ультразвуковий датчик забезпечує компроміс між точністю та вартістю системи вимірювання витрат кормів. Означені задачі та варіанти вдосконалення конфігурацій систем автоматизованого моніторингу споживання корму свинями у фермерських господарствах враховують особливості технологій моніторингу, конструкцій та схем використання датчиків, що забезпечують підвищення точності моніторингу споживання кормів.

Бібліографічний список

1. Гришук О. В. Автоматизовані системи контролю та управління годівлею свиней в умовах сучасних технологій. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. 3. С. 16-19.
2. Ковальова О. В. Розвиток технологій годівлі свиней з використанням автоматизованих систем контролю за їх годівлею. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2020. 4. С. 92-97.
3. Савченко О. О., Коломієць Ю. В., Глущенко О. В. Розвиток технології свиноводства в умовах автоматизації виробничих процесів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія: Механізація агропромислового виробництва*. 2019. 199. С. 166-173.
4. Ткачук С. В., Козаченко А. А. Автоматизовані системи контролю параметрів годівлі свиней. *Техніка і технологія харчових виробництв*. 2018. 4 (14). С. 1-7.
5. Тригуба А. М., Сидорчук О. В. Особливості планування проектів та програм аграрного виробництва. *Управління проектами: стан та перспективи: матеріали VI Міжнарод. конф.* Миколаїв: НУК, 2010. С. 313-316.
6. Шумоло І. М., Пархоменко О. О., Мороз Л. В. Автоматизація технології годівлі свиней з

використанням сучасних інформаційних технологій. *Науковий вісник Полісся*. 2021. 2 (16). С. 200-208.

7. Automatic detection of mounting behaviours among pigs using image analysis / A. Nasirahmadi, O. Hensel, S. A. Edwards, B. Sturm. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. 124. P. 295-302
8. Automatic monitoring of pig locomotion using image analysis / M. A. Kashiha et al. *Livestock Science*. 2014. 159. P. 141-148..
9. Automatic recognition of lactating sow behaviors through depth image processing / F. Lao et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. 125. P. 56-62.
10. Automatic recognition of lactating sow postures from depth images by deep learning detector / C. Zheng et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. 147. P. 51-63.
11. Automatic recognition of sow nursing behaviour using deep learning-based segmentation and spatial and temporal features / A. Yang et al. *Biosystems Engineering*. 2018. 175. P. 133-145.
12. Bekraoui A., Hadjadj A. Thermal flow sensor used for thermal mass flowmeter. *Microelectronics Journal*. 2020. 103. 104871. doi: 10.1016/j.mejo.2020.104871
13. Deep Learning and Machine Vision Approaches for Posture Detection of Individual Pigs / A. Nasirahmadi et al. *Sensors*. 2019. 19. P. 37-38.
14. Design and Implementation of an Ultrasonic Flowmeter Based on the Cross-Correlation Method / Rui Ren, Hongliang Wang, Xiaolei Sun, He Quan. *Sensors*. 2022. 22(19). P. 7470. doi: 10.3390/s22197470
15. Li K., Slattery C. Electromagnetic Flow Meters Achieve High Accuracy in Industrial Applications. *Analog Dialogue*. 2014. P. 48-02.
16. Method and Software of Planning of the Substantial Risks in the Projects of Production of raw Material for Biofuel / A. Tryhuba et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. 2565. P. 116-129.
17. Method of quantitative evaluation of the risk of benefits for investors of fodder-producing cooperatives / A. Tryhuba, I. Tryhuba, O. Ftoma, O. Boyarchuk. 14th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). 2019. 3. P. 55-58.
18. Monitoring of behavior using a video-recording system for recognition of Salmonella infection in experimentally infected growing pigs / S. Ahmed, H. Mun, H. Yoe, C. Yang. *Animal*. 2015. 9. P. 115-121.
19. Mounting Behaviour Recognition for Pigs Based on Deep Learning / D. Li, Y. Chen, K. Zhang, Z. Li. *Sensors*. 2019. 19. P. 4924.
20. Nasirahmadi A., Edwards S. A., Sturm B. Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs. *Livestock Science*. 2017. 202. P. 25-38.
21. The automatic monitoring of pigs water use by cameras / M. Kashiha et al. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2013. 90. P. 164-169.
22. Tryhuba A., 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.

Стаття надійшла 15.06.2023

**ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ
В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

УДК 621.311.1

**АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
З ГРОЗОЗАХИСНИМИ ТРОСАМИ ПІД ЧАС КЕРОВАНОЇ КОМУТАЦІЇ**

Віталій Левонюк, к. т. н., доцент

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

Левонюк В. Аналіз перехідних процесів у лінії електропередачі з грозозахисними тросами під час керованої комутації

У статті здійснено аналіз наукових публікацій, які стосуються дослідження перехідних процесів в елементах електротехнічних систем пересилання енергії під час керованих комутацій елегазовими вимикачами. Аналіз показав, що питання дослідження перехідних процесів під час керованих комутацій є актуальним, однак недостатньо розкритим щодо перехідних процесів у грозозахисних тросах.

Розроблено математичну модель фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії, ключовим елементом якого є довга лінія електропередачі з грозозахисними тросами надвисокої напруги з урахуванням розподіленості параметрів. Розроблена математична модель ґрунтується на рівнянні довгої лінії з частинними похідними другого порядку. Для розв'язку згаданого рівняння запропоновано використати крайові умови Неймана та Пуанкаре. Рівняння довгої лінії з частинними похідними другого порядку розв'язуються методом прямих з використанням поняття центральної похідної. Здійснено пошук напруг у фіктивних вузлах лінії електропередачі та представлено їх вигляд для фазних проводів у кінці лінії електропередачі та грозозахисних тросів на початку та кінці лінії електропередачі. На основі розробленої математичної моделі написано програмний код алгоритмічною мовою програмування *Visual Fortran*, з допомогою якого здійснено два числових експерименти. У першому експерименті досліджувалися перехідні процеси у лінії електропередачі без урахування керованої комутації, а в другому – з урахуванням. Представлено результати комп'ютерної симуляції перехідних електромагнітних процесів у фазних проводах лінії та грозозахисних тросах у вигляді рисунків, які аналізуються. Функціональні залежності, які на осцилограмах позначено жовтим кольором стосуються фази А, зеленим – фази В та червоним – фази С.

Ключові слова: перехідні електромагнітні процеси, керована комутація, довга лінія, грозозахисні троси, математична модель, крайові умови.

Levoniuk V. Analysis of transient processes in a power transmission line with lightning protection cables during controlled switching

The article analyzes scientific publications related to the study of transient processes in the elements of electrotechnical systems of energy transmission during controlled commutations by electric and gas switches. The analysis shows that the issue of researching transient processes during controlled switching is relevant, but insufficiently explored with respect to transient processes in lightning protection cables.

The author has developed a mathematical model of a fragment of an electrotechnical energy transmission system with the key element of which is a long power transmission line with lightning protection cables of ultra-high voltage, taking into account the parameters distribution. The developed mathematical model is based on the equation of a long line with partial derivatives of the second order. Neumann and Poincaré boundary conditions are proposed to solve the mentioned equation. Equations of a long line with second-order partial equations are solved by the method of straight lines using the concept of the central derivative. The search for voltages in fictitious nodes of the power transmission line was carried out and their appearance was presented for the phase wires at the end of the power transmission line and lightning protection cables at the beginning and end of the power transmission line. Based on the developed mathematical model, a program code was written in the algorithmic programming language *Visual Fortran*, with the help of which two numerical experiments were carried out. In the first experiment, transient processes in the power transmission line were studied without considering the controlled switching, and in the second – with it. The results of the computer simulation of transient electromagnetic processes in the phase wires of the line and lightning protection cables are presented in the form of drawings that are analyzed. Functional dependences marked in yellow on the oscillograms refer to phase A, green to phase B, and red to phase C.

Key words: transient electromagnetic processes, controlled switching, long line, lightning protection cables, mathematical model, boundary conditions.

Постановка проблеми. Починаючи з 80-х років минулого століття електротехнічні компанії у якості ізоляційних матеріалів взяли на озброєння елегаз. Йому швидко знайшли застосування в комутаційних апаратах через його надзвичайно хороші діелектричні властивості. Сьогодні у високорозвинених та економічно лідируючих країнах вже неможливо зустріти електричні комутаційні апарати з такими ізоляційними матеріалами, як олива чи повітря. Зміни торкнулися й електричних мереж України. Попри наявність великої кількості старих вимикачів, українські електричні мережі надзвичайно швидкими темпами переходили на елегазові вимикачі, особливо це стосується мереж надвисокої напруги. Це пов'язано з багатьма факторами, найголовнішим із яких є відсутність запасних частин, які необхідні для ремонту старих вимикачів, адже їх виготовлення вже давно зупинили [1]. У довоєнний період модернізація відбувалася швидкими темпами. Старі повітряні вимикачі, які вийшли з ладу, замінювали новими елегазовими, під час реконструкції та зведенні нових підстанцій встановлювалися тільки елегазові вимикачі, а в післявоєнний період і поготів буде шалене впровадження цієї техніки в електричних мережах України, адже вони зазнали великих руйнацій внаслідок енергетичного терору зі сторони агресора.

Сучасні елегазові вимикачі високих та надвисоких напруг комплектуються пристроями керованої комутації. Ці пристрої виконуються на основі механізмів та електронних систем, які виконують чітко визначені керовані дії, щоб забезпечити безпечне та ефективне комутування струму, шляхом керування рухом контактів при увімкненні/вимкненні вимикача. Окрім цього, здійснюється контроль за швидкістю і послідовністю замикання/розмикання контактів, моніторинг струму і напруги під час комутації, регулювання демпфування та інші параметри для забезпечення стабільної і надійної комутації струму.

Керування увімкненням та вимкненням вимикачів відбувається схоже, різниця полягає лише в тому, що увімкнення відбувається, коли синусоїда напруги набуває нульового значення, а вимкнення – коли синусоїда струму знаходиться в околі нуля. Ці моменти часу, коли напруга або струм перетинають нульову лінію, називаються «нульовим перетином» або «нульовим кросом». Застосування керованої комутації дає змогу уникнути виникнення великих перенапруг та дугових розрядів (ву дугогасильних камерах вимикачів), які можуть виникати при комутації великих струмів.

Основною метою керованої комутації є уникнення перехідних процесів. З точки зору фізики, перехідні процеси – це перерозподіл нако-

пиченої енергії в ємнісних та індуктивних елементах системи щоразу, коли відбувається зміна її стану. Таким чином, керована комутація є методом оптимізації моменту перемикачів, що призводить до мінімального перерозподілу енергії [12].

Керована комутація має вагомe значення у високовольтних системах, оскільки важливо уникати перенапруг, коливань і потенційно шкідливих ефектів при вмиканні струму. Використання керованої комутації призводить до покращання якості електричного захисту, знижує згенеровані шуми і завади, а також захищає електричні пристрої від надмірного зношування.

Наші останні праці [2; 6; 7] стосувалися дослідження впливу аварійних режимів роботи ліній електропередач надвисокої напруги на перехідні процеси у грозозахисних тросах лінії. Під час проведення числових експериментів було помічено, що при виникненні аварійних станів, у грозозахисних тросах лінії індуктувалися струми. Це пов'язано з несиметричним режимом роботи лінії електропередачі. Тепер, якщо покроково проаналізувати кероване вмикання лінії, яке відбувається пофазно, з почерговим увімкненням фаз лінії, то виходить, що під час вмикання лінії присутні несиметричні режими її роботи, зокрема спочатку однофазний, пізніше двофазний, а вже після комутації третьої фази настане симетричний режим роботи. Ми вирішили більш детально дослідити це питання, тому основним лейтмотивом нинішньої праці є дослідження перехідних процесів у лінії електропередачі надвисокої напруги з грозозахисними тросами при керованому увімкненні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цілком очевидно, що проведення натурних експериментів на таких об'єктах, як лінії електропередач надвисоких напруг, є неможливим, а поготів у нинішній воєнний період, через значну стратегічну важливість об'єкта. Тому ми свої дослідження будемо здійснювати на основі математичного моделювання. У науковій літературі є велика кількість робіт, присвячених дослідженню перехідних електромагнітних процесів у лініях електропередач, розглянемо деякі з них, близькі до нинішньої праці.

У статті [9] докладно описано теорію керованої комутації вимикачів змінного струму (HVAC), які використовуються сьогодні. Обговорюються переваги контрольованого перемикачів та наводяться приклади осцилограм напруг і струмів із практичного застосування керованої комутації шунтувальних конденсаторів, шунтувальних реакторів, трансформаторів та ліній електропередач. Також представлено рекомендації з вибору оптимального часу перемикачів для

зменшення тривалості перехідних процесів.

У публікації [10] представлено результати аналізу різних варіантів увімкнення та вимкнення трансформаторів та шунтових реакторів. Зокрема, розкрито всі можливі варіанти, включаючи групи і схеми з'єднань трансформаторів, та представлено результати комп'ютерних симуляцій. Також автори статті дають свої рекомендації з використання керуваної комутації вимикачів.

У праці [16] представлено результати детального аналізу проблеми хибної керуваної комутації елегазового вимикача. Аналіз проводиться на основі реальних даних, отриманих із ресстратора вимикача. Автор представив недоліки налаштування системи та показав результати після виправлення помилок у налаштуванні.

Також існують роботи, які присвячені дослідженню керуваних комутацій на основі розроблених математичних моделей з використанням відомих програмних комплексів, таких як *MATLAB/Simulink*, *PSCAD* та *EMTP-RV*.

Авторами статті [4] запропоновано методологію проведення керуваної комутації для зменшення перенапруг та ударних струмів під час увімкнення не скомпенсованих шунтувальними реакторами ліній електропередач. Ефективність методології оцінювалася шляхом проведення комп'ютерних симуляцій фрагмента електричної мережі 400 кВ у програмному комплексі *PSCAD/EMTDC*. Встановлено, що запропонована методика дає змогу зменшити перенапруги та ударні струми на 33 %.

У праці [17] досліджувалися перехідні процеси, які спричинені керуваною та некеруваною комутацією контурів високої напруги. Представлено перехідні процеси при увімкненні та автоматичному повторному увімкненні лінії електропередачі 400 кВ. Також досліджувалися перехідна відновлювальна напруга та розподіл напруги між контактами вимикача. Дослідження проводили на розроблених математичних моделях у програмному комплексі *EMTP-RV*. Отримані результати показали, що керувана комутація значно зменшує пускові струми та зменшує комутаційні перенапруги.

У праці [11] пропонується детальна модель вимикача високої напруги. Ця модель враховує не лише зміну діелектричної міцності міжконтактного проміжку, а й швидкість цієї зміни, що суттєво впливає на відтворення перехідних комутаційних процесів під час їх моделювання. Модель також враховує явище повторного запалювання дуги та вплив фізичних параметрів, які можуть змінити час роботи первинних та допоміжних контактів. Цю математичну модель розроблено в програмному комплексі *PSCAD*.

У статті [8] в програмному комплексі *MatLab/Simulink* розроблено структурно-матема-

тичну модель для дослідження перехідних процесів під час керуваних комутацій елементів електричних мереж високої напруги. Представлено результати комп'ютерних симуляцій перехідних процесів під час близьких та віддалених коротких замикань. Дано рекомендації із застосування керуваної комутації.

У статті [13], на підґрунті викладеної теорії керуваної комутації, у програмному комплексі *MatLab/Simulink* розроблено математичну модель вимикача надвисокої напруги. Було проаналізовано перехідні процеси під час увімкнення лінії з різними видами навантаження та при комутації струмів коротких замикань залежно від місця їх виникнення (близькі чи віддалені). Отримані результати комп'ютерної симуляції повністю підтвердилися проведеними натурними експериментами, а запропоновані рекомендації впроваджено у використання на електричній станції.

Авторами статті [15] у програмному комплексі *MatLab/Simulink* розроблено модель частини електроенергетичної системи. Досліджено перехідні процеси при різних режимах роботи, включаючи аварійні. Окремо розглядається питання керуваних комутацій при вимкненні коротких замикань та представлено результати порівняння отриманих симуляцій з реальними осцилограмами перехідних процесів.

Аналіз доступної літератури показав, що питання дослідження перехідних процесів під час керуваних комутацій є актуальним і цікавить науковців, однак аналізу впливу керуваної комутації на перехідні процеси у грозозахисних тросах уваги приділено недостатньо. Тому це питання потребує додаткового вивчення.

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є дослідження впливу керуваного увімкнення лінії електропередачі надвисокої напруги з грозозахисними тросами на перехідні процеси, які протікають у цій лінії.

Виклад основного матеріалу. Ми вже згадували, що дослідження перехідних процесів будемо здійснювати на основі математичного моделювання. Тому представимо розробку математичної моделі досліджуваного фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії.

На рис. 1 представлено заступну схему фрагмента досліджуваної електротехнічної системи пересилання енергії. Цей фрагмент складається з лінії електропередачі, яка представлена як лінія з розподіленими параметрами з урахуванням двох грозозахисних тросів, яка працює на еквівалентоване симетричне активно-індуктивне навантаження. Лінія електропередачі представлена як п'ятипровідна – грозозахисні

троси $T1$, $T2$ та фази A , B , C . Еквівалентоване активно-індуктивне навантаження представлено активними опорами r_H та індуктивностями L_H . До початку лінії електропередачі прикладається

напряга живлення. Грозозахисні троси $T1$ та $T2$ з'єднані між собою у кінці лінії та розімкнені на її початку, тобто утворюють розімкнений контур із заземленням троса $T2$ на початку лінії.

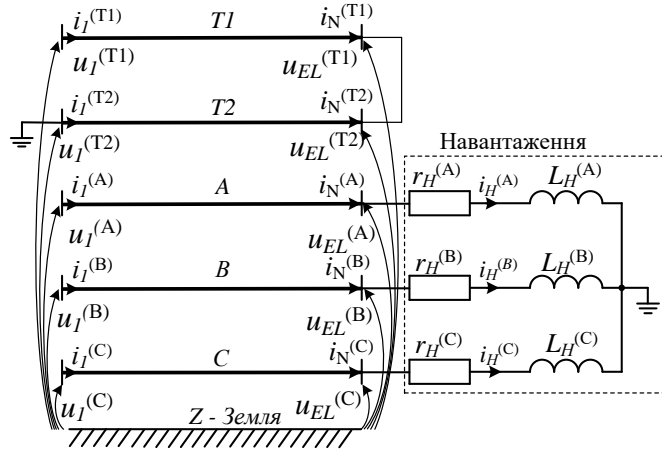


Рис. 1. Заступна схема фрагмента досліджуваної електротехнічної системи пересилання енергії
Fig. 1. Substitute diagram of the studied electrotechnical system of energy transmission

Використавши основні закони електротехніки, можемо записати рівняння електромагнітного стану досліджуваного об'єкта:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\mathbf{LC})^{-1} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} - (\mathbf{Lg} + \mathbf{rC}) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{rgu} \right), \quad \frac{d\mathbf{i}_H}{dt} = \mathbf{L}_H^{-1} (\mathbf{u}_{EL}^H - \mathbf{r}_H \mathbf{i}_H). \quad (1)$$

У першому рівнянні (1) координатами режиму є вектори напруг відносно землі та струмів тросів і фаз лінії з розподіленими параметрами як функції від відстані x та часу t , вони мають вигляд:

$$\mathbf{u} = \text{colon} (u^{(T1)}, u^{(T2)}, u^{(A)}, u^{(B)}, u^{(C)}), \quad \mathbf{i} = \text{colon} (i^{(T1)}, i^{(T2)}, i^{(A)}, i^{(B)}, i^{(C)}), \quad (2)$$

а матриці з погонними параметрами лінії електропередачі мають такий вигляд:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{T1} & M_{TT} & M_{TF} & M_{TF} & M_{TF} \\ M_{TT} & L_{T2} & M_{TF} & M_{TF} & M_{TF} \\ M_{FT} & M_{FT} & L_A & M_{FF} & M_{FF} \\ M_{FT} & M_{FT} & M_{FF} & L_B & M_{FF} \\ M_{FT} & M_{FT} & M_{FF} & M_{FF} & L_C \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C1 & -C_{TT} & -C_{TF} & -C_{TF} & -C_{TF} \\ -C_{TT} & C1 & -C_{TF} & -C_{TF} & -C_{TF} \\ -C_{FT} & -C_{FT} & C2 & -C_{FF} & -C_{FF} \\ -C_{FT} & -C_{FT} & -C_{FF} & C2 & -C_{FF} \\ -C_{FT} & -C_{FT} & -C_{FF} & -C_{FF} & C2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_{T1} + r_Z & r_Z & r_Z & r_Z & r_Z \\ r_Z & r_{T2} + r_Z & r_Z & r_Z & r_Z \\ r_Z & r_Z & r_A + r_Z & r_Z & r_Z \\ r_Z & r_Z & r_Z & r_B + r_Z & r_Z \\ r_Z & r_Z & r_Z & r_Z & r_C + r_Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} G1 & -g_{TT} & -g_{TF} & -g_{TF} & -g_{TF} \\ -g_{TT} & G1 & -g_{TF} & -g_{TF} & -g_{TF} \\ -g_{FT} & -g_{FT} & G2 & -g_{FF} & -g_{FF} \\ -g_{FT} & -g_{FT} & -g_{FF} & G2 & -g_{FF} \\ -g_{FT} & -g_{FT} & -g_{FF} & -g_{FF} & G2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C1 = C_{T1T2} + 3C_{TF} + C_{TZ}, \quad C2 = 2C_{FT} + 2C_{FF} + C_{FZ}, \quad G1 = g_{T1T2} + 3g_{TF} + g_{TZ}, \quad G2 = 2g_{FT} + 2g_{FF} + g_{FZ}. \quad (4)$$

де $u^{(T1)}$, $u^{(T2)}$, $u^{(A)}$, $u^{(B)}$, $u^{(C)}$ – напруги грозозахисних тросів $T1$, $T2$ відносно землі та фазні напруги фаз A , B , C відповідно; $i^{(T1)}$, $i^{(T2)}$, $i^{(A)}$, $i^{(B)}$, $i^{(C)}$ – струми грозозахисних тросів $T1$, $T2$ та проводів фаз A , B , C відповідно; L_{T1} , L_{T2} , L_A , L_B , L_C – погонні індуктивності грозозахисних тросів $T1$, $T2$ та проводів фаз A , B , C відповідно; M_{TT} , M_{FT} , M_{FF} – погонні коефіцієнти взаємодукції «трос-трос», «трос-фаза», «фаза-фаза» відповідно; R_{T1} , R_{T2} , R_A , R_B , R_C , R_Z – погонні опори грозозахисних тросів $T1$, $T2$, проводів фаз A , B , C та землі відповідно; C_{TT} , C_{TF} , C_{FF} , g_{TT} , g_{TF} , g_{TF} – ємності та провідності між грозозахисними тросами, між грозозахисними тросами і фазними проводами та між фазними проводами відповідно.

У другому рівнянні (1) вектори напруг, струмів та матриці погонних параметрів мають такий вигляд:

$$\mathbf{i}_H = \text{colon}(i_H^{(A)}, i_H^{(B)}, i_H^{(C)}), \mathbf{u}_{EL}^H = \text{colon}(u_{EL}^{(A)}, u_{EL}^{(B)}, u_{EL}^{(C)}),$$

$$\mathbf{r}_H = \text{diag}(r_H^{(A)}, r_H^{(B)}, r_H^{(C)}), \mathbf{L}_H = \text{diag}(L_H^{(A)}, L_H^{(B)}, L_H^{(C)}), \quad (5)$$

де $i_H^{(A)}, i_H^{(B)}, i_H^{(C)}$ – фазні струми гілок еквівалентованого активно-індуктивного навантаження; r_H, L_H – активні опори та індуктивності фазних гілок еквівалентованого активно-індуктивного навантаження.

Рівняння (1) описують електромагнітний стан досліджуваного фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії. Перше рівняння в (1) описує перехідні хвильові електромагнітні процеси у довгій лінії електропередачі з розподіленими параметрами. Воно представлено як диференціальне рівняння з частинними похідними другого порядку. Для його розв'язку потрібно мати крайові умови, зокрема напруги на початку та в кінці лінії електропередачі. У нашому випадку напруги фазних проводів на початку лінії електропередачі є заданими функціями, ці напруги виступають крайовими умовами першого роду. Щодо напруг грозозахисних тросів на початку і в кінці лінії та напруг фазних проводів у кінці лінії, то вони є невідомими, що спричинено конфігурацією з'єднання грозозахисних тросів та фазних проводів лінії з іншими елементами досліджуваного фрагмента електротехнічної системи пересилання енергії. Для пошуку цих напруг ми пропонуємо використати крайові умови другого та третього родів. Щодо другого рівняння в (1), то це звичайне диференціальне рівняння. Його розв'язок здійснюється будь-яким числовим методом без зайвих труднощів.

Детальніше ознайомитися з процедурою пошуку крайових умов до диференціального рівняння довгої лінії з частинними похідними для задач подібного плану можна, наприклад, у таких наших працях [5; 14]. Задля уникнення перевантаження статті математичними виведеннями ми лише представимо ключові етапи та результати пошуку крайових умов.

Як крайову умову до першого рівняння в (1) ми пропонуємо використати таке рівняння:

$$-\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} = \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{i}}{\partial t} + \mathbf{r} \mathbf{i}. \quad (6)$$

Рівняння (6) легко отримується на основі другого закону Кірхгофа для електричних кіл з розподіленими параметрами. За означенням воно може бути використане як крайова умова до першого рівняння в (1).

Якщо здійснити дискретизацію першого рівняння в (1) та рівняння (6), використавши метод прямих та поняття центральної похідної [3], отримаємо:

$$\frac{d\mathbf{v}_j}{dt} = (\mathbf{LC})^{-1} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} (\mathbf{u}_{j-1} - 2\mathbf{u}_j + \mathbf{u}_{j+1}) - (\mathbf{Lg} + \mathbf{rC}) \mathbf{v}_j - \mathbf{rgu}_j \right), \quad \frac{d\mathbf{u}_j}{dt} = \mathbf{v}_j, \quad j = 1, \dots, N; \quad (7)$$

$$\frac{d\mathbf{a}_j}{dt} = \mathbf{L}^{-1} \left(\frac{1}{2\Delta x} (\mathbf{u}_{j-1} - \mathbf{u}_{j+1}) - \mathbf{r} \mathbf{i}_j \right), \quad j = 1, \dots, N, \quad (8)$$

де Δx – крок дискретизації, N – кількість дискретних вузлів.

Аналізуючи рівняння (7) та (8), бачимо, що для знаходження напруг першого ($j = 1$) та останнього ($j = N$) дискретних вузлів лінії та струмів у першій та останній дискретних гілках лінії потрібно знати напруги фіктивних вузлів на початку (\mathbf{u}_0) та в кінці (\mathbf{u}_{N+1}) лінії.

Ми вже згадували, що напруги фазних проводів на початку лінії є відомими, напруги $u_1^{(A)}, u_1^{(B)}, u_1^{(C)}$ – задано (напруги живлення лінії). Також нам є відомою напруга грозозахисного троса $T2$ на початку лінії. Вона рівна нулю $u_1^{(T2)} = 0$, оскільки грозозахисний трос $T2$ на початку лінії електропередачі заземлений. Тому невідомою напругою на початку лінії залишається напруга грозозахисного троса $T1$. Щодо напруг у кінці лінії, то жодна з напруг нам не відома.

Грозозахисний трос $T1$ на початку лінії перебуває в розімкненому стані (стан неробочого

ходу). Для знаходження напруги $u_1^{(T1)}$ грозозахисного троса $T1$ на початку лінії з допомогою рівнянь (7), потрібно знайти фіктивну напругу для грозозахисного троса $T1$ на початку лінії $u_0^{(T1)}$. Здійснимо пошук цієї напруги $u_0^{(T1)}$. Процедура пошуку цієї напруги детально нами описана у праці [7]. Представимо кінцевий вигляд цієї фіктивної напруги:

де $\mathbf{A} = \mathbf{L}^{-1}$; $\mathbf{K} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{r}$; $\mathbf{P} = (\mathbf{LC})^{-1}$; $\mathbf{D} = \mathbf{Prg}$; $\mathbf{F} = \mathbf{P}(\mathbf{Lg} + \mathbf{rC})$; $g_{T1,m}, C_{T1,m}$ – питомі часткові власні і взаємні активні провідності і ємності між тросом $T1$ та тросом $T2$, фазами A, B, C лінії і землею Z ; $u^{(T1,m)}$ – напруги між тросом $T1$ та тросом $T2$, фазами A, B, C лінії і землею Z першого вузла дискретизації лінії відповідно; C_{11}, G_{11} – елементи матриць \mathbf{C} та \mathbf{G} відповідно; $m = T2, A, B, C, Z$; $k = 1, 2, 3, 4, 5$; k – номер стовпців матриць та рядків векторів.

$$\begin{aligned}
 u_0^{T1} = & \frac{2\Delta x}{2C_{11}P_{11} + \Lambda_{11}} \left\{ \frac{1}{2\Delta x} \left(\sum_{k=1}^5 (\Lambda_{1,k} u_2^{(k)}) - \sum_{k=2}^5 (\Lambda_{1,k} u_0^{(k)}) \right) + \right. \\
 & + \sum_{k=1}^5 (K_{1,k} i_1^{(k)}) - \Delta x \left(G_{11} v_1^{(T1)} - \sum_{m=T2}^C \left(g_{T1,m} v_1^{(m)} + C_{T1,m} \frac{dv_1^{(m)}}{dt} \right) \right) - \\
 & + \sum_{k=1}^5 (K_{1,k} i_1^{(k)}) - \Delta x \left(G_{11} v_1^{(T1)} - \sum_{m=T2}^C \left(g_{T1,m} v_1^{(m)} + C_{T1,m} \frac{dv_1^{(m)}}{dt} \right) \right) - \\
 & - \Delta x C_{11} \left(\frac{1}{(\Delta x)^2} \left(\sum_{k=1}^5 (P_{1,k} i_1^{(k)} + P_{1,k} u_2^{(k)}) \right) - \right. \\
 & \left. - \frac{2}{(\Delta x)^2} \sum_{k=1}^5 (P_{1,k} u_1^{(k)}) - \sum_{k=1}^5 (F_{1,k} v_1^{(k)} + D_{1,k} u_1^{(k)}) \right) \left. \right\}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\mathbf{u}_{N+1} = \mathbf{u}_{N-1} + 2(\mathbf{u}_{EL} - \mathbf{u}_N), \quad \mathbf{u}_{EL} = \text{colon} \left(u_{EL}^{(T1)}, u_{EL}^{(T2)}, u_{EL}^{(A)}, u_{EL}^{(B)}, u_{EL}^{(C)} \right). \quad (10)$$

Аналогічно попередньому випадку представимо кінцеві вирази для знаходження напруг у кінці лінії.

Оскільки грозозахисні троси в кінці лінії з'єднані між собою (див. рис. 1), то їх напруги в кінці лінії будуть однаковими, $u_{EL}^{(T1)} = u_{EL}^{(T2)} = u_{EL}^{(T)}$.

$$u_{EL}^{(T)} = \frac{1}{2} \left\{ u_N^{(T2)} + u_N^{(T1)} - \Delta x \left(\sum_{m=T2, n=T1}^{C,C} \left(M_{T1,m} \frac{di_N^{(m)}}{dt} + M_{T2,n} \frac{di_N^{(n)}}{dt} \right) + 2r_Z (i_N^{(A)} + i_N^{(B)} + i_N^{(C)}) \right) \right\}. \quad (11)$$

де m, n – найменування грозозахисних тросів або фазних проводів ($n = T1, A, B, C$); $i_N^{(Z)}$ – струм в землі останньої дискретної гілки ($i_N^{(Z)} = i_N^{(A)} + i_N^{(B)} + i_N^{(C)}$).

Напруги в кінці лінії для фазних проводів будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 u_{EL}^{(A)} = & - \frac{\Delta x L_A L_H^{(A)}}{\Delta x L_A - L_H^{(A)}} \left\{ - \frac{1}{\Delta x L_A} \left[u_N^{(A)} + \Delta x \left(\sum_{q=T1}^C \left(M_{A,q} \frac{di_N^{(q)}}{dt} \right) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + (r_A + r_Z) i_N^{(A)} + r_Z \sum_{q=B}^C (i_N^{(q)}) \right) \right] - \frac{r_H^{(A)} i_H^{(A)}}{L_H^{(A)}} \right\}; \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{EL}^{(B)} = & - \frac{\Delta x L_B L_H^{(B)}}{\Delta x L_B - L_H^{(B)}} \left\{ - \frac{1}{\Delta x L_B} \left[u_N^{(B)} + \Delta x \left(\sum_{d=T1}^C \left(M_{T1,d} \frac{di_N^{(d)}}{dt} \right) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + (r_B + r_Z) i_N^{(B)} + r_Z \sum_{d=T2}^C (i_N^{(d)}) \right) \right] - \frac{r_H^{(B)} i_H^{(B)}}{L_H^{(B)}} \right\}; \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u_{EL}^{(C)} = & - \frac{\Delta x L_C L_H^{(C)}}{\Delta x L_C - L_H^{(C)}} \left\{ - \frac{1}{\Delta x L_C} \left[u_N^{(C)} + \Delta x \left(\sum_{p=T1}^B \left(M_{T1,p} \frac{di_N^{(p)}}{dt} \right) + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. + (r_C + r_Z) i_N^{(C)} + r_Z \sum_{p=T2}^C (i_N^{(p)}) \right) \right] - \frac{r_H^{(C)} i_H^{(C)}}{L_H^{(C)}} \right\}, \quad (14)
 \end{aligned}$$

де d, p, q – найменування грозозахисних тросів або фазних проводів ($d = T1, T2, A, C$; $p = T1, T2, A, B$; $q = T1, T2, B, C$).

При розрахунках значення виразів (12) – (14) вносять до відповідних елементів векторів \mathbf{u}_{EL} та \mathbf{u}_{EL}^H .

Інтегруванню підлягає така система диференціальних рівнянь: друге рівняння в (1), (7), (8) з урахуванням (3), (4), (9), (10) та (11) – (14).

На підґрунті розробленої математичної моделі мовою програмування *Visual Fortran* було написано програмний код. Цей програмний код дає змогу здійснювати комп'ютерні симуляції, зокрема відтворювати перехідні електромагнітні

процеси в досліджуваному фрагменті електротехнічної системи пересилання енергії.

Комп'ютерна симуляція здійснювалася для двох числових експериментів. У першому досліді симулювалося увімкнення лінії без урахування керованої комутації, а в другому – імітувалося кероване увімкнення. Кероване увімкнення імітувалося шляхом пофазного увімкнення фаз ліній з урахуванням початку синусоїд функцій напруг від нуля у відповідні моменти часу. Моделювання вимикача у нинішній статті не відбувалося, оскільки це не входить до завдань цієї статті. Симуляція увімкнення лінії проводилася з моменту часу $t = 0$ с. При пофазному увімкненні фаза A вмикалася у момент часу $t = 0,009027$ с, фаза $B - t = 0,005694$ с, фаза $C - t = 0,002361$ с.

Для розрахунків прийнято реальну лінію електропередачі 750 кВ, яка з'єднує ПС «Західно-українська» (Україна) з ПС «Альбертірша» (Угорщина) з такими параметрами: $r_{0F} = 1,9 \cdot 10^{-5}$ Ом/м, $r_{0T} = 4,28 \cdot 10^{-4}$ Ом/м, $r_{0Z} = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом/м, $L_{0F} = 1,647 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $L_{0T} = 2,4049 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $M_{0FF} = 7,41 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $M_{0FT} = 7,4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $M_{0TT} = 7,05 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $g_{0F} = 3,253 \cdot 10^{-11}$ См/м, $g_{0FF} = g_{0FT} = 3,253 \cdot 10^{-13}$ См/м, $g_{0T} \approx 0$, $g_{0TT} \approx 0$, $C_{0F} = 0,8647 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $C_{0FF} = 0,103 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $C_{0FT} = 0,0723 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $C_{0T} = 0,3501 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, $C_{0TT} = 0,04162 \cdot 10^{-11}$ Ф/м. Лінія працювала на симетричне еквівалентоване активно-індуктивне навантаження з $r_H = 550$ Ом, $L_H = 0,9$ Гн. Симуляція здійснювалася з такими координатами режиму: $u_1^{(A)} = 630 \sin(\omega t + 18^\circ)$ кВ, $u_1^{(B)} = 630 \sin(\omega t - 102^\circ)$ кВ, $u_1^{(C)} = 630 \sin(\omega t + 138^\circ)$ кВ, $\omega = 314,15$ с⁻¹. При дискретизації рівнянь за просторовою координатою крок був рівний $\Delta x = l/20 = 23,8$ км. Рівняння електромагнітного стану інтегрувалися неявним методом Гіра другого порядку.

Функції напруг та струмів, відображені жовтим кольором, стосуються фази A , зеленим – фази B , червоним – фази C , а чорним – грозозахисних тросів лінії.

На рис. 2 представлено функції фазних напруг по середині лінії електропередачі для першого експерименту. Бачимо, що під час увімкнення лінії без урахування керованої комутації присутні значні перенапруги, зокрема миттєве максимальне значення напруги фази A складало 731 кВ, фази $B - 955$ кВ, фази $C - 655$ кВ. В усталеному режимі напруги мали амплітудні значення 610 кВ. Бачимо, що при увімкненні лінії електропередачі без задіявання керованої комутації у лінії мали місце перенапруги, які на фазі B сягали $1,48 U_{MP}$.

На рис. 3 репрезентовано функції струмів фаз лінії на її початку для першого експерименту. Аналізуючи рисунок, бачимо, що максимальне значення ударного струму фази A становило 2,1 кА, фази $B - 2,4$ кА, а фази $C - 2,3$ кА. В

усталеному режимі функції струмів мали амплітудні значення 1,33 кА.

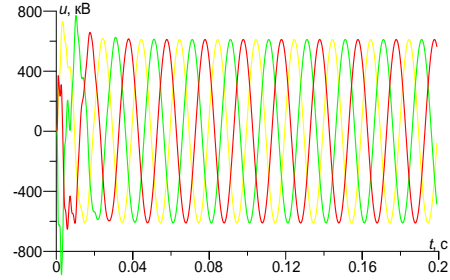


Рис. 2. Часовий розподіл функції фазних напруг по середині лінії для першого експерименту

Fig. 2. Time distribution of the phase voltage function along the middle of the line for the first experiment

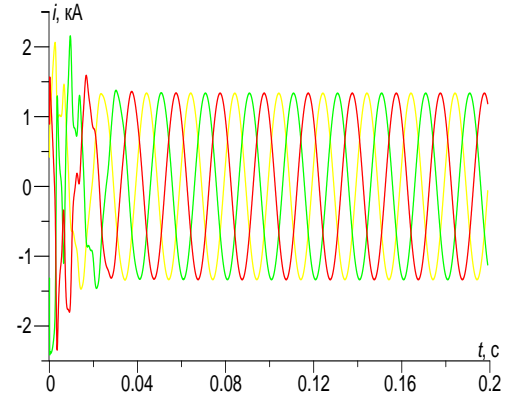


Рис. 3. Часовий розподіл функції струмів на початку лінії для першого експерименту

Fig. 3. Time distribution of the current function at the beginning of the line for the first experiment

На рис. 4 зображено часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T1$ на початку лінії для першого експерименту. Бачимо, що на початку лінії напруга грозозахисного троса $T1$ під час увімкнення сягає максимального значення 100 В, а в усталеному режимі – 50 В.

На рис. 5 показано часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T1$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для першого експерименту. Оскільки грозозахисний трос $T1$ на початку лінії перебуває в розімкненому стані (режим неробочого ходу), то в ньому будуть протікати лише струми витоків. Бачимо, що амплітудне значення струму витоків першої дискретної гілки становить 0,1 А.

Рисунки 6 та 7 репрезентують часові розподіли функції напруги за 24 км від початку лінії (другий дискретний вузол) та струму на початку лінії (перша дискретна гілка). Аналізуючи ці рисунки, бачимо, що у грозозахисному тросі $T2$, так як і у $T1$, присутні незначні напруги та струми. Це легко пояснюється симетричним режимом роботи лінії електропередачі, оскільки лінія живиться симетричною системою трифазних напруг та працює на симетричне активно-індуктивне навантаження. Тому індукування у грозозахисних тросах не відбувається.

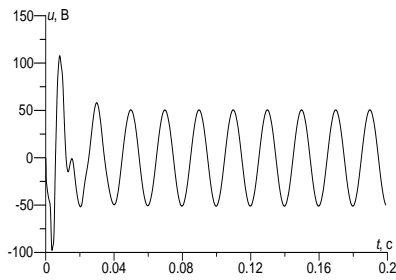


Рис. 4. Часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T1$

на початку лінії для першого експерименту
Fig. 4. Time distribution of the voltage of the lightning protection cable $T1$ at the beginning of the line for the first experiment

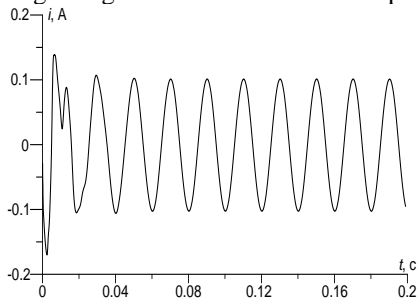


Рис. 5. Часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T1$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для першого експерименту

Fig. 5. Time distribution of the current function of the lightning protection cable $T1$ at the beginning of the line (first discrete branch) for the first experiment

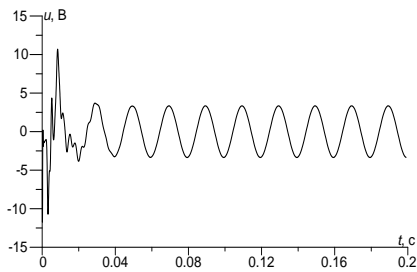


Рис. 6. Часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T2$ за 24 км від початку лінії (другий дискретний вузол) для першого експерименту

Fig. 6. Time distribution of the voltage function of the lightning protection cable $T2$ 24 km from the beginning of the line (the second discrete node) for the first experiment

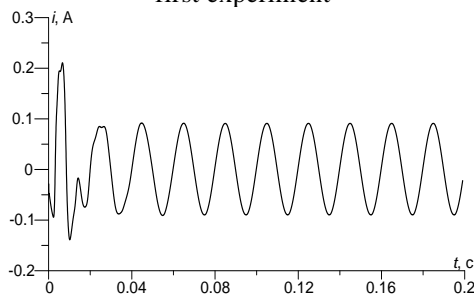


Рис. 7. Часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T2$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для першого експерименту

Fig. 7. Time distribution of the current function of the lightning protection cable $T2$ at the beginning of the line (first discrete branch) for the first experiment

На рис. 8 представлено часовий розподіл функцій фазних напруг по середині лінії для другого експерименту. Бачимо, що характер перехідного процесу під час увімкнення лінії із застосуванням керованої комутації суттєво змінився порівняно з першим експериментом (див. рис. 2), зникли суттєві перенапруги. Тепер, під час увімкнення, напруги мали такі максимальні значення: фаза A – 682 кВ, фаза B – 685 кВ, а фаза C – 687 кВ, що становить $1,06U_{MP}$ порівняно з $1,48U_{MP}$ у першому експерименті. В усталеному режимі напруги мають такі самі значення, як і в першому експерименті.

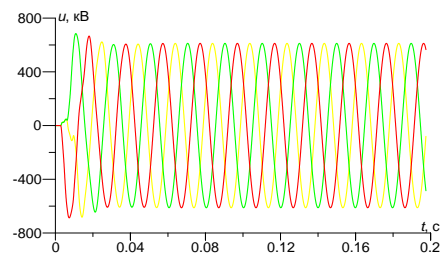


Рис. 8. Часовий розподіл функцій фазних напруг по середині лінії для другого експерименту

Fig. 8. Time distribution of the phase voltage function along the middle of the line for the second experiment

На рис. 9 представлено часовий розподіл функцій струмів на початку лінії для другого експерименту. Тут порівняно з першим експериментом під час увімкнення лінії ударні струми теж зменшилися. Максимальні значення ударних струмів були такі: фази A – 1,85 кА, фази B – 1,95 кА, фази C – 1,65 кА. Усталені амплітудні значення струмів такі самі, як у першому експерименті.

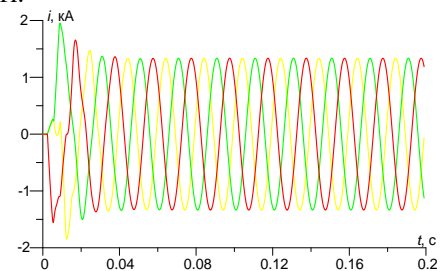


Рис. 9. Часовий розподіл функцій струмів на початку лінії для другого експерименту

Fig. 9. Time distribution of the current functions at the beginning of the line for the second experiment

На рис. 10 представлено часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T1$ на початку лінії для другого експерименту. Бачимо, що керована комутація спричинила значну несиметрію в лінії електропередачі, що призвело до

значних перенапруг у грозозахисних тросах. Перенапряга грозозахисного троса $T1$ на початку лінії сягнула максимального значення 200 кВ, а після виходу в усталений режим набула очікуваного нульового значення.

Аналогічна ситуація зі струмом грозозахисного троса $T1$ на початку лінії (рис. 11). Бачимо, що в другому експерименті ударний струм сягнув максимального значення 350 А, а після закінчення перехідного процесу набув нульового значення.

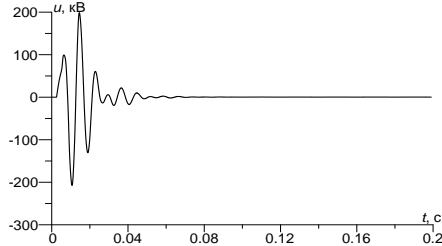


Рис. 10. Часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T1$ на початку лінії для другого експерименту

Fig. 10. Time distribution of the voltage function of the lightning protection cable $T1$ at the beginning of the line for the second experiment

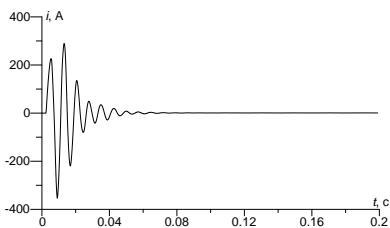


Рис. 11. Часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T1$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для другого експерименту

Fig. 11. Time distribution of the current function of the lightning protection cable $T1$ at the beginning of the line (first discrete branch) for the second experiment

На рис. 12 і 13 представлено часові розподіли функцій напруги за 24 км від початку лінії (другий дискретний вузол) та струму на початку лінії (перша дискретна гілка) для грозозахисного троса $T2$. Оскільки грозозахисний трос $T2$ на початку лінії заземлений, то його напруга є суттєво меншою від напруги грозозахисного троса $T1$ на початку лінії. Максимальне значення напруги грозозахисного троса $T2$ становило 11 кВ. Щодо струму (рис. 13), то тут, навпаки, він має очікувано більше значення, ніж у грозозахисному тросі $T1$. Максимальне значення ударного струму грозозахисного троса $T2$ на початку лінії становило 440 А.

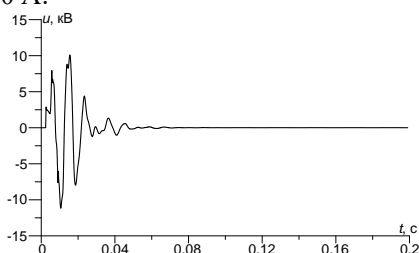


Рис. 12. Часовий розподіл функції напруги грозозахисного троса $T2$ за 24 км від початку лінії (другий дискретний вузол) для другого експерименту

Fig. 12. Time distribution of the voltage function of the lightning protection cable $T2$ 24 km from the beginning of the line (the second discrete node) for the second experiment

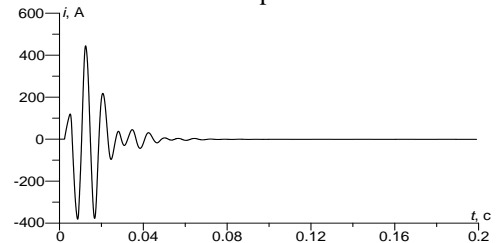


Рис. 13. Часовий розподіл функції струму грозозахисного троса $T2$ на початку лінії (перша дискретна гілка) для другого експерименту

Fig. 13. Time distribution of the current function of the lightning protection cable $T2$ at the beginning of the line (first discrete branch) for the second experiment

Висновки. 1. Аналіз доступної літератури показав, що питання дослідження перехідних процесів під час керованих комутацій ліній електропередач є актуальним, однак впливу керованих комутацій на перехідні процеси в лініях електропередач надвисокої напруги з грозозахисними тросами уваги приділено недостатньо.

2. Результати комп'ютерної симуляції показали, що керована комутація позитивно впливає на перехідні процеси напруг та струмів у фазних проводах лінії. За такого увімкнення перенапруги у фазних проводах лінії практично відсутні і становлять приблизно 685 кВ. Те саме стосується й ударних струмів, вони під час увімкнення лінії становили в середньому 1,8 кА. Однак за такого увімкнення у лінії виникають короточасні несиметричні режими, що призводить до виникнення значних напруг та струмів у грозозахисних тросах. Так, під час увімкнення на грозозахисному тросі $T1$ зафіксовано перенапругу, яка становила 200 кВ, та ударний струм 350 А. Тому при використанні керованих комутацій для грозозахисних тросів потрібно передбачувати додаткові засоби захисту.

3. Отримані результати комп'ютерної симуляції підтверджуються теоретичними положеннями теорії пересилання електричної енергії, що говорить про адекватність розробленої математичної моделі лінії електропередачі із грозозахисними тросами надвисокої напруги з розподіленими параметрами.

Бібліографічний список

1. [Кучанський В. В.](#) Керована комутація елегазовими вимикачами в магістральних електричних мережах. [Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України](#). 2017. Вип. 48. С.

38–42.

2. Левонюк В. Аналіз перехідних процесів у довгій лінії електропередачі з грозозахисними тросами. *Технічні вісти*. 2022. № 55. С. 30 – 33.

3. Чабан А. В. Принцип Гамільтона-Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.

4. Bhatt K., Bhalja B., Parikh U. Controlled switching technique for minimization of switching surge during energization of uncompensated and shunt compensated transmission lines for circuit breakers having pre-insertion resistors. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. Vol. 103. P. 347 – 359.

5. 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.

6. 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. Iss. 3. P. 1126 – 1143.

7. Chaban A., Szafraniec A., Lysiak H., Levoniuk V., Lysiak V. A mathematical model of an ultrahigh voltage transmission line taking into account overhead ground wires. *Przegląd elektrotechniczny*. 2022. № 6. P. 27 – 31.

8. Ciulica D. Research on the transient regime of SF6 circuit breakers in MATLAB. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1426 (2020). 012054.

9. Goldsworthy D., Roseburg T., Tziouvaras D., Pope J. Controlled switching of HVAC circuit breakers: application, examples and benefits. *Annual Conference for Protective Relay Engineers*: materials of the conference (College Station, April 01-03, 2008). College Station, 2008.

10. Kumar A., Perveen R., Parikh U. Controlled switching of power transformer and shunt reactors for minimization of switching transients: a review. *Journal of The Institution of Engineers*. 2021. 103(2). P. 1013 – 1024.

11. Kumar U., Tale S., Panda S., Verma A. Modeling of circuit breaker for controlled switching applications using EMTDC/PSCAD. *National Power Systems Conference: materials of the conference* (Tiruchirappalli, December 14-16, 2018). Tiruchirappalli, 2018.

12. Panda S., Bahirat H., Stanek M. Controlled switching of power circuit breakers. *International Conference on Power System Technology*: materials of the conference (Wollongong, September 28 – October 01, 2016). Wollongong, 2016.

13. Panoiu C., Ciulica D., Panoiu M., Mezinescu S. Research based on modeling and simulation of the transient regime in controlled switching with high power switches. *Machines*. 2021. 9. P. 99.

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.

15. Smolarczyk A., Lapczynski S., Szulborski M., Kolimas L., Kozarek L. The real-time simulator using MATLAB/Simulink software for closed-loop coordination protection devices testing. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2021. Vol. 69(4). Paper No. e137413.

16. Stanek M. Analysis of circuit breaker controlled switching operations – from manual to automatic. *50th International Universities Power Engineering Conference*: materials of the conference (Stoke-on-Trent, September 1-4, 2015). Stoke-on-Trent, 2015. Paper No 353.

17. Uglesic I., Filipovic-Grcic B., Bojic S. Transients caused by uncontrolled and controlled switching of circuit breakers. *The International Symposium on High-Voltage Technique «Höfler's Days»*: materials of the conference (Portoroz, November 7-8, 2013). Portoroz, 2013.

Стаття надійшла 12.07.2023

УДК 621.313(075.8)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ В МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Дмитро Гречин, к. т. н., Іван Дробот

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

Гречин Д., Дробот І. Дослідження відхилень напруги в мережі електропостачання підприємства при експлуатації електрообладнання

У праці визначено проблему рівня напруги у споживачів та допустимі межі зміни напруги. Відхилення рівня напруги від номінального значення має негативний вплив на споживачів електроенергії: електроосвітлення, електродвигуни, електротехнологічні установки та ін. Одна з основних причин зниження напруги у споживачів – це втрати напруги в мережі електропостачання. Аналіз публікацій показав актуальність проведення досліджень електричних мереж для забезпечення кращих техніко-економічних показників. Сучасні дослідження проводяться за допомогою моделювання. Завданням дослідження є побудова структурно-математичної моделі системи електропостачання підприємства в середовищі MATLAB/Simulink та аналіз спадів напруг у мережі. Мета роботи – за допомогою побудованої моделі дослідити спади напруг у мережі. У роботі побудовано структурно-математичну модель мережі електропостачання підприємства. Проведено дослідження роботи лінії 10 кВ на спад напруги у лінії. Проведено дослідження роботи трьох кабельних ліній 0,4 кВ по чергово на спад напруги. У лінії КЛ2 спад напруги перевищував 5 %, у цій лінії збільшили переріз і знов провели дослід – спад напруги був меншим за 5 %. Проведено дослід одночасної роботи трьох фідерів із номінальним навантаженням. Аналіз показав, що, як у попередніх дослідах, втрати напруги були в межах допустимих втрат, а в лінії КЛ2, як і зазначалося раніше, втрати перевищували допустимі, але зміна перерізу кабелю вирішує цю проблему.

Спочатку проведено аналіз щодо лінії КЛ1. Цю лінію ми досліджували при номінальному режимі від 0 до 1,2 S_H . Втрати напруги в цій лінії були в межах допустимих втрат, а саме 274,5 В. Згодом було проведено спостереження спадів напруги і на лінії КЛ2. Аналіз щодо цієї лінії також здійснено при номінальному режимі від 0 до 1,2 S_H . У підсумку відхилення напруги було більше, ніж допустимі норми. Щоб це усунути, було вибрано кабель з більшими перерізом, відхилення напруги було в допустимих межах – від -5 % до +5 %. Досліди лінії КЛ3 показали, що втрати напруги були в допустимих межах втрати, а саме – 5 %. Лінія також працювала при номінальному режимі. У лінії КЛ4 втрати напруги були дуже малі, спостереження лінії також було здійснено при номінальному режимі від 0 до 1,2 S_H . При п'ятому досліді до кабельних ліній КЛ2 – КЛ4 було підключено одночасно все навантаження. Аналіз показав, що в лініях КЛ3 і КЛ4 втрати напруги були в межах допустимих втрат, а в лінії КЛ2, як і зазначалося раніше, втрати перевищували допустимі, але зміна перерізу кабелю вирішує цю проблему.

Ключові слова: електропостачання, спад напруги, напруга, модель.

Hrechyn D., Drobot I. Investigating voltage deviations in the enterprise's power supply network during the electrical equipment operation

The article focuses on the issue of voltage levels at consumers' buildings and the acceptable limits of voltage fluctuations. Any deviation from the nominal voltage can negatively affect the electricity supply for consumers, including lighting, electrical engines, and other electrotechnical equipment. One of the primary reasons for voltage drop is the loss of voltage in the power supply network. Research has shown that analyzing power supply networks is crucial to ensure better technical and economic performance. Nowadays, research is conducted through modeling, and the main goal is to build a structural-mathematical model of the power supply system of the enterprise using MATLAB/Simulink and analyze voltage drops in the network. The purpose of this work is to investigate voltage drops in the network using the constructed model. In this work, the authors built a structural-mathematical model of the power supply network of the enterprise. The researchers conducted a study of the 10kV line's operation on voltage drops in the line and also studied three 0.4kV cable lines alternately for voltage drops. The KL2 line had a voltage drop of more than 5%, so the cross-section was increased and the experiment was conducted again. This time, the voltage drop was less than 5%. The authors of the study also experimented with the simultaneous operation of three feeders with nominal loads. The analysis showed that, as in previous experiments, the voltage loss was within the allowable losses, and in the KL2 line, the losses exceeded the allowable ones, but changing the cable cross-section solved this problem.

First, the authors analyzed the KL1 line, studying it at nominal mode from 0 to 1.2Sn. It was found that the voltage losses in this line were within the limits of permissible losses, specifically 274.5 V. Subsequently, voltage drops on the KL2 line, which were also analyzed at the nominal mode from 0 to 1.2 Sn, were observed. The voltage deviation exceeded the permissible norms, so a cable with a larger section was selected, and the voltage deviation was within the permissible limits from -5% to +5%. The researchers then tested the KL3 line and found that the voltage losses were within the allowable loss

limits, particularly 5%. The line also operated at the nominal mode. In the KL4 line, the voltage losses were minimal, and the line at the nominal mode from 0 to 1.2 Sn was monitored. In the fifth experiment, the entire load was connected to the KL2 - KL4 cable lines at the same time. The analysis showed that the voltage losses in the KL3 and KL4 lines were within the permissible limits, and in the KL2 line, as mentioned earlier, the losses exceeded the permissible ones, but changing the cable cross-section solved this problem.

Key words: power supply, voltage drop, voltage, model.

Постановка проблеми. Якість електричної енергії – це ступінь відповідності фактичних значень параметрів електричної енергії встановленим ГОСТ 13109 – 97 значенням. У наших дослідженнях йдеться про відхилення напруги, відповідно до ГОСТ 13109 – 97 нормальне значення щодо відхилення напруги це +5 або -5 %, граничне значення – це вже коли +10 або -10 %. Коливання напруги в мережі залежить від потужності джерел живлення, потужності, яка втрачається під час передавання по лініях електропередачі та потужності електроспоживачів. До найбільш розповсюджених споживачів варто віднести асинхронні двигуни, в яких потужність прямо пропорційна квадрату напруги, а отже, втрати удвічі більші. Отже, при малій втраті напруги у двигунах втрати потужності будуть серйозніші. При незначній втраті напруги також зменшується швидкість обертання двигуна, а в підсумку збільшується ковзання. Також підвищується струм, падає коефіцієнт корисної дії і швидше зношується ізоляція. При втраті напруги погіршуються пусковий момент і механічні характеристики двигунів.

В електротехнологічних пристроях втрати напруги призводять до зниження потужності, яка надходить із мережі, збільшуються затрати часу технологічних і виробничих процесів, а відповідно й якість продукції стає гіршою. При втратах напруги погіршується також і освітленість, оскільки світловий потік залежить від значення напруги. У разі збільшення напруги коефіцієнт корисної дії ламп збільшується, а термін їх служби, навпаки, стає меншим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження процесів, які відбуваються в електричних мережах, не втрачають своєї актуальності [1–19]. Сучасні методи дослідження передбачають використання математичного апарату та сучасного програмного забезпечення [1–19].

Регулювання напруги передбачається в мережах живлення і розподільчих мережах та проводиться незалежно. Однак основне завдання в регулюванні напруги зовсім інше, а саме: у мережах живлення необхідно знизити втрати електроенергії, а в розподільчих мережах потрібно підтримати нормовані значення щодо відхилення напруги на затискачах електричних приймачів. Розрізняють централізоване і місцеве регулювання напруги. У першому випадку регулювання напруги здійснюється в центрах живлення і змі-

нює напругу у всій мережі, а в другому випадку регулювання здійснюється безпосередньо споживачем і значення напруги змінюється лише в локальній частині мережі.

За допомогою спеціальних пристроїв, а також різних заходів можливо регулювати значення напруги в мережі. Основні способи регулювання напруги – це регулювання коефіцієнта трансформації; зміна параметрів мережі; зміна струму збудження; зміна реактивної потужності.

Постановка завдання. Завданням дослідження є побудова структурно-математичної моделі системи електропостачання підприємства в середовищі MATLAB/Simulink та аналіз спадів напруг у мережі. Мета роботи – за допомогою побудованої моделі дослідити спади напруг у мережі.

Виклад основного матеріалу. Як джерело живлення для забезпечення електроенергією підприємства використовується районна підстанція, яка розташована на відстані 15 км від підприємства. Більшість електрообладнання на підприємстві живиться від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В і частотою 50 Гц. Схема електропостачання зображена на рис. 1.

Параметри кабельних ліній наведено у табл. 1.

На рис. 2 зображена модель мережі електропостачання підприємства, на основі якої й будуть проводитися досліди. Для кожної лінії електропостачання, врахувавши вибрані кабелі, вказуємо в блоках середовища MATLAB/Simulink відповідні параметри.

Аналіз результатів вимірювань показав, що при збільшенні споживаної потужності на підприємстві відповідно збільшуються і втрати напруги. Взнявши до уваги всі лінії електропередачі, були проведені експерименти з дослідження втрат напруги в лініях. Аналіз виконаних спостережень вказано в табл. 2. Для дослідження відхилення напруги і її впливу на обладнання системи електропостачання було використано дані про системи зовнішнього та внутрішнього живлення підприємства, сумарну потужність навантаження, склад, а також структуру приймачів та сумарні навантаження приймачів, де U_1 – напруга на початку лінії, В; U_2 – напруга в кінці лінії, В; ΔU_1 – спад напруги в лінії, В.

При дослідженні лінії КЛ2 0,4 кВ виявили, що втрати напруги не були в межах від -5 % до +5 %. Тому ми вибрали кабель із більшим перерізом.

Внаслідок цього втрати напруги були зменшені і перебували в допустимих межах.

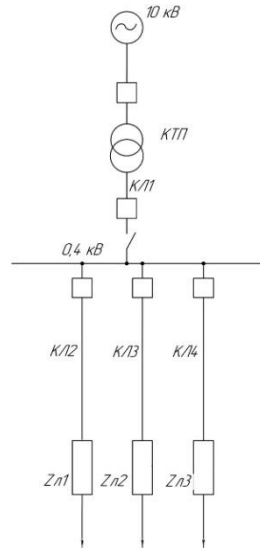


Рис. 1. Схема електропостачання підприємства
Fig. 1. Power supply scheme of the enterprise

Таблиця 1. Параметри кабельних ліній
Table 1. Parameters of cable lines

Лінія	P, кВт	S _{ном} , кВА	S _{ном1-2} , мм ²	L, км	Паспортні дані		Згідно довжини лінії	
					r _c , Ом/км	x _c , Ом/км	r _c , Ом/км	x _c , Ом/км
K/11	203,6	235,9	89,8	15	0,258	0,081	3,87	1,21
K/12	101,8	179,9	54,05	0,25	0,268	0,098	0,067	0,024
K/13	78,4	102,2	70,6	0,45	0,268	0,098	0,120	0,044
K/14	23,4	77,7	34,2	0,35	0,868	0,109	0,303	0,028

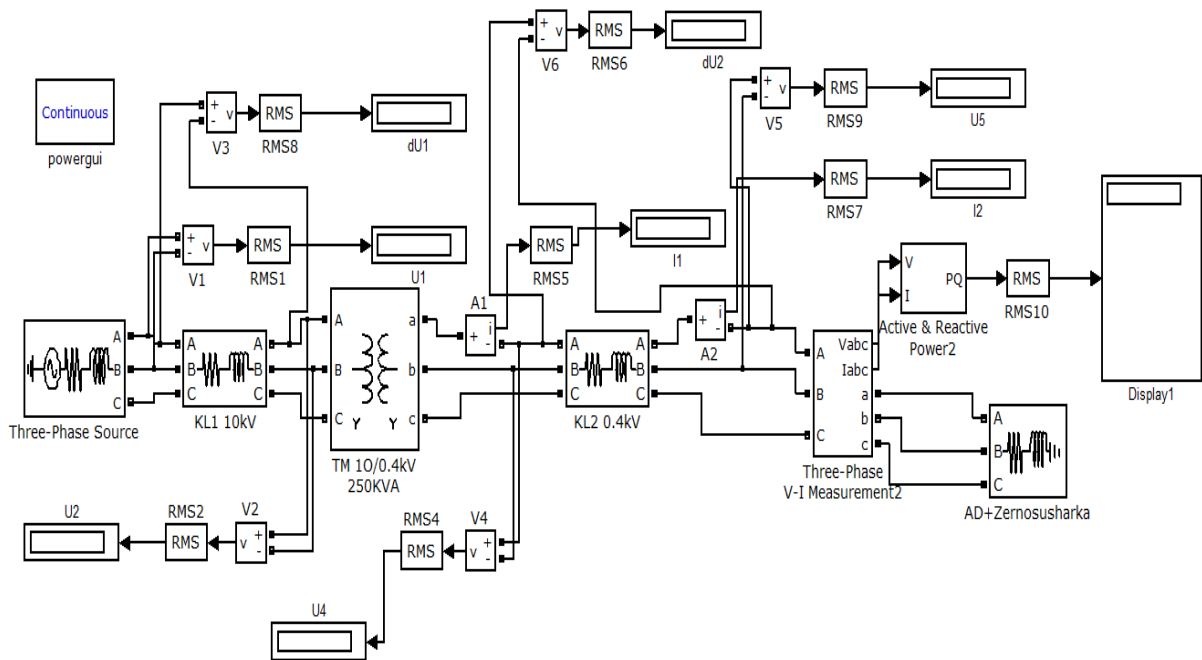


Рис. 2. Модель дослідження Line 1(10 кВ) і Line 2 (0,4 кВ)
Fig. 2. Study model of Line 1 (10 kV) and Line 2 (0.4 kV)

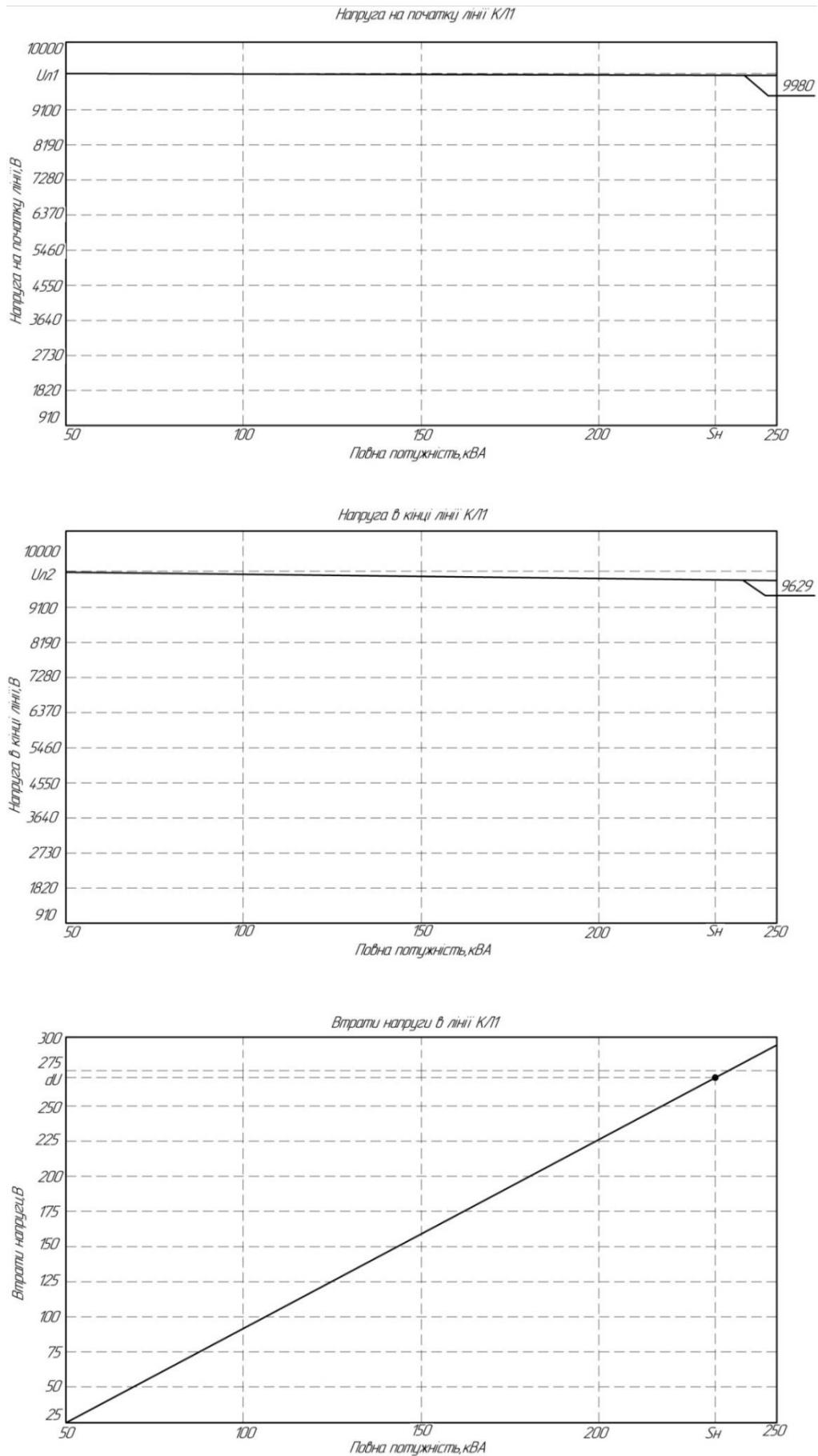


Рис. 3. Напруга в лінії КЛ1 (10 кВ)
Fig. 3. Voltage in the KL1 (10 kV) line

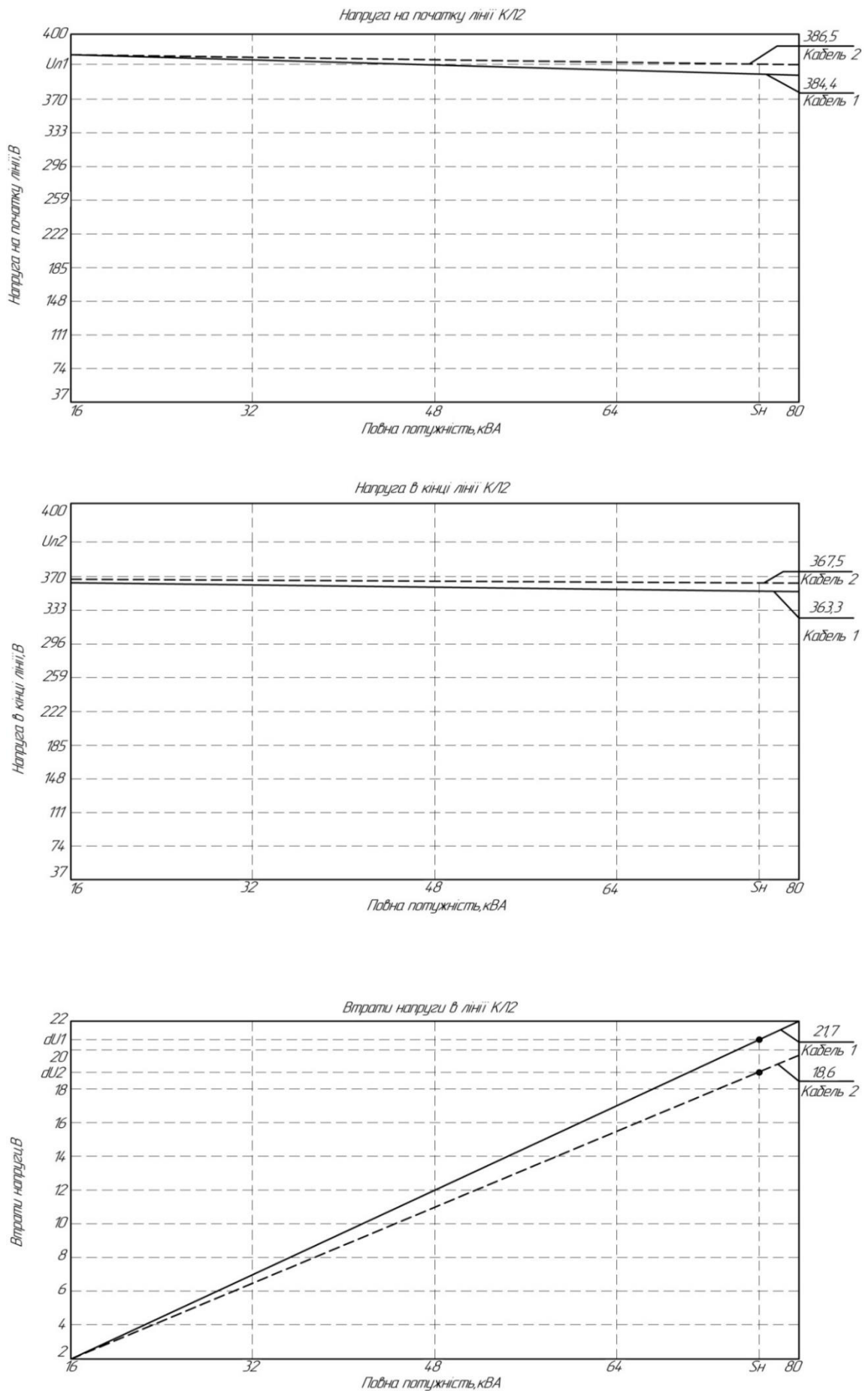


Рис. 4. Напряга в другій лінії КЛ2 (0,4 кВ)
Fig. 4. Voltage in the second KL2 (0.4 kV) line

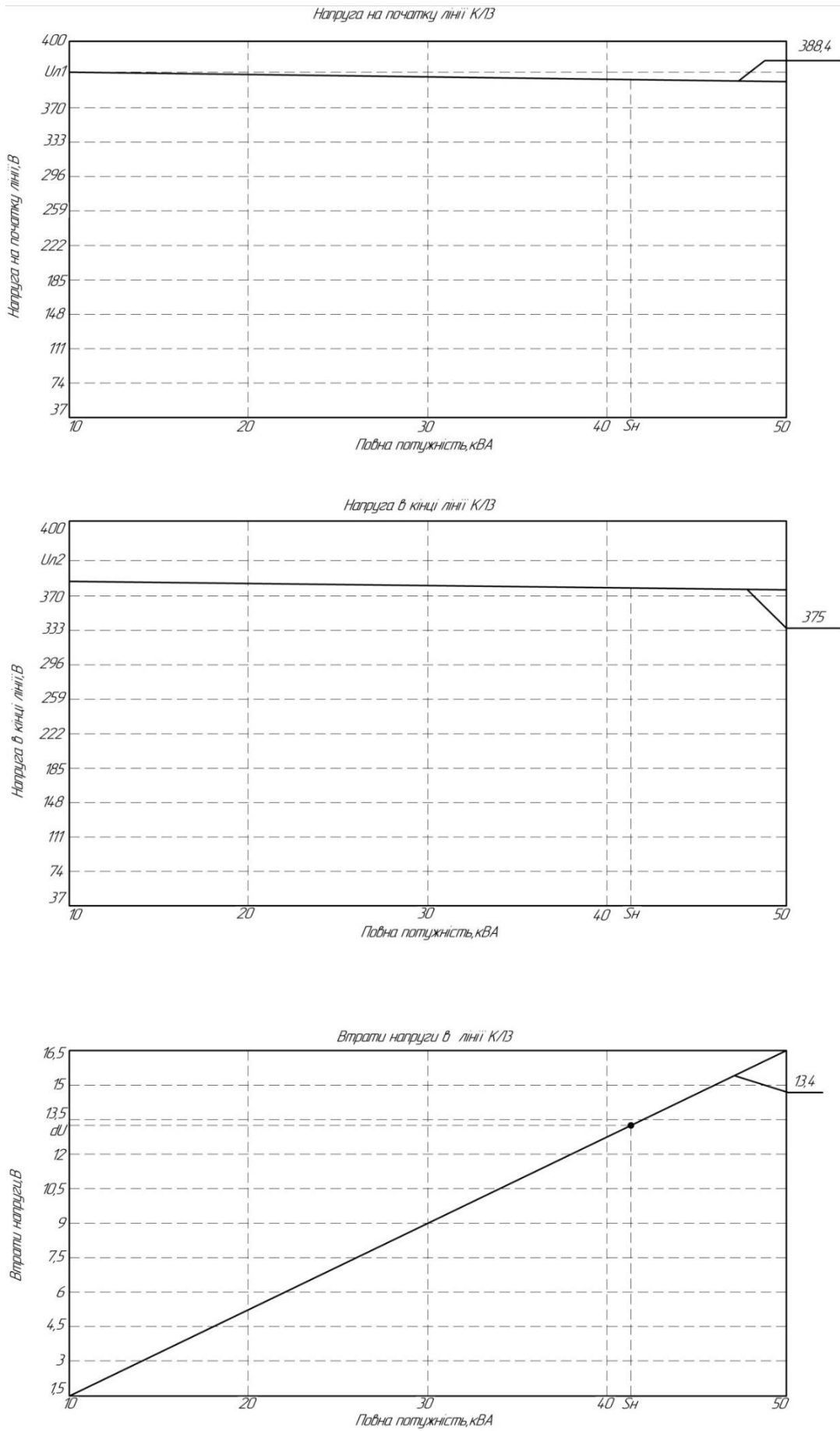


Рис. 5. Напряга в лінії КЛЗ (0,4 кВ)
Fig. 5. Voltage in the KL3 (0.4 kV) line

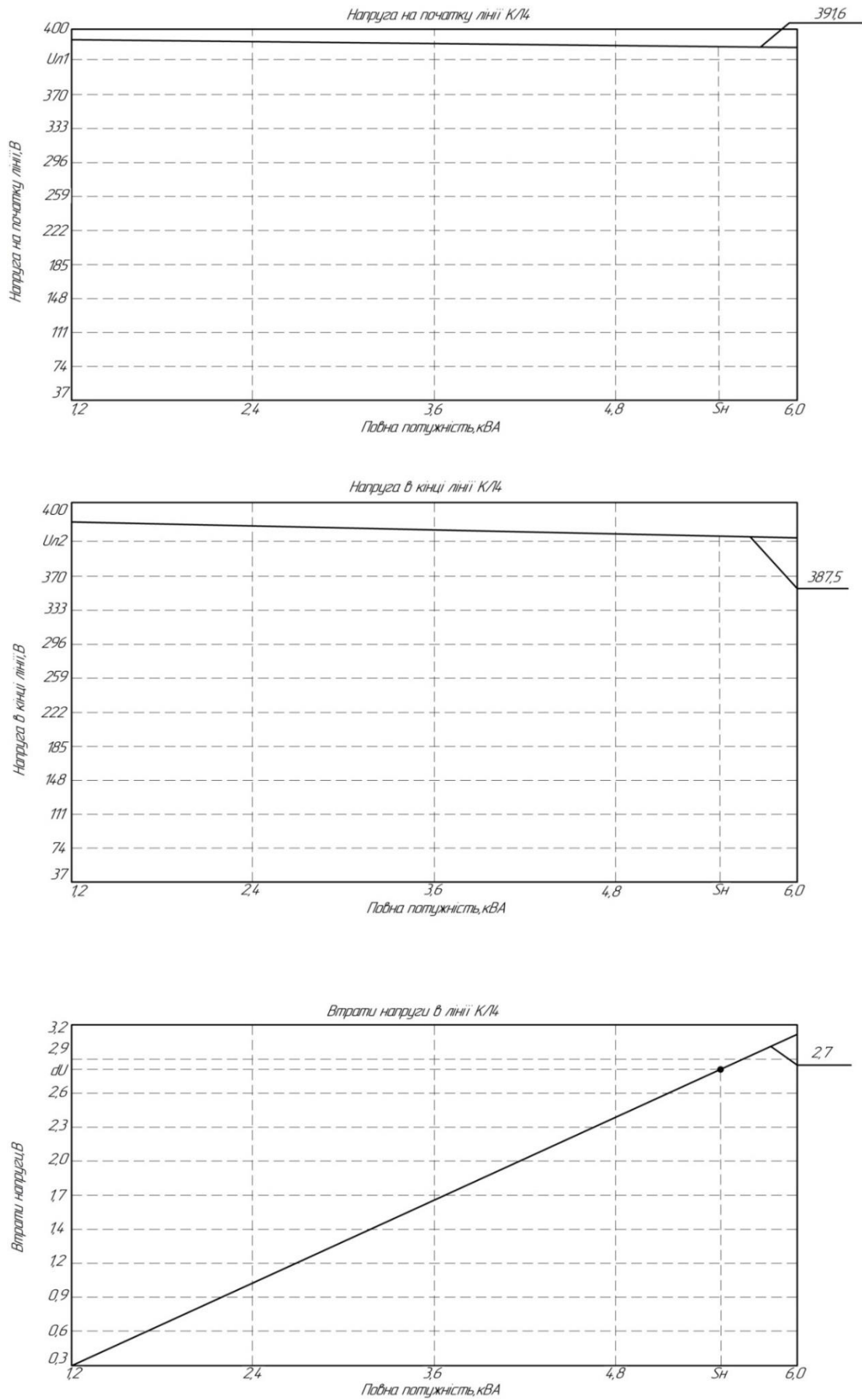


Рис. 6. Напряга в лінії КЛ4 (0,4 кВ)
Fig. 6. Voltage in the KL4 (0.4 kV) line

Внаслідок досліджень було показано певні спади напруги на лініях електропостачання. Для того щоб електроприймачі на підприємстві працювали нормально, потрібно, щоб спад напруги був у межах допустимих норм. Спади напруг, які були визначені внаслідок аналізу ліній 0,4 кВ, будуть небезпечні для робочого освітлення, оскільки освітлення на підприємстві виконане люмінесцентними лампами, при втраті напруги більше ніж на 5 % термін придатності ламп ско-

рочується на 5–10 %. Також зміна напруги в межах, більших від -5 % до +5 %, погано впливає на асинхронні двигуни, оскільки зменшується продуктивність технологічного обладнання. При зниженні напруги на 1 % споживання реактивної потужності збільшується на 5 %. Знижується момент опору робочих механізмів з вентиляторною характеристикою, оскільки зменшується швидкість обертання. Графіки залежностей проведених дослідів вказані на рис. 3-6.

Таблиця 2. Результати проведених спостережень

Table 2. Results of the observations

Лінія	U_1	U_2	ΔU_1
К/11	9980	9629	274,5
К/12 кабель 1	384,4	363,3	21,7
К/12 кабель 2	386,5	367,5	18,6
К/13	388,4	375	13,4
К/14	391,6	387,5	2,7

Модель дослідження при одночасних максимальних навантаженнях на лініях вказана на рис. 7.

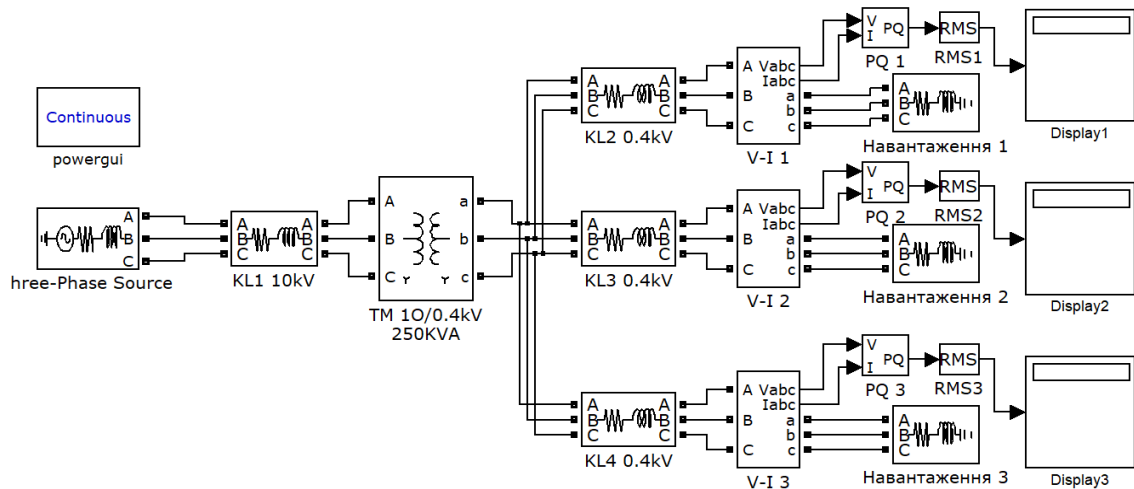


Рис. 7. Модель дослідження спадів напруг при одночасному максимальному навантаженні на лінії
Fig. 7. Model of the study of voltage drops at the simultaneous maximum load on the line

Сумарні втрати напруги в кожній лінії 0,4 кВ визначаються при параметрі максимального навантаження відповідно в кожній із цих трьох ліній. Дані цих дослідів зображено в табл. 3.

Таблиця 3. Сумарні втрати напруги в лініях КЛ2 – КЛ4 (0,4 кВ)

Table 3. Total voltage losses in the KL2 - KL4 (0.4 kV) lines

Лінія	U_1, B	U_2, B	$\Delta U, B$	$\Delta U, \%$
К/11	9968	9629	339	3,4
К/12 кабель 1	378,9	354,4	24,2	8,3
К/12 кабель 2	378,9	359,2	19,7	4,8
К/13	378,9	360,7	18,2	4,5
К/14	378,9	363,6	15,3	3,8

Висновки. Спочатку проведено аналіз щодо лінії КЛ1. Цю лінію ми досліджували за номінального режиму від 0 до $1,2 S_H$. Втрати напруги в цій лінії були в межах допустимих втрат, а саме 274,5 В. Згодом було проведено спостереження спадів напруги і на лінії КЛ2. Аналіз щодо цієї лінії також здійснено при номі-

нальному режимі від 0 до $1,2 S_H$. У підсумку відхилення напруги було більше, ніж допустимі норми. Щоб це усунути, було вибрано кабель з більшими перерізом, відхилення напруги було в допустимих межах від -5 % до +5 %. Досліди лінії КЛ3 показали, що втрати напруги були в допустимих межах втрат, а саме 5 %.

Лінія також працювала при номінальному режимі. У лінії КЛ4 втрати напруги були дуже малі, спостереження лінії також було здійснено при номінальному режимі від 0 до $1,2 S_H$. При п'ятому досліді до кабельних ліній КЛ2 – КЛ4 було підключено одночасно все навантаження. Аналіз показав, що в лініях КЛ3 і КЛ4 втрати напруги були в межах допустимих втрат, а в лінії КЛ2, як і зазначалося раніше, втрати перевищували допустимі, але зміна перерізу кабелю вирішує цю проблему.

Бібліографічний список

1. Анализ электромагнитных процессов и эквивалентных параметров сегментированных токопроводящих жил силовых кабелей на напряжение 330 кВ / А. К. Шидловский, А. А. Щерба, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая, В. М. Золотарев. *Техн. электродинамика*. 2008. № 6. С. 7–13.
2. Воротницкий В. Э., Загорский Я. Т., Апрыткин В. Н. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. *Электрические станции*. 2000. 154 с.
3. Галанов В. П., Галанов В. В. Влияние качества электроэнергии на уровень ее потерь в сетях. *Электрические станции*. 2001. 63 с.
4. Гоголюк О. П. Дослідження електропередачі в сучасних комп'ютерних середовищах. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2010. № 671. С. 24-31.
5. Евдокунин Г. А. Электрические системы и сети. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербург. гос. политех. ун-та, 2011. 286 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. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины / В. В. Лях, В. М. Молчанов, И. В. Судакова, И. В. Павличенко. *Электрические сети и системы*. 2009. № 3. С. 16–21.
8. Левонюк В. Порівняльний аналіз математичних моделей перехідних електромагнітних процесів в елементах електроенергетичних систем. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 155-161.
9. Математическая модель электрической напряженности изолированных жил силовых кабелей / В. В. Золотарев, В. П. Карпушенко, А. А. Науменко, С. В. Бузько. *Физические и компьютерные технологии*: тр. 12 МНТК. Харьков: ХНПК «ФЭД», 2006. С. 239–240.
10. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу / А. В. Чабан, В. Р. Левонюк, І. М. Дробот, А. Ф. Герман. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 30–35.
11. Нестеров Р. Е., Канев Ф. Ю., Макенова Н. А. Математическое моделирование линий электропередач и систем заземления. *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1.1. С. 15-21.
12. Основи електропостачання агропромислового комплексу: навч. посіб. / Б. В. Дурняк, В. О. Чумакевич, І. М. Лях, А. М. Яцун. Львів: Укр. акад. друкарства, 2017. 544 с.
13. Рагозин А. А. Моделирование электроэнергетических систем при решении задач несимметричных режимов. Повышение эффективности работы энергосистем. Москва: Энергоатомиздат, 2001. С. 51.
14. Соколова Е. М. Электрическое и электро-механическое оборудование. Москва: Мастерство, 2001. 224 с.
15. 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*. 2017. № 21. С. 167-177.
16. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.
17. Шестеренко В. Є. Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник. Вінниця: Нова кн., 2004. 656 с.
18. Щерба А. А., Лобозинский В. Ю. Математическое моделирование электромагнитных процессов в трехфазной кабельной линии электропередачи при разных транспозициях экранов однофазных кабелей. *Технічна електродинаміка*. Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. 2011. Ч. 2. С. 271–276.
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 05.09.2023

НАДІЙНІСТЬ І ТЕХНІЧНИЙ СЕРВІС МАШИН

УДК 514.18

ПРУЖНЕ ЗГИНАННЯ СМУГИ ПІД ДІЄЮ ПРИКЛАДЕНИХ СИЛ

Сергій Пилипака¹, д. т. н., Тетяна Воліна², к. т. н.,
Тетяна Кресан³, к. т. н., Ірина Захарова⁴, к. пед. н., Віктор Семерак⁵, к. т. н.

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна,
e-mail: psf55@ukr.net

²Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна,
Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна,
e-mail: t.n.zaharova@ukr.net

³ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»,
вул. Шевченка, 10, м. Ніжин, Чернігівська обл., Україна,
e-mail: tanyakresan@i.ua

⁴Сумський державний педагогічний університет ім. А.С.Макаренка,
вул. Роменська, 87, м. Суми, Україна,
e-mail: zaharova_soippo@ukr.net

⁵Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н,
Львівська обл., Україна,
e-mail: semerakvictor@gmail.com

Пилипака С., Воліна Т., Кресан Т., Захарова І., Семерак В. Пружне згинання смуги під дією прикладених сил

Пружне згинання стрижня передбачає відновлення його пружної осі до початкового стану після припинення дії деформуючих зусиль. Зазвичай пружну вісь у початковому положенні приймають прямолінійною. Це зумовлено широким застосуванням у будівельній галузі прямолінійних конструкцій, які виконують роль різного роду перемичок та перекриттів. Значний прогин таких конструкцій може призвести до їх руйнування, тому актуальною задачею є знаходження допустимих меж прогину зазначених будівельних елементів. Допустимий прогин таких прямолінійних елементів є надзвичайно малим, тобто несумірним із довжиною елемента, тому для обчислення його величини використовують спрощені теоретичні формули, які задовольняють практику. Спрощення зводиться до того, що диференціальні рівняння другого порядку пружної осі замінюють диференціальними рівняннями першого порядку, що дає достатньо прийнятні результати прогину прямолінійного елемента при незначних його деформаціях. В інженерній практиці мають місце прямолінійні стрижні, які зазнають значних деформацій. Для розрахунку їх прогинів не можна застосовувати спрощені формули. Крім того, значного поширення набули криволінійні пружні елементи, які уже мають початкову криволінійну форму пружної осі. Це стояки культиваторних лап, які згладжують пульсуючі динамічні навантаження, ресори, поршневі кільця тощо. Саме розрахунку форми пружної осі поршневого кільця в статті буде приділено найбільше уваги.

Знаходження форми пружної осі консольно защемленого стрижня ґрунтується на положенні теорії опору матеріалів, згідно з якою кривина пружної осі прямо пропорційна прикладеному моменту і обернено пропорційна його жорсткості. При цьому розглянуто два види навантаження: зосереджена сила на вільному кінці або рівномірно розподілена сила вздовж стрижня. Розглянуто дію цих сил як на прямолінійний стрижень, так і на стрижень із заданою сталою кривиною, тобто на стрижень, окреслений по дузі кола. Для всіх випадків наведено приклади і побудовано їх пружні осі після деформації.

Ключові слова: пружна вісь, довжина дуги, розподілена сила, кривина, момент, диференціальні рівняння.

Pylypaka S., Volina T., Kresan T., Zakharova I., Semerak V. Elastic bending of a strip under the action of applied forces

Elastic bending of a rod involves restoring its elastic axis to its initial rectilinear state after the deformation forces have stopped. Rectilinear structures are widely used in construction for various types of bridges and overlaps. These structures must not deflect significantly, as it can lead to their destruction. Therefore, finding the permissible limits of deflection of these building elements is an urgent task. The permissible deflection of such rectilinear elements is extremely small, i.e. disproportionate to the length of the element, therefore simplified theoretical formulas, which satisfy the practice, are used to

calculate its value. The simplification means that the second-order differential equations of the elastic axis are replaced by the first-order differential equations, which gives sufficiently acceptable results of the deflection of the rectilinear element with minor deformations. In the engineering practice, there are rectilinear rods that undergo significant deformations. The simplified formulas cannot be used to calculate their deflections. In addition, curvilinear elastic elements, which already have the initial curvilinear shape of the elastic axis, have become widespread. These are risers of cultivator paws that smooth out pulsating dynamic loads, springs, piston rings, etc. It is the calculation of the shape of the elastic axis of the piston ring that is most considered in the article.

Finding the shape of the elastic axis of a cantilever clamped rod is based on the position of the theory of resistance of materials, according to which the curvature of the elastic axis is directly proportional to the applied moment and inversely proportional to its stiffness. At the same time, two types of load are considered, namely a concentrated force at the free end or a uniformly distributed force along the rod. The effect of these forces on both a rectilinear rod and a rod with a given constant curvature, that is, a rod outlined along the arc of a circle, is considered. Examples are given for all cases and their elastic axes after deformation.

Key words: elastic axis, arc length, distributed force, curvature, moment, differential equations.

Постановка проблеми. Незважаючи на уявну простоту, технологія виготовлення поршневих кілець є однією з найскладніших задач машинобудування. Кільце повинне бездоганно прилягати до стінки циліндра і тиснути на неї з однаковим зусиллям. Дослідження показали, що для збільшення терміну служби епюра тиску повинна бути не сталою, а мати грушоподібну форму з найбільшим тиском біля зазору кільця. Якщо таке кільце вийняти з циліндра, то у вільному стані його пружна вісь не буде колом, а матиме певну овальну форму. Таким чином, виникає задача знаходження пружної осі кільця у вільному стані. При виготовленні кілець застосовують різні технології. Одна з них – нарізання кільця із циліндричної заготовки, розрізання, розгинання з одіванням на спеціальну оправку, яка має форму кільця у вільному стані, і термофіксацією їх у печі при високій температурі. Термофіксація повинна зняти внутрішні напруження. Більш широко розповсюджений спосіб виготовлення кілець із заготовок некруглої форми на копіювальних верстатах. У цьому контексті теоретичне визначення форми пружної осі кільця за заданою епурою тиску в робочому стані має важливе значення, що зумовлює актуальність досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Модель пружного стрижня відіграє значну роль у математичному аналізі типових нестабільностей структур, що представляють собою довгі, тонкі та пружні елементи. Вони володіють деякими властивими для них принципами перетворення форми, що неявно втілені у їхній структурі. Так, типові процеси, що мають місце під час вигину стрижня при поздовжньому стисканні, викладено в [3]. У [10] розглядається горизонтальна криволінійна пружна стрічка, що змінює свою форму під дією зміни відстані між точками затискування та сили тяжіння. Авторами роботи [11] викладено аналітичну стратегію виявлення принципів конформації, властивих моделі пружного стрижня некруглого поперечного перерізу. Математичне формулювання та чисельна реалізація нової моделі для початково прямих

трансверсально ізотропних стрижнів наведені у [6]. Із праць останніх років, які найбільш близькі до змісту пропонованої статті, слід віднести [1; 8]. У праці [1] розглянуто згинання консольно закріпленої смуги під дією зо середженої сили, яка складає певний кут між вектором сили і дотичною до пружної осі смуги. У праці [8] розглянуто згинання консольно закріпленої смуги під дією зосередженої сили і прикладеного моменту, а також під дією зосередженої сили і розподіленої, якою є питома вага смуги.

Теоретичне дослідження зносу поршневих кілець у двотактних двигунах наведено у [9]. У [4] виявлено вплив геометрії профілю кілець на трибологічні характеристики двигунів. Вплив геометрії канавок поршневих кілець на їх деформацію та ефективність ущільнення досліджено у [2].

Отримані теоретичні результати можуть охопити досить широкий спектр сфер впровадження. Наприклад, у [5] результати дослідження деформації криволінійних стрижнів застосовано до прогнозування зміни кривини ребра людини під дією навантажень, а у [7] – до питань хірургії при фіксації поперекового відділу.

Постановка завдання. Наше завдання – розв'язати обернену задачу знаходження пружної осі криволінійної смуги у вільному стані, яка під дією розподіленої сили набирає заданої форми.

Виклад основного матеріалу. Вважатимемо, що смуга є абсолютно пружна, тобто вона повністю відновлює свою форму після припинення дії деформувального навантаження. Спочатку розглянемо простий приклад деформації консольно закріпленої прямолінійної смуги під дією зосередженої сили P , прикладеної в кінці смуги. У ролі смуги може виступати металева лінійка з прямокутним поперечним перерізом. Силою ваги смуги нехтуємо (вісь Oy спрямована вертикально вгору), оскільки вона набагато менша за силу P і її вплив на деформацію смуги буде незначний.

Згідно з теорією опору матеріалів кривина k осі смуги при її згинанні прямо пропорційна

прикладеному моменту M і обернено пропорційна жорсткості смуги EI . Жорсткість є добутком модуля Юнга E , що характеризує властивість матеріалу, на момент інерції I поперечного перерізу стрижня, який характеризує його здатність чинити опір згинанню. Ця залежність описується такою формулою:

$$k(s) = \frac{M(s)}{EI}, \quad (1)$$

де s є довжина пружної осі стрижня від його кінця до поточної точки.

З диференціальної геометрії відомо, що $k = \frac{d\alpha}{ds}$, де α – величина кута повороту дотичної до пружної осі при її переміщенні на відстань s . При смугі сталого перерізу її жорсткість теж є сталою. Виходячи з цього можна записати:

$$\alpha = \frac{1}{EI} \int M(s) ds. \quad (2)$$

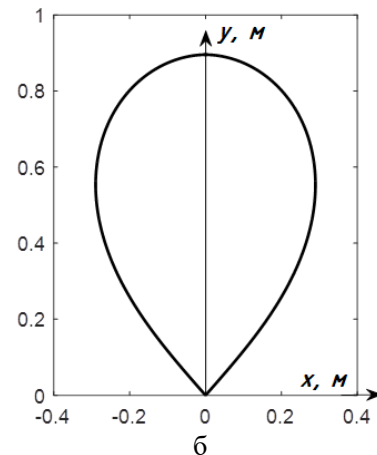
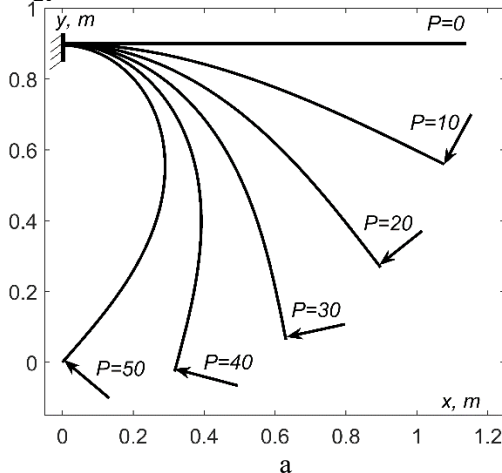


Рис. 1. Форма пружної осі металевої смуги, зігнутої внаслідок дії зосередженої сили P : а) послідовна зміна форми пружної смуги осі при збільшенні сили P ; б) форма пружної осі смуги, зігнутої під дією двох рівних сил до суміщення її кінців

Fig. 1. The shape of the elastic axis of a metal strip, bent due to the action of the concentrated force P : а) successive change in the shape of the elastic strip of the axis under the increase of the force P ; б) the shape of the elastic axis of the strip bent under the action of two equal forces until its ends are aligned

Подальше інтегрування виразів (3) після підстановки в них (4) потребує застосування числових методів. На рис. 1, а показано поступове згинання прямолінійної смуги довжиною $1,14$ м ($s=0\dots 1,14$). Момент інерції смуги прямокутного перерізу $a=0,3$ м, $b=0,03$ м знаходили за відомою формулою $I=ab^3/12$ м⁴, модуль Юнга брали в паскалях: $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па. Отримали жорсткість $EI=14,175$ Н·м². Силу P поступово збільшували від $P=0$ до $P=50$ Н. Точку защемлення смуги можна компенсувати її симетричним згинанням. У такому разі ми отримуємо пружну вісь, зображену на рис. 1, б. Довжина пружної осі $1,14$ м була спеціально підібрана так, щоб вона після симетричного відображення відносно осі ординат набула замкнутого вигляду (рис. 1, б). Таку криву можна отримати з допомогою металевої лінійки, зігнувши її так, щоб кінці збігалися. Слід зазначити, що числове значення жорсткості не впливає на форму пружної осі. Для лінійок з різною

Існує перехід від залежності $\alpha=\alpha(s)$ до параметричних рівнянь кривої, тобто до рівнянь пружної осі:

$$x = \int \cos \alpha(s) ds; \quad y = \int \sin \alpha(s) ds. \quad (3)$$

На рис. 1, а показано послідовність згину прямолінійної смуги під дією прикладеної сили P . При $P=0$ пружна вісь смуги є прямолінійною. Прикладена сила P спричинює момент $M=Ps$, де поточне значення s довжини смуги відраховується від кінця смуги в напрямку її защемлення. У цьому разі вважаємо силу P слідкуючою, тобто такою, яка в процесі деформації смуги залишається перпендикулярною до її пружної осі. Згідно (2) знаходимо кут α :

$$\alpha = \frac{1}{EI} \int Ps ds = \frac{Ps^2}{2EI}. \quad (4)$$

жорсткістю потрібно прикласти різні зусилля для суміщення її кінців, але форма пружної осі буде однакою. У зв'язку з цим в подальшому ми прийнемо жорсткість $EI=1$ для спрощення математичних виразів.

Розглянемо згинання смуги під дією розподіленої сили q (рис. 2, а). Будемо вважати, що ця сила слідкуюча, тобто при згинанні пружної осі вона весь час залишається перпендикулярною до неї. Така сила діє на поршневе кільце зі сторони стінки циліндра, якщо воно має відповідну форму, яку нам потрібно буде знайти. Поперечну силу Q знайдемо інтегруванням розподіленої сили вздовж осі смуги.

$$Q = \int q ds = qs. \quad (5)$$

Момент M знайдемо інтегруванням поперечної сили:

$$M = \int q s ds = \frac{q}{2} s^2. \quad (6)$$

Згідно з формулою (2) за умови, що $EI=1$, отримаємо:

$$\alpha = \int_0^s \frac{q}{2} s^2 ds = \frac{q}{6} s^3. \quad (7)$$

Підстановкою виразу (7) у рівняння (3) з наступним їх числовим інтегруванням отримуємо форму пружної осі, яка зображена на рис. 2, а. Довжина осі змінювалася в межах $s=0 \dots 0,157$ м що відповідає довжині півкола поршневого кільця радіуса пружної осі $r=0,05$ м ($k_0=20$) у робочому стані. Наступні розрахунки були спрямовані на згинання криволінійних смуг із заданою початковою кривиною. Ця задача стосується виготовлення поршневих кілець, у яких кривина k_0 у робочому стані відома. Вона дорівнює кривині кола, яке відповідає діаметру гільзи циліндра двигуна внутрішнього згорання.

У вільному стані кривина пружної осі поршневого кільця буде меншою від k_0 . Вона збільшується від примусового згинання кільця при його попаданні у циліндр. Сила тиску стінки гільзи циліндра на кільце вздовж його осі має бути сталою, що відповідає розподіленому навантаженню q . Отже, кривина пружної осі кільця k_0 у робочому стані буде визначатися сумою кривини k у вільному стані і кривиною, отриманою від дії

розподіленої сили q . Оскільки кривина k прямо пропорційна прикладеному моменту M , то із врахуванням (6) при коефіцієнті пропорційності, рівному одиниці, можемо записати:

$$k = \frac{d\alpha}{ds} = k_0 - \frac{q}{2} s^2. \quad (8)$$

Із рівності (8) знаходимо вираз для кута α :

$$\alpha = \int \left(k_0 - \frac{q}{2} s^2 \right) ds = k_0 s - \frac{q}{6} s^3. \quad (9)$$

Підстановкою (9) у (3) і наступним числовим інтегруванням було отримано пружну вісь смуги під дією розподіленої сили q . На рис. 2, б показано кривину пружної осі k_0 після дії розподіленої сили і k_1, k_2 – у вільному стані. Кривини k_1 і k_2 відповідають зростанню розподіленої сили у два рази. Числові значення розподіленої сили q не наводимо, оскільки вона орієнтована на жорсткість смуги $EI=1$. Тут важливо отримати форму пружної осі, яка залежить від співвідношення жорсткості EI і розподіленої сили q . При $k_0=0$ (рис. 2, б) ми отримуємо криволінійну пружну вісь (k_1 і k_2), яка після дії розподіленої сили q набуває прямолінійної форми.

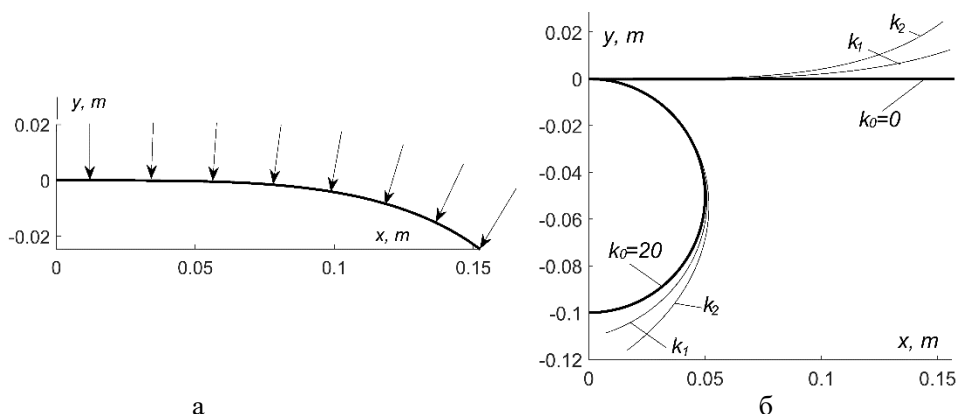


Рис. 2. До визначення пружної осі консольно закріпленої смуги під дією розподіленої слідкуючої сили: а) вихідна смуга у вільному стані прямолінійна; б) вихідна смуга у вільному стані має криволінійну форму
Fig. 2. The elastic axis of a cantilever-fixed strip under the action of a distributed tracking force: a) the original strip in a free state is rectilinear; b) the output strip in the free state has a curvilinear shape

Як уже зазначалося, рекомендується розподілену силу q для поршневого кільця робити не сталою, а змінною, причому вона повинна зростати в області зазору кільця. На більшій частині довжини пружної осі s кільця вона має бути сталою. Епюра розподіленої сили q має грушоподібну форму (рис. 3, а). Для її розподілу вздовж пружної осі кільця можна використати функцію на основі натурального логарифма $q=b \cdot \exp(-as^2)$. Для того щоб розподілена сила q після сталої величини зростала при наближенні до кінця півкола радіуса $r=1/k_0$, вказана функція буде мати такий вигляд:

$$q = b \exp[-a(\pi r - s)^2] + q_0, \quad (10)$$

де s – змінна величина – довжина пружної осі ($s=0 \dots \pi r$);

q_0 – сталі значення величини розподіленої сили;

a, b – коефіцієнти, що впливають на форму графіка.

На рис. 3, б за рівнянням (10) побудовано графік розподіленої сили, яка відповідає епюрі, зображеній на рис 3, а.

Підбором коефіцієнтів a і b в залежності (10) можна змінювати форму кривої (рис. 3, б). Зокрема, при $b=0$ розподілена сила буде сталою.

Збільшенням величини коефіцієнта b досягається зростання пікового значення розподіленої сили q , а коефіцієнтом a регулюється межа між сталою і змінною розподіленими силами q в межах пружної осі половини кільця.

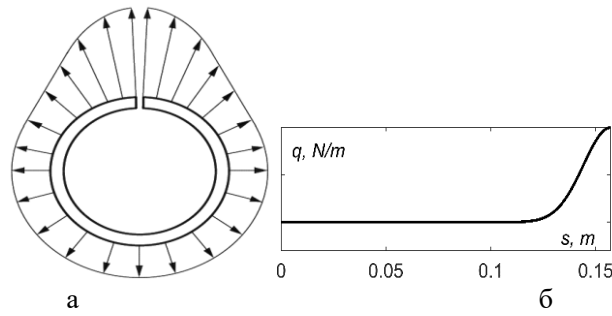


Рис. 3. Графічні ілюстрації до форми розподіленої сили q вздовж пружної осі поршневого кільця: а) епюра розподіленої сили q ; б) графік розподіленої сили q вздовж пружної осі половини кільця
Fig. 3. Graphic illustrations of the shape of the distributed force q along the elastic axis of a piston ring: a) plot of the distributed force q ; b) graph of the distributed force q along the elastic axis of a ring half

Числовим інтегруванням було побудовано пружну вісь поршневого кільця у вільному стані при сталій величині розподіленої сили q . Для цього інтегруванням виразу (10) згідно з (5) було зна-

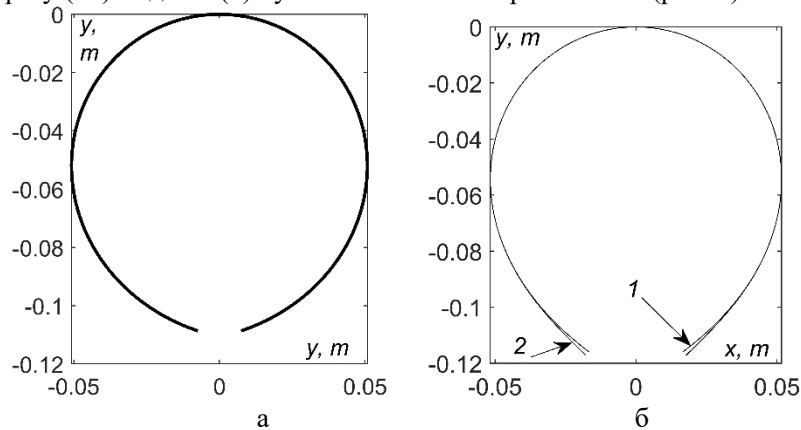


Рис. 4. Форма пружної осі поршневого кільця у вільному стані: а) при сталому значенні розподіленої сили q ; б) при сталому значенні розподіленої сили q , вдвічі більшої, ніж на рис. 4, а (позначено цифрою 1) і при зростанні розподіленої сили q біля зазору кільця (позначено цифрою 2)
Fig. 4. The shape of the elastic axis of a piston ring in the free state: a) at a constant value of the distributed force q ; b) at a constant value of the distributed force q , which is twice as large as in Figure 4, a (marked by the number 1) and with the increase of the distributed force q near the ring gap (marked by the number 2)

Радіус пружної осі кільця в робочому стані було прийнято $r=0,05$ м. Пружна вісь (рис. 4, а) відповідає кривій k_1 (рис. 2, б). На рис. 4, б побудовано дві пружні осі поршневого кільця: крива 1 відповідає кривій k_2 (див. рис. 2, б), а крива 2 – змінній розподіленій силі, графік якої зображено на рис. 3, б. При цьому складова цього графіка відповідала сталому значенню q розподіленої сили, яка діє по всій довжині осі кривої k_2 . У зв'язку з цим форма пружної осі кільця у вільному стані для обох випадків збігається, і тільки біля зазору існує незначне відхилення. Це відхилення можна побачити при співвідношенні сталого і пікового значень розподіленої сили, яке рівне двом і більше. При меншому співвідношенні криві практично збігаються.

Розроблений підхід дає можливість будувати форму пружної осі кільця і при інших

йдено поперечну силу і наступним інтегруванням її виразу згідно з (6) – прикладений момент. За аналогією пружної лінійки було побудовано дві симетричні вітки (рис. 4).

графіках дії розподіленої сили вздовж пружної осі.

Висновки. При прогинах балок, які застосовуються в будівельній справі, розрахунок форми їх пружної осі роблять за спрощеною лінійною теорією згину. Для практики це виправдано, оскільки прогин будівельних конструкцій порівняно з їх довжиною є незначним.

Однак існують елементи машин, у яких прогини значні. У статті отримано формули визначення форми пружної осі смуги при її значних прогинах із застосуванням нелінійної теорії згину. При цьому форма смуги у вільному стані приймається з початковою кривиною. Якщо кривина рівна нулю, то смуга прямолінійна, якщо вона має сталі значення, то пружна вісь смуги має форму дуги кола. Для першого випадку знайдені ана-

літичні залежності, за якими описується форма металевої лінійки при згинанні її моментом так, щоб її кінці збігалися. Для другого випадку розглянуто згинання смуги з криволінійною формою пружної осі на прикладі поршневого кільця. При цьому ставиться обернена задача: знайти криволінійну форму пружної осі кільця у вільному стані за умови, що після прикладення до нього розподіленої сили пружна вісь деформується у коло. Отримано аналітичні залежності, зроблено візуалізацію отриманих результатів.

Бібліографічний список

1. Харченко В. Є., Корсак В. І. Аналітичне розв'язання нелінійної задачі згину пружного стрижня. *Видавництво Львівської політехніки*. 2015. № 820. С. 105–115. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/945aae25-c33f-43cf-9b89-14f025612278/content>.
2. Chen T., Wang L., Xu J., Gao T., Qin X., Yang X., Cong Q., Jin J., Liu C. Effect of groove texture on deformation and sealing performance of engine piston ring. *Machines*. 2022. 10(11). P. 1020. doi: 10.3390/machines10111020.
3. Ershov A. A., Suleimanov B. I. Some features of bending of a rod under a strong longitudinal compression. *Russ. J. Math. Phys.* 2017. Vol. 24. P. 216–233. doi: 10.1134/S1061920817020078.
4. Forero J. D., Ochoa G. V., Rojas J. P. Effect of the geometric profile of top ring on the tribological characteristics of a low-displacement diesel engine. *Lubricants*. 2020. 8(8). P. 83. doi: [10.3390/lubricants8080083](https://doi.org/10.3390/lubricants8080083).
5. García-Vilana S., Sánchez-Molina D., Llumà J. *et al.* A new technique for curved rod bending tests based on digital image correlation. *Exp Mech.* 2022. Vol. 62. P. 573–583. doi: [10.1007/s11340-021-00794-7](https://doi.org/10.1007/s11340-021-00794-7).
6. Gebhardt C. G., Romero I. On a nonlinear rod exhibiting only axial and bending deformations: mathematical modeling and numerical implementation. *Acta Mech.* 2021. Vol. 232, P. 3825–3847. doi: [10.1007/s00707-021-03038-w](https://doi.org/10.1007/s00707-021-03038-w).
7. Han X., Chen X., Li K. *et al.* Bending rod is unnecessary in single-level posterior internal fixation and fusion in treatment of lumbar degenerative diseases. *BMC Surg.* 2021. Vol. 21. P. 394. doi: 10.1186/s12893-021-01386-x.
8. Kresan T., Pylypaka S., Khropost V., Babka V. Elastic bending of a strip with a significant deflection under the action of applied forces and moment. *Applied Geometry and Engineering Graphics*. 2022. P. 137–147. doi: [10.32347/0131-579x.2021.101.137-147](https://doi.org/10.32347/0131-579x.2021.101.137-147).
9. Rodriguez A. L., Vølund A., Klit P. Modeling of piston ring wear. *Proc IMechE Part J: Engineering Tribology*. 2021. Vol. 235(3). P. 629–638. doi: [10.1177/1350650120929860](https://doi.org/10.1177/1350650120929860).
10. Vetyukov Y., Schmidrathner C. A rod model for large bending and torsion of an elastic strip with a geometrical imperfection. *Acta Mech.* 2019. Vol. 230. P. 4061–4075. doi: 10.1007/s00707-019-02378-y.
11. Wang Z., Wang W., Zhang Q. New effective bending rigidity and structural instability analysis of noncircular cross-section elastic rod model. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2022. Vol. 231. P. 2325–2334. doi: [10.1140/epjs/s11734-021-00370-z](https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00370-z).

Стаття надійшла 10.05.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЗМУ ЗМІНИ СТУПЕНЯ СТИСКУ НА ШВИДКІСТЬ ЗНИЖЕННЯ СТУПЕНЯ СТИСКУ ЗАЛЕЖНО ВІД РЕЖИМУ РОБОТИ ДВИГУНА

Тетяна Колеснікова¹, к. т. н., Олександр Лиходій¹, к. т. н.,
Олександр Ракаєв¹, інж. І кат., 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, Україна,
e-mail: mechanic@ua.fm

Колеснікова Т., Лиходій О., Ракаєв О., Махоркіна Т. Дослідження впливу механізму зміни ступеня стиску на швидкість зниження ступеня стиску залежно від режиму роботи двигуна

Аналітично доведено, що у відомих двигунах максимальний ступінь стиску на малих навантаженнях не перевищує 12...14 через зниження ефективного ККД внаслідок значних втрат на тертя. Це обмежує можливість подальшого підвищення паливної економічності за рахунок збільшення ступеня стиску понад 14. Зазначено, що одним із можливих конструктивних варіантів двигуна, що забезпечує реалізацію змінного ступеня стиску понад 14, є безшатуний ДВЗ, в якому замість звичайного кривошипно-шатунного механізму застосовується кривошипно-кулісний механізм. Відмінною рисою двигуна із кривошипно-кулісним механізмом є низькі втрати на тертя у всьому діапазоні навантажень і частоти обертання, повна динамічна врівноваженість і рівномірність ходу, а також компактність і мала питома маса. Ці переваги пов'язані з тим, що в безшатуному двигуні поршні роблять строго прямолінійний рух, у зв'язку з чим бічні навантаження на них відсутні.

Виконано розрахунково-теоретичні дослідження безшатуного ДВЗ з кривошипно-кулісним механізмом, які дозволяють припустити про доцільність використання в такому двигуні змінного ступеня стиску.

Розроблена методика розрахунку механізму зміни ступеня стиску (МЗСС), що враховує взаємозв'язок параметрів механізму й робочого циклу двигуна.

Отримано, що на базі безшатуного двигуна з кривошипно-кулісним механізмом можливе створення двигуна з $\varepsilon = \text{var}$ з достатньою швидкістю МЗСС для запобігання детонації.

Встановлено, що зменшення частоти обертання колінчастого вала суттєво підвищує швидкість механізму, а середнє значення швидкості зміни ступеня стиску становить від 0,29 до 0,5 цикл⁻¹ на режимі максимального крутного моменту і може підвищуватися до 7 разів по зовнішній швидкісній характеристиці двигуна.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, методика теплового розрахунку, механічні втрати, робочий процес, циліндр, режими роботи, паливна економічність, кривошипно-кулісний механізм.

Kolesnikova T., Lykhodii O., Rakaiev O., Makhorkina T. Investigation of the influence of the mechanism of changing the compression ratio on the rate of reduction of the compression ratio depending on the engine operating mode

Studies have demonstrated that popular engines are limited to a maximum compression ratio between 12 to 14 at low loads due to significant friction losses that reduce efficiency. This puts a cap on improving fuel economy by increasing the compression ratio beyond 14. However, researchers have identified a potential solution to this limitation in the form of a pistonless internal combustion engine with a crank-slider mechanism, which allows for a variable compression ratio above 14. This engine design boasts low friction losses across all loads and speeds, complete dynamic balance, a uniform stroke, as well as a compact and lightweight structure. These benefits are made possible by the straight-line motion of pistons in a pistonless engine, which eliminates lateral loads on them.

Theoretical and computational studies have been conducted on the pistonless internal combustion engine with a crank-slider mechanism, which suggest the feasibility of utilizing a variable compression ratio in such engine.

A methodology for calculating the mechanism of variable compression ratio (VCR) has been developed, taking into account the interrelation of parameters of the mechanism and the engine's operating cycle.

It has been determined that based on the pistonless engine with a crank-slider mechanism, it is possible to create an engine with variable compression ratio (VCR) $\varepsilon = \text{var}$ with a sufficiently fast VCR mechanism to prevent detonation.

The research proves that reducing the crankshaft rotation frequency significantly increases the speed of the mechanism, with the average rate of compression ratio change ranging from 0.29 to 0.5 cycles per second at the maximum torque mode and potentially increasing up to seven times according to the engine's external speed characteristic.

Key words: internal combustion engine, thermal calculation methodology, mechanical losses, working process, cylinder, operating modes, fuel efficiency, crank-slider mechanism.

Постановка проблеми. Нині широко використовуються автомобілі та автомобільний транспорт. Найголовніше в автомобілі – це двигун. Тому на сьогодні виготовляють тягові агрегати з різним об'ємом і різної потужності для задоволення потреб споживача та його вимог до експлуатаційних характеристик. Але під час роботи двигуна на різних режимах він розвиває різну потужність, що не завжди є необхідним. Крім того, відсутні конструктивні можливості автоматичного регулювання їх потужності при зміні навантаження, що також є необхідністю вдосконалення серійних двигунів.

За останні роки є досягнення у вдосконаленні двигунів: підвищена питома потужність та зменшено витрату палива.

Передумовами вдосконалення двигунів є:

- застосування спеціальних пристроїв та оптимізація різних параметрів систем живлення й запалювання;
- розроблення двигунів з новим робочим процесом, який би давав змогу використовувати паливо ненафтового походження, наприклад водень, метанол;
- застосування електронного регулювання складу та подачі паливної суміші залежно від зміни навантажень на двигун у заданому діапазоні часу;
- керування газорозподіленням при зміні режиму роботи двигуна;
- регенерація тепла відпрацьованих газів та збільшення загальної потужності двигуна;
- розроблення пристроїв і систем примусового вимикання подачі палива під час роботи двигуна на холостому ходу, турбонаддуву, застосування присадок до моторних оливо;
- створення принципово нових двигунів, які б забезпечували зменшення витрати палива й токсичності відпрацьованих газів;
- застосування змінного ступеня стиску на часткових режимах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням двигунів зі змінним ступенем стиску займається багато науковців та академічних установ. З метою економії палива потрібно розробити двигун зі змінним робочим об'ємом.

Така конструкція двигуна дозволяє зменшити витрати палива на режимах, коли не використовується його максимальна потужність. Ці режими актуальні під час роботи автомобіля в міському циклі. Ступінь стиску є важливим параметром двигунів внутрішнього згорання, оскільки сильно впливає на його економічність і потужність.

Численні розрахунки й експериментальні дослідження показали, що регулювання ступеня стиску здатне забезпечити поліпшення паливної економічності на 20 %.

Кількість запропонованих конструкцій, що дозволяють регулювати ступінь стиску двигуна, дуже велика. Однак переважна більшість із них, теоретично дозволяючи вирішувати поставлені завдання щодо керування рухом поршнів, виявилася непридатною для практичної реалізації через неможливість забезпечити прийнятну працездатність двигуна або з технологічних причин. Тому тільки обмежене число двигунів було реалізоване в металі й лише одиничні конструкції вироблялися серійно.

У відомих двигунах [6; 7; 9] максимальний ступінь стиску на малих навантаженнях не перевищує 12...14 через зниження ефективного ККД внаслідок значних втрат на тертя. Це обмежує можливість подальшого підвищення паливної економічності за рахунок збільшення ступеня стиску понад 14.

Одним із можливих конструктивних варіантів двигуна, що забезпечує реалізацію змінного ступеня стиску понад 14, є безшатунний двигун внутрішнього згорання (ДВЗ) (рис. 1), в якому замість звичайного кривошипно-шатунного механізму застосовується кривошипно-кулісний механізм.

Дослідно-конструкторські роботи зі створення таких безшатунних двигунів останніми роками ведуться в Німеччині, США [8], Україні [1; 3] та інших країнах. Відмінною рисою схеми двигунів із кривошипно-кулісним механізмом є низькі втрати на тертя у всьому діапазоні навантажень і частоти обертання, повна динамічна рівноваженість і рівномірність ходу, а також компактність і мала питома маса. Ці переваги пов'язані з тим, що в безшатунному двигуні поршні роблять строго прямолінійний рух, у зв'язку з чим бічні навантаження на них відсутні.

Виконані теоретичні й експериментальні дослідження безшатунного ДВЗ з кривошипно-кулісним механізмом [2; 4] дозволяють припустити про доцільність використання в такому двигуні змінного ступеня стиску.

Аналіз безшатунного двигуна з кривошипнокулісним механізмом показує, що в цьому двигуні, крім можливості підвищення ефективного ККД при $\epsilon > 14$ через малі механічні втрати, конструктивно простіше реалізується змінний ступінь стиску.

Принципова схема безшатунного двигуна показана на рис. 2. У цьому двигуні механізм зміни ступеня стиску установлений між штоком і поршнем двигуна.

Постановка завдання. Експериментальний двигун має механізм газорозподілу (МГР) з верхнім підвісним розташуванням клапанів. На розподільному валу встановлені два впускних кулачки з можливістю їх провороту відносно вала, що дозволяє здійснювати регулювання

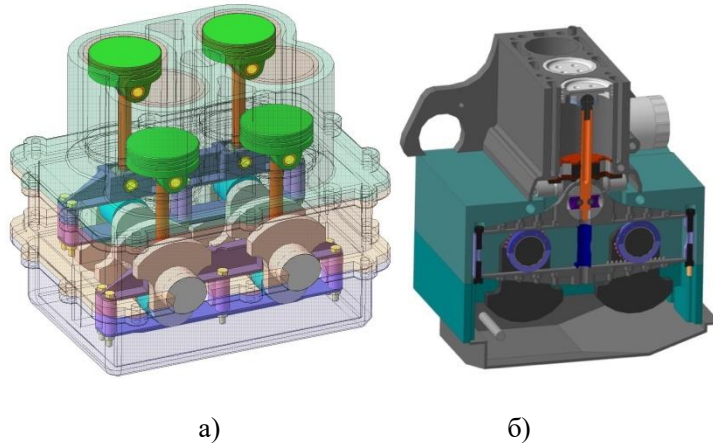


Рис. 1. Вигляд безштанунного двигуна:
а) з розташуванням циліндрів у квадрат; б) 3d-модель

Fig. 1. Form of a crankshaft engine:
a) with the cylinders arranged in a square configuration; b) 3D model

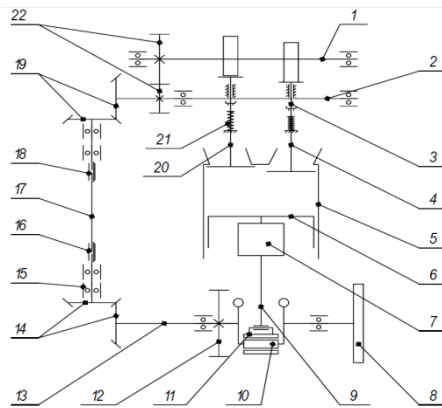


Рис. 2. Принципова схема експериментального двигуна:

1 – розподільний вал; 2 – проміжний вал; 3 – штовхачі; 4, 20 – клапани;
5 – циліндр; 6 – поршень; 7 – механізм зміни ступеня стиску; 8 – маховик;
9 – шток; 10 – повзун; 11 – куліса; 12 – синхронізуюча шестерня колінчастих валів; 13 – колінчастий вал; 14, 19 – конічні шестерні; 15 – підшипники кочення;
16, 18 – шліцьове з'єднання; 17 – привідний вал; 22 – циліндричні шестерні

Fig. 2. Schematic diagram of an experimental engine:

1 – camshaft; 2 – intermediate shaft; 3 – pushrods; 4, 20 – valves; 5 – cylinder; 6 – piston; 7 – compression ratio adjustment mechanism; 8 – flywheel; 9 – connecting rod; 10 – slider; 11 – rocker arm; 12 – synchronizing gear for crankshafts; 13 – crankshaft; 14, 19 – bevel gears; 15 – roller bearings; 16, 18 – spline coupling; 17 – drive shaft; 22 – cylindrical gears

потужності ДВЗ за методами Аткінсона та Міллера. У зв'язку з цим була розроблена методика розрахунку механізму зміни ступеня стиску МЗСС, що враховує взаємозв'язок параметрів механізму й робочого циклу двигуна.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що найчастіше отримані в результаті експериментів дані можуть бути застосовані тільки для двигунів, що мають аналогічний типорозмір, подібну конструкцію, спосіб сумішоутворення тощо. Очевидно, що методика розрахунку МЗСС повинна спиратися на загальні закономірності і мати можливість легко адаптуватися для конкретного двигуна.

Для встановлення впливу режимів роботи двигуна на швидкодію МЗСС, що характеризує

швидкість зниження тиску в циліндрі двигуна для відходу від детонаційного згоряння, необхідно враховувати взаємозв'язок робочого процесу

Враховуючи, що конструкція МЗСС передбачає гідравлічну систему, яка складається з резервуара та каналів зі зливом масла в картер двигуна, були прийняті такі допущення:

- по-перше, витікання масла з міжпоршневої порожнини можна прийняти як витікання в'язкої речовини з насадки, режим руху масла ламінарний (це підтверджується експериментальними дослідженнями механізму);

- по-друге, розрахунок витікання масла ведеться по середньому перетину каналу та сумарному опору, який враховує місцевий опір, втрати на тертя по довжині тощо;

- по-третє, температура масла відповідає температурі масла системи мащення двигуна при його роботі на різних режимах.

Оскільки в безштанному двигуні теоретично відсутня бокова сила p_N , механічні втрати на тертя між поршнем двигуна та зовнішнім поршнем МЗСС, а також між зовнішнім та внутрішнім поршнями МЗСС можна не враховувати.

Для вивчення руху в'язкої рідини може бути складена система диференціальних рівнянь Нав'є – Стокса, але таке моделювання, враховуючи геометрію каналів, досить складне і має бути вирішене числовими методами.

Для більшості технічних розрахунків достатньо користуватись рівняннями для всього потоку рідини вздовж каналів, наприклад рівняннями Бернуллі.

При складанні моделей вико ристовувалися обидва підходи залежно від конкретних умов.

Основною задачею моделювання слід вважати визначення швидкості руху зовнішнього поршня МЗСС щодо внутрішнього поршня, з'єданого зі штоком ККМ, що досить однозначно

дозволить визначити швидкість зміни ступеня стиску в циліндрі. Слід зазначити, що МЗСС має дві порожнини, які умовно будемо називати «верхня» й «нижня» (рис. 3). Нижня порожнина розташована ближче до картера двигуна, верхня – до камери згоряння. Нижня порожнина має канал підведення масла від масляного насоса, та вихід у картер двигуна.

Процеси, які відбуваються в механізмі, можна вважати квазістаціонарними. Це дозволяє тиск у каналах 1 та 2 визначити згідно з рівняннями Бернуллі.

Об'ємну витрату верхньої порожнини можна виразити через швидкість потоку і її площу живого перетину. Об'ємні витрати верхньої порожнини можна розрахувати через швидкості руху масла в каналах. Для цього необхідно отримати тиск на входах і виходах відповідних каналів – точки A_{c1} , A_{c2} , B_{c1} , B_{c2} (див. рис. 3).

$$Q_{ВП} = Q_{c1} + Q_{c2}, \quad (1)$$

де Q_{c1} , Q_{c2} – витрата рідини через відповідні перетини каналів 1 і 2.

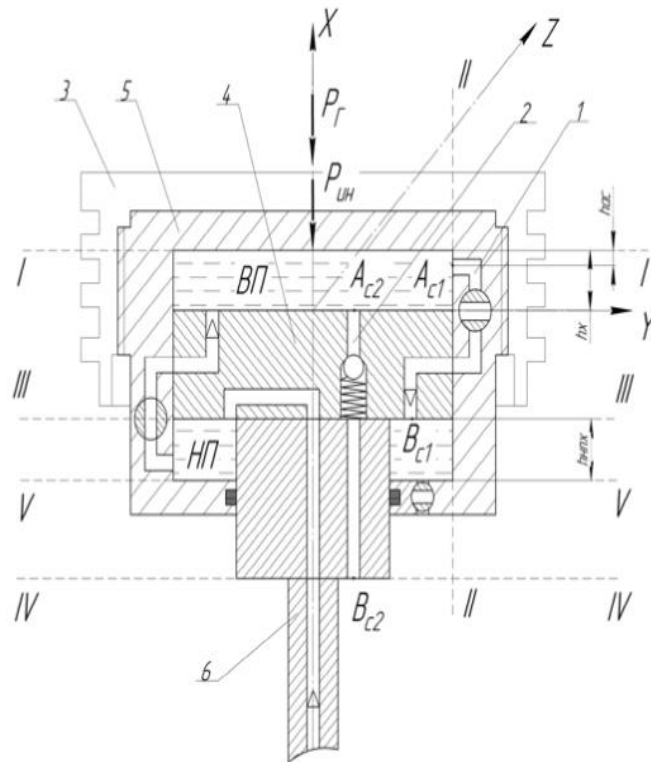


Рис. 3. Розрахункова схема поршня:

ВП – верхня порожнина; НП – нижня порожнина;

1 – перепускний канал; 2 – зливальний канал; 3 – поршень; 4, 5 – зовнішній та внутрішній поршні МЗСС; 6 – шток куліси

Fig. 3. Design scheme of a piston:

VP – upper cavity; NP – lower cavity; 1 – bypass channel; 2 – drain channel; 3 – piston; 4, 5 – external and internal pistons of the VCR mechanism; 6 – slider rod

Величини Q_{c1} і Q_{c2} можна розрахувати через швидкості руху масла в каналах [5].

Для спрощення задачі вважаємо, що в'язкий рух рідини в порожнинах механізму практично відсутній, тобто рух є присутнім тільки біля відповідних каналів.

Тоді рівняння Нав'є – Стокса

$$\frac{dy}{dt} V_{mi} + V_k \frac{dV_i}{dx_k} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_i} \quad (2)$$

Сили, що діють на рідину. По-перше, на рідину через поршень діє сила тиску газів. Вона задана робочим процесом двигуна і тиском, переданим в рідину (перетин I-I):

$$P_{ГВП} = \frac{P_{Г} F_{П}}{F_{ВП}} \quad (3)$$

де $p_{Г}$ – тиск газів у циліндрі двигуна;

$F_{П}$ – площа днища поршня;

$F_{ВП}$ – площа днища внутрішнього поршня (перетин I-I).

Питома сила інерції від рухомих мас МЗСС виражається так:

$$P_{ИИП} = \frac{(m_{П} + m_{ВП}) j_{П}}{F_{ВП}} \quad (4)$$

де $m_{П}$ і $m_{ВП}$ – маса відповідно поршня двигуна та зовнішнього поршня МЗСС.

Питома сила інерції, створювана верхніми і нижніми шарами рідини для довільного перетину верхньої порожнини, визначається за формулою

$$P_{ИЖ.Х} = j_{П} \rho_{Ж} (h_x - x) \quad (5)$$

де $\rho_{Ж}$ – густина рідини (моторного масла);

h_x – висота підйому зовнішнього поршня

відносно внутрішнього;

x – координата перетину по осі X.

Питома сила тиску масла в нижній порожнині, що передається через зовнішній поршень (перетин V-V):

$$P_{НП} = p_V \frac{F_{ВПV}}{F_{ВП}} \quad (6)$$

де $F_{ВПV}$ – робоча площа зовнішнього поршня по перетину V-V.

Оскільки рух рідини по порожнинах практично відсутній, а сили спрямовані лише вздовж осі X, з певною достовірністю можна стверджувати, що тиск у перетинах, паралельних площині YZ, однаковий в усіх точках рідини і виражає її повну енергію. Тоді тиск на поверхню внутрішнього поршня МЗСС, тобто в перетині YZ, дорівнює повному напору на вході в канал 2:

$$P_{AC2} = \frac{p_{Г} F_{П}}{F_{ВП}} + p_V \frac{F_{ВПV}}{F_{ВП}} + \frac{(m_{П} + m_{ВП}) j_{П}}{F_{ВП}} + j_{П} \rho_{Ж} h_x \quad (7)$$

Аналогічно для перетину I-I тиск, а відповідно і середній повний напір по перетину першого зливного каналу (тобто в т. A_{c1}):

$$P_{AC1} = \frac{p_{Г} F_{П}}{F_{ВП}} + p_V \frac{F_{ВПV}}{F_{ВП}} + \frac{(m_{П} + m_{ВП}) j_{П}}{F_{ВП}} + j_{П} \rho_{Ж} h_{ac} \quad (8)$$

Тиск у перетинах III-III і V-V. Відстань між перетинами $h_{НПХ}$ має геометричний зв'язок з h_x верхньої порожнини. Позначивши відповідні мінімальні відстані $h_{H\min}$ і $h_{B\min}$,

$$h_{НПХ} = h_{H\min} + h_{B\min} - h_x \quad (9)$$

Тиски в перетинах III-III і V-V пов'язані між собою, оскільки має місце перетікання з однієї порожнини в іншу. Для цієї конструктивної схеми мінімальний тиск у перетині III-III визначається тиском насоса і гідравлічними втратами в першому зливному каналі:

$$P_{BC1} = P_{нас}; P_{BC1n} = P_{нас\max} - A_n Q_{нас} \quad (10)$$

Поки тиск $P_{BC1} < P_{нас}$, масло до нижньої порожнини надходить через два канали, в іншому разі – через один.

Тоді тиск у перетині V-V:

$$P_V = P_{BC1n} + j_{П} \rho_{Ж} h_{НПХ} \quad (11)$$

Тиски P_{AC1} , P_{AC2} , P_{BC1} являють собою повний напір, тобто тиск загальмованого напору в заданих точках (з урахуванням швидкісного напору).

Таким чином, гідравлічні втрати в зливних магістралях

$$P_{C1} = P_{AC1} + P_{BC1}; P_{C2} = P_{AC2} + P_0 \quad (12)$$

де P_0 – атмосферний тиск.

Враховуючи загальновідомі залежності, швидкість рідини:

$$P_{AC1} = \left(\frac{D_{НП}}{d_{AC1}} \right)^2 V_{ПВ} \quad (13)$$

де $V_{ПВ}$ – швидкість зовнішнього поршня;

$D_{НП}$ – еквівалентний діаметр перетину нижньої порожнини.

Залежності справедливі, коли перепускний клапан другого каналу відрегульований на тиск Δp_{c1} при тиску в нижній порожнині більше ніж $P_{нас}$. Крім того, величина не буде постійною. У загальному вигляді залежність втрат тиску від витрати масла може бути виражена так:

$$\Delta p_{C1} = a_{c1} Q_{C1}^2 \quad (14)$$

де a_{c1} – гідравлічний опір трубопроводу. Значення опору знаходиться на основі експериментальних досліджень механізму.

За умови нерозривності потоку одержимо

$$D_{ВП}^2 V_{ВП} = D_{НП}^2 V_{ПВ} + d_{AC2}^2 V_{AC2} \quad (15)$$

де $D_{ВП}$ – діаметр верхньої порожнини;

d_{AC2} – діаметр каналу 2;

V_{AC2} – середня швидкість потоку в каналі 2.

При зниженні ступеня стиску можливі три варіанти зміни тиску в нижній порожнині:

1. У загальному випадку тиск підтримується на рівні тиску масляного насоса і масло

підкачується в порожнину через масляні канали, виконані в штоку.

2. Випадок, при якому тиск у порожнині змінюється довільно й не залежить від масляного насоса. Насос не працює або відключений.

3. Випадок, при якому тиск у порожнині не змінюється й дорівнює тиску масляного насоса. Масло подається в порожнину насосом, а канал з верхньої порожнини не працює, оскільки

недостатній тиск, щоб пересилити тиск масляного насоса.

Розглянемо варіанти 2 і 3.

Варіант 2. Тиск у порожнині змінюється довільно й не залежить від масляного насоса.

Враховуючи гідравлічні і кінематичні зв'язки, можна записати рівняння різниці тиску у відповідних точках:

$$p_{AC1} - p_{AC2} = \frac{1}{16} a_{C1} \pi D_{HP}^4 V_{PB}^2 + p_{BC1} - \frac{1}{16} a_{C2} \pi d_{AC2}^4 V_{AC2}^2 - p_0. \quad (16)$$

З іншого боку,

$$p_{AC1} - p_{AC2} = \left(\frac{p_{\Gamma} F_{\Pi}}{F_{B\Pi}} + \frac{(p_{BC1} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{HPX}) F_{B\Pi V}}{F_{B\Pi}} + \frac{(m_{\Pi} + m_{B\Pi}) \Pi}{F_{B\Pi}} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{ac} \right) - \left(\frac{p_{\Gamma} F_{\Pi}}{F_{B\Pi}} + \frac{(p_{BC1} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{HPX}) F_{B\Pi V}}{F_{B\Pi}} + \frac{(m_{\Pi} + m_{B\Pi}) j_{\Pi}}{F_{B\Pi}} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_x \right), \quad (17)$$

тобто

$$p_{AC1} - p_{AC2} = j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{ac} - j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_x. \quad (18)$$

З'єднавши формули, отримаємо рівняння:

$$j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{ac} - j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_x = \frac{1}{16} a_{C1} \pi D_{HP}^4 V_{PB}^2 + p_{BC1} - \frac{1}{16} a_{C2} \pi d_{AC2}^4 V_{AC2}^2 - p_0, \quad (19)$$

яке розв'язуємо відносно невідомої швидкості масла V_{AC2} . З отриманих коренів відкидаємо невірний (менший нуля) і одержимо:

$$V_{AC2} = \frac{1}{250 a_{C2} \pi} \left[\frac{a_{C2} \pi \left(\frac{1}{16} a_{C1} \pi D_{HP}^4 V_{PB}^2 + p_{BC1} - j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} (h_{ac} - h_x) - p_0 \right)}{d_{AC2}^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (20)$$

Розв'язання цього рівняння відносно невідомої швидкості поршня V_{PB} дозволяє одержати систему з рівнянь відповідно до кількості невідомих:

$$V_{PB} = 62500 \pi a_{C1} F_{B\Pi} V_{PB}^2 D_{HP}^4 + 10^6 p_e F_{\Pi} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{HPX} F_{B\Pi V}$$

$$V_{AC2} = \frac{V_{PB} (D_{B\Pi}^2 - D_{HP}^2)}{d_{AC2}^2}; \quad (21)$$

$$p_{AC2} = \frac{1}{16} a_{C2} \pi d_{AC2}^4 V_{AC2}^2 + p_0; \quad p_{AC1} = \frac{1}{16} a_{C1} \pi D_{HP}^4 V_{PB}^2 + p_{BC1}.$$

Варіант 3, коли тиск у порожнині не змінюється й дорівнює тиску масляного насоса.

Аналогічно запишемо систему чотирьох рівнянь, відповідну кількості невідомих:

$$p_{AC1} = \frac{p_{\Gamma} F_{\Pi}}{F_{B\Pi}} + \frac{(p_{BC1} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{HPX}) F_{B\Pi V}}{F_{B\Pi}} + \frac{(m_{\Pi} + m_{B\Pi}) j_{\Pi}}{F_{B\Pi}} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{ac};$$

$$p_{AC2} = \frac{p_{\Gamma} F_{\Pi}}{F_{B\Pi}} + \frac{(p_{BC1} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_{HPX}) F_{B\Pi V}}{F_{B\Pi}} + \frac{(m_{\Pi} + m_{B\Pi}) j_{\Pi}}{F_{B\Pi}} + j_{\Pi} \rho_{\text{ж}} h_x; \quad (22)$$

$$V_{AC2} = \frac{4}{a_{C2} \pi} \left[\frac{a_{C2} \pi (a_{C1} \pi (p_{AC2} - p_0) - p_0)}{d_{AC2}^2} \right]^{\frac{1}{2}};$$

$$V_{PB} = \frac{V_{AC2} d_{AC2}^2}{D_{B\Pi}^2}.$$

Таким чином, одержані дві системи рівнянь (21) і (22) складають математичну модель розрахунку параметрів МЗСС і ступеня стиску в циліндрі двигуна.

Запропонована методика дозволяє провести попередні дослідження роботи МЗСС, але для одержання остаточних результатів, у зв'язку з прийнятими допущеннями, вимагає уточнення. Щоб підвищити точність розрахунку, необхідно врахувати низку додаткових факторів, наприклад, силу тертя в рухомих частинах МЗСС, силу тертя поршневих кілець двигуна тощо.

У результаті розрахункових досліджень було отримано ряд залежностей. На рис. 4 показана залежність швидкості зміни висоти камери згоряння H від кута повороту колінчастого вала для двох розглянутих у частині 1 [5] випадків. Видно, що найбільша інтенсивність руху припадає на такти стиску та розширення завдяки діючим силам тиску газів та інерції.

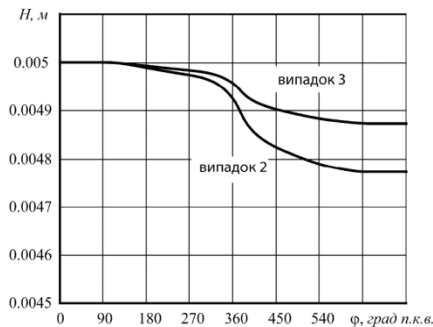


Рис. 4. Залежність зміни висоти камери згоряння H від кута повороту

колінчастого вала φ : $n = 3500 \text{ хв}^{-1}$; $\epsilon_{\text{max}} = 18,4$

Fig. 4. Dependence of a change in the height of the combustion chamber H on the angle of rotation of the crankshaft φ : $n = 3500$ per minute (rpm); $\epsilon_{\text{max}} = 18,4$

Зміна ступеня стиску від максимально можливої величини до мінімальної здійснюється за 17,5 циклів (рис. 5) у випадку 2 і до 34 у випадку 3.

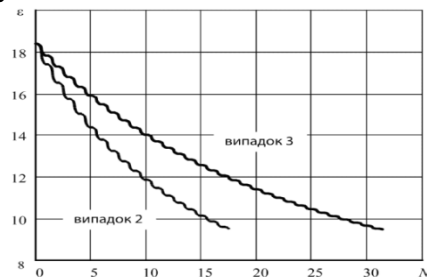


Рис. 5. Зміна ступеня стиску ϵ по циклах N ($n = 3500 \text{ хв}^{-1}$)

Fig. 5. Variation of the compression ratio ϵ throughout the cycles N ($n = 3500$ per minute (rpm))

Оскільки за один повний цикл ступінь стиску зменшується майже на одиницю, можна стверджувати про працездатність механізму зміни ступеня стиску та його спроможність запобігати детонації.

З огляду на час протікання термодинамічних процесів у двигуні, можна сказати, що швидкодія механізму зміни ступеня стиску в досліджуваному двигуні доволі висока. Її середнє значення може коливатися від 0,5 до 0,29 цикл^{-1} . Очевидно, перспективним буде відключення масляного насоса від механізму на момент зниження ступеня стиску.

Виходячи з аналітичних залежностей, на швидкодію МЗСС суттєво впливають сили інерції мас поршня двигуна і рухомих частин механізму.

Як показали розрахунки, 8-кратне збільшення мас поршня двигуна і зовнішнього поршня механізму для даного типу двигуна підвищує швидкість зміни ступеня стиску лише на 36 % (від 0,5 до 0,68 цикл^{-1}). Це дозволяє стверджувати, що при проєктуванні механізму зниження мас МЗСС і поршня двигуна несуттєво впливатиме на швидкодію механізму.

Аналіз зміни ступеня стиску в послідовних циклах від максимально можливого ϵ показує, що при зниженні ступеня стиску швидкодія механізму суттєво зменшується. При високих значеннях ступеня стиску швидкість зміни визначається, передусім, тиском газів у циліндрі двигуна. Це підтверджує залежність швидкості поршня від кількості циклів, що відповідає випадку 2 (рис. 6). Частота обертання колінчастого вала при цьому не змінювалась.

Очевидно, що при зниженні частоти обертання колінчастого вала (див. рис. 6), завдяки збільшенню часу одного циклу, суттєво зменшується кількість циклів до повного скидання ступеня стиску. Так, при мінімальній n швидкість зміни ступеня стиску досягає майже 3 цикл^{-1} .

Швидкодія МЗСС насамперед залежить від конструкції механізму. Його раціональні конструктивні параметри можна отримати виходячи з розрахунково-теоретичних досліджень. Один із важливих параметрів – це співвідношення умовних діаметрів нижньої і верхньої порожнин механізму ДНП/ДВП.

Графік залежності кількості циклів спрацювання механізму від відношення ДНП/ДВП (рис. 7) показує, що оптимальне співвідношення діаметрів нижньої та верхньої порожнин, при яких досягається максимальна швидкодія механізму, лежить у межах від 0,6 до 0,7.

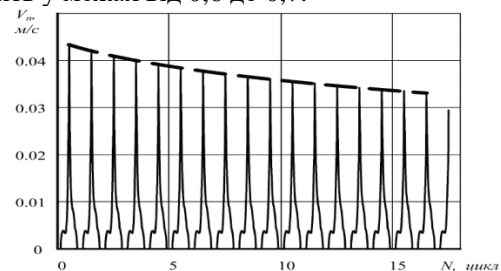


Рис. 6. Залежність швидкості зовнішнього поршня V_p до повного скидання ступеня стиску від кількості циклів N

Fig. 6. Dependence of the velocity of the external piston V_p until complete compression ratio release on the number of cycles N

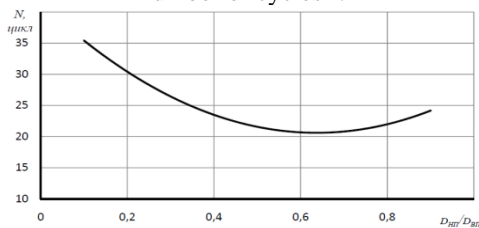


Рис. 7. Графік залежності кількості циклів N спрацювання МЗСС від співвідношення умовних діаметрів нижньої і верхньої порожнин ДНП/ДВП

Fig. 7. Graph illustrating the correlation between the compression ratio ϵ and the number of cycles N for various values of n

Висновки. Проведені дослідження впливу конструкції механізму зміни ступеня стиску на швидкість зниження ϵ залежно від режиму роботи двигуна і параметрів МЗСС показали:

1. На базі безшатуного двигуна з кривошипно-кулісним механізмом можливе створення двигуна з $\epsilon = \text{var}$ з достатньою швидкістю МЗСС для запобігання детонації.

2. Зменшення частоти обертання колінчастого вала суттєво підвищує швидкість механізму.

3. Середнє значення швидкості зміни ступеня стиску становить від 0,29 до 0,5 цикл⁻¹ на режимі максимального крутного моменту і може підвищуватися до 7 разів по зовнішній швидкісній характеристиці двигуна.

Бібліографічний список

1. Безшатуний двигун внутрішнього згоряння: пат. 42034 Україна, МКІ F 02 B 75/32. № 97062776; заявл. 11.06.1996; опубл. 15.10.2001, Бюл. № 9.

2. Мищенко Н. И., Новокрещенов В. С., Химченко А. В. Исследование и разработка экспериментального образца бесшатуного бензинового двигателя с переменной степенью сжатия. *Автомобили и двигатели*: отчет о НИР / Донецкий государственный технический университет. Автомобильно-дорожный институт. № г/р 0197U009344. Донецк, 1999.

3. Міщенко М. І. Нетрадиційні малорозмірні двигуни внутрішнього згоряння. Т. 1: Теорія, розробка та випробування нетрадиційних двигунів внутрішнього згоряння. Донецьк: Лебідь, 1998. 228 с.

4. Покращення показників двотактного безшатуного бензинового двигуна на основі оптимізації його параметрів / М. І. Міщенко, В. С. Новокрещенов, А. В. Химченко, С. М. Крамар. *Автомобілі і двигуни*: звіт про НДР / Донецький національний технічний університет. Автомобільно-дорожній інститут. № г/р 0100U001096. Донецьк, 2002.

5. Розрахунок та дослідження механізму зміни ступеня стиску для бензинового двигуна. Ч. 1: Математична модель / М. І. Міщенко, А. В. Химченко, Т. М. Колеснікова, В. С. Шляхов. *Вісті Автомобільно-дорожного інституту*. 2008. № 1(6). С. 10-16.

6. Целоков М. Двигуни зі змінним ступенем стиснення: від Saab до Infiniti URL: <https://dvizhok.su/parts/dvigateli-s-izmenyaemoj-stepenyu-szhatiya-ot-saab-do-infiniti> (дата звернення: 19.05.2023).

7. Pouliot H. N., Robinson C. W., Delameter W. R. A Variable displacement spark-ignition Engine. Final Report. Report No. SAND 77 – 8299. Sandia Laboratories. Livermore, California, 1978.

8. Reciprocating piston mechanism and a method of increasing internal egrin an internal combustion engine: pat. 2001/0036334 США, A1 : F02B 47/08; declared 9.01.2009; published 17. 02. 2011. 4 p.

9. Variable Kompression. *Auto, Mot. und Sport, DE*. 2000. No 6. P. 12.

Стаття надійшла 23.05.2023

ПРО НАПРУЖЕННЯ В КОМПОЗИТАХ ПРИ НАГРІВАННІ

Тарас Бубняк¹, к. ф.-м. н., Віктор Семерак¹, к. т. н.,
Олександр Пономаренко¹, к. ф.-м. н., Мар'яна Богач¹, к. е. н., Тетяна Воліна², к. т. н.

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

²Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна,
Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, Україна,
e-mail: t.n.zaharova@ukr.net

Бубняк Т., Семерак В., Пономаренко О., Богач М., Воліна Т. Про напруження в композитах при нагріванні

Просторові задачі теорії пружності часто виникають при вирішенні різних технічних і технологічних проблем сучасного виробництва, зокрема при побудові композитних матеріалів та елементів конструкцій.

Поведінку конструктивних матеріалів можна вивчати на трьох структурних рівнях: макро-, мікро- і атомарному. У будівельній механіці поняття суцільного середовища має зміст тільки на мікрорівні. Врахування впливу неоднорідності матеріалу на цьому рівні при аналізі макронапружень суттєво залежить від розміру самої конструкції.

З розвитком і впровадженням нових конструкційних матеріалів виникає необхідність вміння оцінювати їх міцнісні властивості при різних видах навантаження.

При створенні композитних матеріалів включення, що виникають у матриці, суттєво впливають на напружено-деформівний стан композиту в цілому при різних механічних чи теплових навантаженнях.

Досягнення компонентами напружень екстремальних значень на межі розділу фаз зумовлене в одних випадках технологією виробництва, а в інших – неоднорідність вводиться з метою покращання міцності матеріалу.

Дослідження просторових задач статичної теорії пружності і термопружності для однорідних ізотропних та анізотропних тіл у загальній постановці пов'язане з великими математичними труднощами через складність побудови розв'язку системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, який задовольняє граничні умови.

Одним з ефективних методів розв'язку задач теорії пружності є метод Фур'є, який базується на представленні загальних розв'язків рівнянь рівноваги через потенціальні функції. Особливістю застосування методу Фур'є є використання різних представлень розв'язку рівнянь Ламе через гармонічні функції, що дозволяє шукати розв'язок у вигляді рядів.

Важливі результати в цьому напрямі отримані в роботах Ю. М. Коляно, Я. С. Підстригача, Ю. М. Подільчука та багатьох інших, в яких побудовані точні розв'язки просторових задач теорії пружності і статичної термопружності у сферичній, циліндричній, сфероїдальній, параболічній та інших системах координат.

У роботі розглядається задача про розподіл термонапружень необмеженого трансверсально-ізотропного середовища, яке містить анізотропне, відносно механічних і теплових властивостей включення у формі стиснутого сфероїда при рівномірному нагріві.

При розв'язуванні просторових задач теорії пружності зі сфероїдальними включеннями, зокрема тут, зручно користуватись системами координат для стиснутого сфероїда.

Проведені дослідження свідчать про те, що при рівномірному нагріві середовища $T^0 = cz$ напруження на поверхні включення мають локальний характер як уздовж осі X , так і вздовж осі Z . Концентрація напружень швидко згасає при віддаленні від поверхні включення, прямуючи до нульового значення.

Ключові слова: потенціальні функції, трансверсально-ізотропне середовище, неідеальний контакт, сфероїд, поля напружень і термонапружень.

Bubniak T., Semerak V., Ponomarenko O., Bohach M., Volina T. On tension in composites under heating

Spatial problems of the theory of elasticity often arise when solving various technical and technological problems of modern production, in particular when building composite materials and structural elements.

The behavior of structural materials can be studied at three structural levels: macro-, micro-, and atomic level. In construction mechanics, the concept of continuous medium is essential only at the micro level. Consideration of the effect of material heterogeneity at this level in the analysis of macrostresses significantly depends on the size of the structure itself.

Development and introduction of new structural materials require evaluating their strength properties under various types of load.

When creating composite materials, the inclusions that appear in the matrix significantly affect the stress-strain state of the composite as a whole under various mechanical or thermal loads.

The achievement of extreme values by stress components at the interface of phases is due to the production technology in some cases, and, heterogeneity in others. It is introduced to improve the strength of the material.

The study of spatial problems of the static theory of elasticity and thermoelasticity for homogeneous isotropic and anisotropic bodies in the general formulation is associated with great mathematical difficulties caused by the complexity of constructing a solution of a system of partial differential equations that satisfies the boundary conditions.

One of the effective methods of solving problems of elasticity theory is the Fourier method, which is based on the representation of general solutions of equilibrium equations through potential functions. A feature of the Fourier method is the use of different representations of the solution of the Lamé equations through harmonic functions, which allows searching for a solution in the form of a series.

In this direction, important results were presented in the works of Yu. M. Koliano, Ya. S. Pidstryhach, Yu. M. Podilchuk and many others, in which 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 paper considers the problem of distribution of thermal stresses in an unbounded transversely isotropic medium, which contains anisotropic inclusions in the form of a compressed spheroid with uniform heating, relative to mechanical and thermal properties.

When solving spatial problems of the theory of elasticity with spheroidal inclusions, it is convenient to use coordinate systems for a compressed spheroid.

The conducted studies show that with uniform heating of the medium, the stresses on the inclusion surface are local both along the X axis and along the Z axis.

Key words : potential functions, transversally isotropic medium, imperfect contact, spheroid, field of pressure.

Постановка проблеми. Просторові задачі теорії пружності часто виникають при вирішенні різних технічних і технологічних проблем сучасного виробництва, зокрема при побудові композитних матеріалів та елементів конструкцій.

Поведінку конструктивних матеріалів можна вивчати на трьох структурних рівнях: макро-, мікро- і атомарному. У будівельній механіці поняття суцільного середовища має зміст тільки на мікрорівні. Врахування впливу неоднорідності матеріалу на цьому рівні при аналізі макронапружень суттєво залежить від розміру самої конструкції.

З розвитком і впровадженням нових конструкційних матеріалів виникає необхідність уміти оцінювати їх міцнісні властивості при різних видах навантаження [6].

При створенні композитних матеріалів включення, що виникають у матриці, суттєво впливають на напружено-деформівний стан композиту в цілому при різних механічних чи теплових навантаженнях.

Досягнення компонентами напружень екстремальних значень на межі розділу фаз зумовлене в одних випадках технологією виробництва, а в інших – неоднорідність вводиться з метою покращання міцності матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження просторових задач статичної теорії пружності і термопружності для однорідних ізотропних та анізотропних тіл у загальній постановці пов'язане з великими математичними труднощами через складність побудови розв'язку системи диференціальних

рівнянь у частинних похідних, який задовольняє граничні умови [9].

Одним з ефективних методів розв'язку задач теорії пружності є метод Фур'є, який базується на представленні загальних розв'язків рівнянь рівноваги через потенціальні функції. Особливістю застосування методу Фур'є є використання різних представлень розв'язку рівнянь Ламе через гармонічні функції, що дозволяє шукати розв'язок у вигляді рядів [10].

Важливі результати в цьому напрямі отримані в роботах Ю. М. Коляно, Я. С. Підстригача, Ю. М. Подільчука та багатьох інших, в яких побудовані точні розв'язки просторових задач теорії пружності і статичної термопружності у сферичній, циліндричній, сфероїдальній, параболічній та інших системах координат.

Постановка завдання. У роботі розглядається задача про розподіл термонапружень необмеженого трансверсально-ізотропного середовища, яке містить анізотропне, відносно механічних і теплових властивостей включення у формі стиснутого сфероїда при рівномірному нагріві.

Виклад основного матеріалу. Одним з ефективних методів розв'язування просторових задач теорії пружності є метод Фур'є, який полягає у представленні загального розв'язку рівнянь рівноваги через потенціальні функції [6].

Розглянемо систему рівнянь задачі статичної термопружності за відсутності масових сил що забезпечують збіжність граничних поверхонь.

$$\begin{aligned}
 & c_{11} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + c_{44} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \\
 & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}) \frac{\partial V}{\partial y} + (c_{13} + c_{44}) \frac{\partial W}{\partial z} \right] = \beta \frac{\partial T}{\partial x}, \\
 & \frac{1}{2}(c_{11} + c_{12}) \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + c_{11} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + c_{44} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + \\
 & \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{2}(c_{11} + c_{12}) \frac{\partial U}{\partial x} + (c_{13} + c_{44}) \frac{\partial W}{\partial z} \right] = \beta \frac{\partial T}{\partial y}, \\
 & c_{44} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + c_{33} \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + (c_{13} + c_{44}) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) = \beta' \frac{\partial T}{\partial y}, \\
 & \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \beta'' \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де c_{ij} , β , β' , β'' – сталі характеризують механічні й теплові властивості тіла.

Розв'язок рівнянь (1) при дійсних різних коренях характеристичного рівняння виражається через чотири потенціальні функції [6; 9]:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_3}{\partial y} + \frac{\partial \Phi_4}{\partial x}, \quad V = \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} + \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} - \frac{\partial \Phi_3}{\partial x} + \frac{\partial \Phi_4}{\partial y}, \\
 W &= k_1 \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} + k_2 \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} + k_4 \frac{\partial \Phi_4}{\partial z}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Ці функції задовольняють умови

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + v_j \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Phi_j = 0, \quad (j = \overline{1,4}), \quad \frac{\partial^2 \Phi_4}{\partial z^2} = k_3 T, \tag{3}$$

де $v_3 = \frac{2c_{44}}{c_{11} - c_{12}}$, $v_4 = \beta''$, а величини v_1, v_2 – корені відповідного характеристичного рівняння [10].

При розв'язуванні просторових задач теорії пружності зі сфероїдальними включеннями, зокрема тут, зручно користуватись системами координат для стиснутого сфероїда [9; 10] $(\eta_j, \theta_j, \varphi)$:

$$\begin{aligned}
 x &= a_j \operatorname{ch} \eta_j \sin \theta_j \cos \varphi, & y &= a_j \operatorname{ch} \eta_j \sin \theta_j \sin \varphi, & z &= \lambda_j a_j \operatorname{sh} \eta_j \cos \theta_j, & \text{причому} & \\
 0 \leq \eta_j < \infty, & 0 \leq \theta_j < \pi, & 0 \leq \varphi < 2\pi. & & & & \text{Введемо} & \text{позначення:}
 \end{aligned}$$

$\operatorname{ch} \eta_j = q_j$, $\operatorname{sh} \eta_j = \overline{q_j}$, $\cos \theta_j = p_j$, $\sin \theta_j = \overline{p_j}$, $\operatorname{ch} \eta_{j0} = q_{j0}$, $\operatorname{sh} \eta_{j0} = \overline{q_{j0}}$. На граничній поверхні сфероїда $(\eta_j = \eta_{j0} = \text{const})$ виконуються рівності

$$a_1 q_{10} = a_2 q_{20} = a_3 q_{30}, \quad \lambda_1 a_1 \overline{q}_{10} = \lambda_2 a_2 \overline{q}_{20} = \lambda_3 a_3 \overline{q}_{30},$$

Позначимо температуру, пружні характеристики, коефіцієнти лінійного розширення і теплопровідності трансверсально-ізотропного середовища $T^0, c_{ij}, \alpha, \alpha_1, \lambda, \lambda_1$; а через $T', c'_{ij}, \alpha', \alpha'_1, \lambda', \lambda'_1$ – відповідні характеристики включення. Для ідеального теплового контакту $T^0 = T'$. При дії температури T^0 в середовищі виникають переміщення

$$U^0 = T^0 d_1 x, \quad V^0 = T^0 d_1 y, \quad W^0 = T^0 d_2 z, \tag{4}$$

$$\text{де } d_1 = \frac{c_{13}(2\alpha c_{13} + \alpha_1 c_{33}) - \alpha c_{33}(c_{11} + c_{12})}{2c_{13}^2 - c_{33}(c_{11} + c_{12})}, \quad d_2 = \frac{2\alpha c_{13}(c_{11} + c_{12}) - (c_{11} + c_{12})(2\alpha c_{13} + \alpha_1 c_{33})}{2c_{13}^2 - c_{33}(c_{11} + c_{12})}.$$

Для ідеального контакту маємо граничні умови на поверхні $(\eta_j = \eta_{j0})$:

$$\sigma_{ij}\eta_j = \sigma'_{ij}\eta_j, \quad \bar{U}(T^0) + \bar{U}_q = \bar{U}'(T^0) + \bar{U}' \quad (5)$$

Припустимо, що переміщення у включенні мають теж лінійний характер

$$U' = A_1 T_1' x, \quad V' = A_1 T_1' y, \quad W' = C_1 T_2' z, \quad (6)$$

де A_1, C_1 – поки що невідомі величини.

Враховуючи формули (4-6), отримаємо переміщення на поверхні сфероїда при додатковому напруженому стані [1; 2; 7; 8]:

$$\begin{aligned} U_q &= -(A_1 - d_1)T'a_j q_{j0} P_1^{(1)}(p_j) \cos \varphi; \\ V_q &= -(A_1 - d_1)T'a_j q_{j0} P_1^{(1)}(p_j) \sin \varphi; \\ W_q &= (C_1 - d_2)T'\lambda_j a_j \bar{q}_{j0} P_1(p_j). \end{aligned} \quad (7)$$

У включенні додатковий напружений стан описується переміщеннями

$$\begin{aligned} U_j &= \frac{a_{10}^{(j)}}{4a_j} P_1^{(1)}(p_j) Q_1^{(1)}(i\bar{q}_j) \cos \varphi; \\ V_j &= \frac{a_{10}^{(j)}}{4a_j} P_1^{(1)}(p_j) Q_1^{(1)}(i\bar{q}_j) \sin \varphi; \end{aligned} \quad (8)$$

$$W_j = \frac{k_j}{2a_j \lambda_j} P_1(p_j) Q_1(i\bar{q}_j) a_{10}^{(j)}, \quad j=1,2; \quad i^2 = -1.$$

Невідомі величини $a_{10}^{(j)}$ ($j=1,2$) знаходимо зі системи рівнянь [3–5; 11]:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^2 \frac{2}{a_j} Q_1^{(1)}(i\bar{q}_{j0}) a_{10}^{(j)} = -8a_j q_{j0} (A_1 - d_1) T', \\ \sum_{j=1}^2 \frac{k_j}{a_j \lambda_j} Q_1(i\bar{q}_{j0}) a_{10}^{(j)} = 2\lambda_j a_j \bar{q}_{j0} (C_1 - d_2) T'. \end{cases} \quad (9)$$

Аналітичні розрахунки дають компоненти напружень у середовищі біля включення, уздовж осі Z ($\theta_j = 0$):

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y &= \sum_{j=1,2} \left(\frac{c_{13}}{v_j} k_j - \frac{c_{11} + c_{13}}{2} \right) \left(Q_0(i\bar{q}_j) - \frac{\bar{q}_j}{q_j^2} \right) \frac{a_{10}^{(j)}}{2a_j^2}, \\ \sigma_z &= \sum_{j=1,2} \frac{a_{10}^{(j)}}{2a_j^2} \left(Q_0(i\bar{q}_j) - \frac{\bar{q}_j}{q_j^2} \right) \left(c_{33} \frac{k_j}{v_j} - c_{13} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогічно напруження вздовж осі X ($\theta_j = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$):

$$\begin{aligned} \sigma_x - \sigma_y &= \frac{1}{2} (c_{11} - c_{12}) \sum_{j=1,2} \frac{a_{10}^{(j)}}{a_j^2 q_j q_j^2}, \\ \sigma_x + \sigma_y &= \sum_{j=1,2} \frac{a_{10}^{(j)}}{2a_j^2} \left(c_{11} + c_{12} - 2c_{13} \frac{k_j}{v_j} \right) \left(\frac{1}{q_j} - Q_0(i\bar{q}_j) \right), \\ \sigma_z &= \sum_{j=1,2} \frac{a_{10}^{(j)}}{2a_j^2} Q_0(i\bar{q}_j) \left(c_{33} \frac{k_j}{v_j} - c_{13} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Числові розрахунки зроблені для матеріалів з такими пружними і тепловими характеристиками [3; 12–14]:

трансверсально-ізотропне середовище

$$c_{11} = 5,97; c_{12} = 2,62; c_{13} = 2,17; c_{33} = 6,17; \lambda = 61,06; \lambda_1 = 80,84; \alpha = 5,0; \alpha_1 = 3,5;$$

трансверсально-ізотропне включення

$$c'_{11} = 12,1; c'_{12} = 4,81; c'_{13} = 4,42; c'_{33} = 5,13; \lambda' = 66,96; \lambda'_1 = 78,0; \alpha' = 27,0; \alpha'_1 = 34.$$

Характер концентрації нормальних, меридіальних і кругових напружень уздовж осі X можна побачити на рис. 1. На рис. 2 зображено розподіл напружень уздовж осі Z .

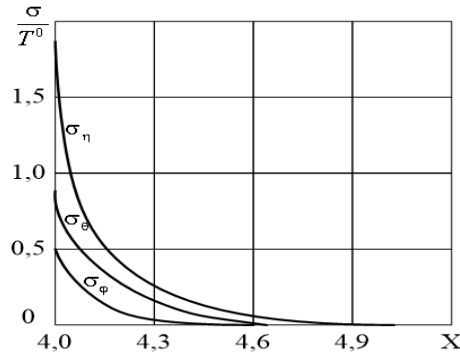


Рис. 1. Характер концентрації нормальних, меридіальних і кругових напружень уздовж осі X .
Fig. 1. Character of the concentration of normal, meridional and circular stresses along the X axis.

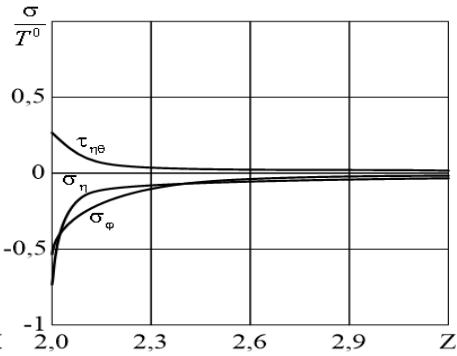


Рис. 2. Характер концентрації дотичних, нормальних і кругових напружень уздовж осі Z .
Fig. 2. Character of the concentration of tangential, normal and circular stresses along the Z axis.

Висновки. Проведені дослідження свідчать про те, що при рівномірному нагріві середовища $T^0 = cz$ напруження на поверхні включення $\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$ ($a = b = 4, c = 2$) мають локальний характер як уздовж осі X , так і уздовж осі Z . Концентрація напружень швидко згасає при віддаленні від поверхні включення, прямуючи до нульового значення [1; 2; 9; 10].

Бібліографічний список

1. Бубняк Т. І. Концентрація нормальних напружень у включенні за дії лінійного температурного поля. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2018. № 19. С. 46-48.
2. Бубняк Т. І. Розподіл напружень на поверхні порожнини у трансверсально-ізотропному середовищі. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2020. № 21. С. 5-9.
3. Максимум 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.
4. Підстригач Я. С., Коляно Ю. М. Температурні поля, що не встановилися, і напруги в тонких пластинках. Київ: Наук. думка, 1972. 308 с.
5. Підстригач Я. С., Ярема С. Я. Температурні напруження в оболонках. Київ: Вид-во АН УРСР, 1961. 212 с.
6. Подильчук Ю. Н. Граничні задачі статички пружних тіл. *Просторові задачі теорії пружності і пластичності*: в 5 т. Київ: Наук. думка, 1984. Т. 1. 303 с.

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*. 2010. № 11. С.14-27.
8. Семерак В. М., Косарчин В. І. Термо-напружений стан в околі локальної ділянки фрикційного контакту. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 271-275.
9. 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.
10. Соколовський Я. І. Просторова задача трансверсально-ізотропного середовища із сфероїдальним включенням при неідеальному механічному контакті. *Доп. НАН України*. 1996. № 9. С. 45-50.
11. Шевчук В. А. Нестационарна одновимірна задача теплопровідності для циліндра з тонким багаточаровим покриттям. *Математичні методи та фізико-механічні поля*. 2011. № 2. С. 179-185.
12. 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.
13. Ionescu-Cazimir V. Theoreme de reciprocitate pentru problema dinamica a termo-elasticității. *An. Univ. Bucuresti. Ser. stiint. natur.* 1963. Vol. 12, No. 39. P. 93-100.
14. Zorski H. On certain property of thermoelastic media. *Bull. Acad. pol. sci. Ser. sci. techn.* 1958. Vol. 6, No. 6. P. 331-339.

Стаття надійшла 30.04.2023

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ВІЙСЬКОВОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Василь Кохан, к. т. н.

Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного,
вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, Україна,
e-mail: vdv29121973@gmail.com

Кохан В. Методологічний підхід до вибору військової автомобільної техніки

Потрібно чітко розуміти, що найближчим часом необхідна кількість колісної військової техніки різного класу/тоннажності вироблятися не буде і стане проблема у швидкому і повному розв'язанні цієї задачі. Найбільш раціональним шляхом її вирішення є вибір колісної техніки за технічними характеристиками/показниками, що найбільше підходить до вітчизняних умов, щоб якісно укомплектувати парк колісних машин Збройних сил України і підрозділів Національної гвардії України.

На основі аналізу парку колісних машин основних країн-виробників військової автомобільної техніки та нормативно-технічних документів з питань мобільності напрацьовані підходи для її визначення в наших складних умовах. Зокрема визначено, що мобільність – це комплексний показник, що охоплює швидкохідність, маневреність, керованість, прохідність, стійкість та автономність військової автомобільної техніки (ВАТ).

У статті запропонований методологічний підхід застосування швидкої оцінки ситуації за допомогою методу аналізу ієрархій з урахуванням технічних критеріїв, за якими доводиться обирати автомобільну колісну техніку.

Суть методу аналізу ієрархій полягає в побудові ієрархічної моделі, визначенні власних векторів і власних чисел квадратних обернено симетричних матриць, перевірці узгодженості результатів.

Обраний підхід дозволяє ранжувати базові властивості мобільності ВАТ, що, своєю чергою, допоможе виділити ті з них, що є найважливішими зараз для вибору військової техніки. Критерії відбору сформовані на основі чинної законодавчо-нормативної бази, що стосується оборонних закупівель державним коштом.

Проведені нами розрахунки дозволяють визначити вагову частку кожного із семи основних технічних показників, що суттєво впливають на показники мобільності військових колісних машин на сучасному полі бою і в подальших оцінках інших зразків військової техніки.

Ключові слова: військова автомобільна техніка, мобільність, метод аналізу ієрархій, швидка оцінка ситуації, особа, що здійснює оцінку.

Kokhan V. Methodological approach to choosing military vehicles

It is important to understand that it may take a while before the required number of military vehicles of different classes and tonnage can be produced. As a result, there could be a problem in quickly and completely solving this issue. The best way to address this problem is to choose wheeled vehicles that are most suitable for domestic conditions based on their technical characteristics and indicators to adequately complete the wheeled vehicle fleet of the Armed Forces of Ukraine and the units of the National Guard of Ukraine.

After analyzing the wheeled vehicle fleet of the main countries that manufacture military vehicles and reviewing normative and technical documents on mobility issues, the author has proposed approaches to define mobility in complicated Ukrainian conditions. Specifically, mobility is a complex indicator that encompasses speed, maneuverability, controllability, cross-country ability, stability, and autonomy of military vehicles (MV).

The research proposes a methodological approach to quickly assess the situation using the method of analytic hierarchy, which takes into account the technical criteria used to select wheeled vehicle equipment.

The method of analytic hierarchy involves constructing a hierarchical model, determining the eigenvectors and eigenvalues of square inverse symmetric matrices, and verifying the consistency of the results.

This approach enables ranking the basic properties of MV mobility and identifying those that are currently the most important for selecting military equipment. The selection criteria are based on the current legislative and regulatory framework concerning defense procurement at public expense.

The performed calculations help determine the weight share of each of the seven main technical indicators that significantly affect the mobility performance of military motor vehicles on the modern battlefield, as well as in assessments of other military equipment.

Key words: military motor vehicles, mobility, method of analytic hierarchy, rapid situation assessment, a person carrying out the assessment.

Постановка проблеми. На основі аналізу парку машин основних країн-виробників військової автомобільної техніки та нормативно-технічних документів з питань мобільності напрацьовані підходи для її визначення в наших умовах. Зокрема визначено, що *мобільність* – це

комплексний показник, що охоплює швидкохідність, маневреність, керованість, прохідність, стійкість та автономність ВАТ.

Проведений нами аналіз дозволяє в найзагальнішому вигляді сформулювати деякі пропо

зиції з удосконалення методології закупівель державним коштом. Для цього необхідно визначити:

- відповідні структури для організації відбору та оцінки ВАТ;
- механізми й інструменти її реалізації;
- необхідність у підготовці та перепідготовці кадрів, які в стані здійснювати її обгрунтований вибір.

Для потреб нашого дослідження автором був використаний метод швидкої оцінки ситуації [9, с. 16-17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постійні зміни, що відбуваються на арені воєнних дій, і необхідність поновлення парку ВАТ вимагають прийняття оперативних рішень.

Швидка оцінка ситуації (ШОС) дозволяє оперативно обирати ВАТ. Для оброблення отриманих оцінок застосуємо метод аналізу ієрархій (МАІ) [2; 3; 14, с. 56; 17]. Існують приклади вдалого використання МАІ для формалізації процесу прийняття управлінських рішень у

будівництві, поліграфії та в сільському господарстві тощо [10; 15; 16; 5; 8; 11].

Постановка завдання. Нами запропоновано методологічний підхід застосування ШОС за допомогою МАІ з урахуванням технічних критеріїв, за якими доводиться обирати ВАТ.

Виклад основного матеріалу. Суть МАІ полягає в побудові ієрархічної моделі, визначенні власних векторів і власних чисел квадратних обернено симетричних матриць, перевірці узгодженості результатів. На практиці це виглядає як послідовність етапів, наведених нижче.

Етап 1. Розглянемо скінченну множину альтернатив $X = \{x^1, \dots, x^m\}$. За порівняння двох довільних елементів x^i і x^j цієї множини перед особою, що здійснює оцінку (ОЗО), ставиться питання: наскільки один елемент множини переважає інший? Для визначення ваги об'єктів порівняння використано спеціальну дев'ятибальну шкалу відносної важливості об'єктів (табл. 1) [7; 13, с. 104].

Таблиця 1. Шкала відносної важливості об'єктів порівняння
Table 1. Scale of the relative importance of comparison objects

Оцінка, балів	Визначення
1	Об'єкти порівняння рівноцінні
3	Один дещо переважає інший
5	Один переважає інший
7	Один значно переважає інший
9	Один абсолютно переважає інший
2, 4, 6, 8	Проміжні значення оцінювання об'єктів за важливістю

Джерело: [7; 13, с. 104].

Етап 2. За результатами наших досліджень складемо матрицю парних порівнянь $A = \|a_{ij}\|_{(m \times m)}$

Якщо відповіді узгоджені між собою, то $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$

для всіх $i, j = \overline{1, m}$. Узгодженість означає, що:

у першому випадку $a_{ij=1}$, $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ для всіх

$i, j = \overline{1, m}$, тобто, якщо об'єкт x^i переважає x^j на $a > 1$, тоді цінність об'єкта x^j становить $\frac{1}{a}$

цінності об'єкта x^i ; у випадку повної

$$\text{узгодженості } A = \begin{pmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_m \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_m \end{pmatrix}.$$

Це означає, що вектор відносної важливості $(w_1, \dots, w_m)^T$ є власним вектором матриці A і відповідає власному числу $\lambda = m$ цієї матриці.

Вищенаведені властивості мають значення для ситуацій, коли відповіді ОЗО будуть містити похибки. Тобто після побудови матриці A визначається така відносна важливість об'єктів, для яких $\lambda_{\max \rightarrow m}$, де m – найбільше власне число матриці A . Чим ближче $\lambda_{\max \rightarrow m}$, тим узгодженішими між собою є відповіді осіб, що здійснюють оцінку.

Етап 3. Скориставшись методом середнього геометричного, наближено обчислюємо вектор відносної важливості $(w_1, \dots, w_m)^T$.

Для встановлення міри узгодженості числових значень парних порівнянь елементів множини слугує вектор пріоритетів матриці, для знаходження якого обчислимо спочатку власний

вектор $W(w_1, w_2, \dots, w_m)$, після чого нормалізуємо його. Компоненти власного вектора – це середнє геометричне елементів кожного рядка матриці парних порівнянь, тобто

$$u_{i=\overline{m}} = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m a_{ij}} = \sqrt[m]{a_{i1} \times a_{i2} \times \dots \times a_{im}}; i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

де a_{ij} – елемент i -го рядка j -го стовпця матриці парних порівнянь елементів множини, m – кількість випадків на одному рівні.

Обчислення відносної важливості об'єктів проводиться за допомогою середнього геометричного елементів кожного з рядків матриці A :

$$w_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^m u_i} = \frac{\sqrt[m]{a_{i1} \times a_{i2} \times \dots \times a_{im}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt[m]{a_{i1} \times a_{i2} \times \dots \times a_{im}}}; i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Етап 4. Оцінимо значення власного числа, якому відповідає обчислений вектор відносної важливості. Для цього знайдемо добуток $A \times w_i$.

Етап 5. Щоб оцінити значення λ_{max} покомпонентно поділимо складові добутку $A \times w_i$ на складові вектора відносної важливості. Одержимо вектор, після чого за наближене значення λ_{max} виберемо середнє арифметичне компонент цього вектора.

Етап 6. Далі обчислюємо індекс узгодженості:

$$J_p = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1}, \quad \dots \quad (3)$$

значення якого порівнюють з еталонними (табл. 2). Якщо $J_p \leq 0,1 J_e$, то результати опитування ОЗО задовільні.

Таблиця 2. Еталонне значення узгодженості залежно від кількості об'єктів, що порівнюються

Table 2. Reference value of consistency depending on the number of compared objects

Кількість об'єктів									0
Еталонне значення індексу, J_e	,58	,90	,12	,24	,32	,41	,45	,49	

Джерело: [14, с. 64]

Етап 7. Глобальні пріоритети властивостей отримуємо в результаті обчислень за формулою

$$U_j = \sum_{i=1}^n w_i \times u'_{ij}; j = 1, \dots, m, \quad (4)$$

де w_i – пріоритет i -го критерію ($i = 1, \dots, n$);

u'_{ij} – відносна вага альтернатив ($j = 1, \dots, m$); щодо кожного критерію ($i = 1, \dots, n$).

Обраний підхід дозволяє ранжувати базові властивості мобільності ВАТ, що, своєю чергою, допоможе виділити ті з них, що є наважливішими зараз для вибору військової техніки. Критерії відбору сформовані на основі чинної законодавчо-нормативної бази, що стосується оборонних закупівель державним коштом [4; 12; 1].

Врахувавши усі наведені вище міркування, спробуємо тепер розв'язати першу задачу: зробити вибір серед базових властивостей мобільності ВАТ за такими технічними критеріями:

;

- *технічний стан*, що охоплює термін експлуатації ВАТ на момент придбання, адже здебільшого йдеться про техніку, що вже експлуатувалася, її пробіг тощо;

- *вартість (ціна)*;

- *технічне обслуговування* в процесі експлуатації, як одна зі складових життєвого циклу технічної системи,

- *відповідність цілям (ефективність)* – фактично йдеться про технічну та бойову спроможність, надійність, стійкість, придатність

до визначених умов експлуатації ВАТ.

Першому завданню відповідає ієрархічна структура, яка містить мету, критерії та альтернативи.

Вершиною домінантної ієрархічної моделі є *мета*, — «Вибір військової автомобільної техніки за базовими властивостями». Другий рівень отриманої ієрархії формують чотири технічних показники (*критерії*): «Технічний стан», «Вартість (ціна)», «Технічне обслуговування», «Відповідність цілям», які уточнюють мету. Останній рівень містить шість базових властивостей (*альтернатив*): «Швидкохідність», «Маневреність», «Керованість», «Прохідність», «Стійкість» і «Автономність», які оцінюють за критеріями другого рівня, інакше кажучи, визначають вагоміший із них для кожного показника (критерію).

Крок 1. Оцінка альтернатив. При порівнянні технічних показників «Технічний стан» і «Вартість (ціна)» ОЗО порівнює їх відносно мети. Для двох об'єктів, які порівнюються між собою, залежно від міри їх впливу на процес, матимемо оцінку важливості, що становить відповідний елемент матриці парних порівнянь у позиції (a_{ij}) . Згідно з обраним методом діагональні елементи матриці дорівнюють одиниці, а нижня її частина заповнюється оберненими значеннями:

$$\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

ОЗО необхідно провести $\frac{n \times (n-1)}{2}$

порівнянь, де n — кількість випадків на одному рівні.

У нашому випадку зроблено шість порівнянь технічних показників відносно мети, що зведені в

матрицю:
$$\begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/3 & 1/7 \\ 4 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 3 & 1 & 1/3 \\ 7 & 5 & 3 & 1 \end{pmatrix}.$$

Крок 2. Порівняння альтернатив. Базові властивості порівнюються відносно кожного з критеріїв побудованої ієрархії. У нашій задачі є тільки один рівень критеріїв, тому проводиться

парне порівняння альтернатив за кожним із чотирьох показників.

Наприклад, при порівнянні альтернатив «Швидкохідність» і «Маневреність» відносно критерію «Технічний стан» ОЗО визначає, яка з базових властивостей більше впливає на «Технічний стан» ВАТ.

Оскільки ієрархія містить шість альтернатив та чотири критерії, необхідно провести $m \times \frac{n \times (n-1)}{2}$, де m — кількість критеріїв, тобто необхідно порівняти 60 пар об'єктів порівняння (базових властивостей). Ці порівняння зведено в табл. 3.

Якість експертних оцінок визначається: точністю, узгодженістю й ефективністю (кількість отриманої інформації). При цьому оцінки значною мірою чутливі до значних чисельних відхилень від відношення узгодженості.

Тепер можемо визначити пріоритети, які представляють відносну важливість або перевагу елементів на кожному рівні ієрархічної моделі. Що більша величина пріоритету, то більш значущим є відповідний елемент.

Крок 3. Синтез пріоритетів. Після формування матриці парних порівнянь технічних показників відносно мети необхідно визначити власний вектор матриці та перевірити узгодженість матриці за її власним числом. Потрібно відзначити, що власний вектор характеризує впорядкування пріоритетів, а власне число є мірою узгодженості оцінок.

Усі ці кроки дають один і той самий власний вектор матриці. Четвертий крок є найточнішим і був застосований для знаходження компонентів власного вектора локальних пріоритетів матриці за формулами (1) і (2):

$$W_1 = \frac{\sqrt[4]{1 \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{7}}}{\sqrt[4]{1 \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{7}} + \sqrt[4]{4 \times 1 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5}} + \sqrt[4]{3 \times 3 \times 1 \times \frac{1}{3}} + \sqrt[4]{7 \times 5 \times 3 \times 1}} = 0,059;$$

$$W_2 = \frac{\sqrt[4]{4 \times 1 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5}}}{\sqrt[4]{1 \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{7}} + \sqrt[4]{4 \times 1 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5}} + \sqrt[4]{3 \times 3 \times 1 \times \frac{1}{3}} + \sqrt[4]{7 \times 5 \times 3 \times 1}} = 0,129;$$

$$W_3 = \frac{\sqrt[4]{3 \times 3 \times 1 \times \frac{1}{3}}}{\sqrt[4]{1 \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{7}} + \sqrt[4]{4 \times 1 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5}} + \sqrt[4]{3 \times 3 \times 1 \times \frac{1}{3}} + \sqrt[4]{7 \times 5 \times 3 \times 1}} = 0,236;$$

$$W_4 = \frac{\sqrt[4]{7 \times 5 \times 3 \times 1}}{\sqrt[4]{1 \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{7}} + \sqrt[4]{4 \times 1 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5}} + \sqrt[4]{3 \times 3 \times 1 \times \frac{1}{3}} + \sqrt[4]{7 \times 5 \times 3 \times 1}} = 0,575.$$

Таблиця 3. Порівняння базових властивостей військової автомобільної техніки відносно технічних показників

Table 3. Comparison of the basic properties of military vehicles in relation to technical indicators

Порівняння відносно	Результати порівнянь
Технічний стан	$\begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 5 & 1 & 7 \\ 3 & 1 & 1 & 3 & 1/3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1 & 1/5 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1 & 1/7 & 1 \\ 1 & 3 & 5 & 7 & 1 & 9 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1 & 1/9 & 1 \end{pmatrix}$
Вартість	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 9 & 3 & 7 & 5 \\ 1 & 1 & 7 & 1 & 5 & 3 \\ 1/9 & 1/7 & 1 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 5 & 1 & 3 & 1 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1/3 & 3 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
Технічне обслуговування	$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 1 & 5 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ 1 & 1/3 & 1 & 3 & 1/3 & 1/5 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1 & 1/7 & 1/9 \\ 1 & 5 & 3 & 7 & 1 & 1 \\ 3 & 7 & 5 & 9 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
Відповідність цілям	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1 & 1/3 & 1/7 & 1/5 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1/5 & 1/9 & 1/7 \\ 1 & 3 & 5 & 1 & 1/3 & 1 \\ 5 & 7 & 9 & 3 & 1 & 1 \\ 3 & 5 & 7 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$

Бачимо, що сума нормалізованих компонентів вектора становить 0,999.

Крок 4. Помножимо матрицю парних порівнянь справа на отриману оцінку вектора та отримаємо новий вектор відносної важливості:

$$A \times W_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1/4 & 1/3 & 1/7 \\ 4 & 1 & 1/3 & 1/5 \\ 3 & 3 & 1 & 1/3 \\ 7 & 5 & 3 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,059 \\ 0,129 \\ 0,236 \\ 0,575 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,252 \\ 0,560 \\ 0,993 \\ 2,345 \end{pmatrix}.$$

Крок 5. Поділимо кожен компонент цього вектора на відповідну компоненту оцінки вектора

пріоритетів і визначимо ще один вектор

$$\begin{pmatrix} 4,272 \\ 4,341 \\ 4,208 \\ 4,079 \end{pmatrix}$$

для знаходження власного значення матриці.

Що ближче λ_{max} до n (число об'єктів порівняння n), то більш узгоджений результат. Максимальне власне значення матриці:

$$\lambda_{max} = \frac{4,272 + 4,341 + 4,208 + 4,079}{4} = 4,225.$$

Крок 6. Відомо, що узгодженість квадратної обернено симетричної матриці еквівалентна вимозі рівності її максимального власного значення λ_{max} з m , тож визначимо індекс узгодженості j_p згідно з (3). У нашому випадку

$$J_p = \frac{4,225 - 4}{4 - 1} = 0,075. \text{ Еталонне значення індексу}$$

J_e для нашого випадку ($m = 4$) дорівнює 0,90 (див. табл. 2).

$$\text{Відношення } \frac{J_p}{J_e} = \frac{0,075}{0,900} = 0,0833 \text{ для}$$

матриці того ж порядку називається відношенням узгодженості.

Обраний метод допускає певний рівень неузгодженості. Для особи, що приймає рішення, найважливішим є відношення узгодженості, оскільки для того, щоб отримати вірогідні результати, потрібно, щоб відношення

узгодженості було в межах 10 % (критичне значення – 20 %). На цей показник слід звертати увагу на кожному подальшому етапі. Якщо цей показник виходить за вказані межі, ОЗО необхідно ще раз повернутися до вихідних умов задачі та перевірити обґрунтованість своїх суджень.

Відношення узгодженості проведеної вище оцінки $\frac{J_p}{J_e} \leq 0,1$, тобто в межах норми.

Усі отримані вище результати внесемо до табл. 4.

Таблиця 4. Результати порівнянь технічних показників військової автомобільної техніки відносно мети

Table 4. Results of the comparisons of the technical indicators of military vehicles in relation to the target

Вектор пріоритетів	Відносна важливість	Частка
0,059	0,252	4,272
0,129	0,560	4,341
0,236	0,993	4,208
0,575	2,345	4,079
Власне значення матриці		4,225
Індекс узгодженості		0,075
Відношення узгодженості		0,083

Джерело: розраховано та складено автором

Тепер згідно з визначеним алгоритмом визначимо відносну вагу альтернатив («Швидкохідність – ШХ», «Маневреність – МВ», «Керованість – КВ», «Прохідність – ПХ», «Стійкість – СТ» і «Автономність – АВ») щодо кожного критерію («Технічний стан – ТС», «Вартість (ціна) – ВО», «Технічне обслуговування – ТО», «Відповідність цілям – ВЦ»).

Обчислимо значення векторів пріоритетів і відносної важливості, власне значення матриці, індекс узгодженості та відношення узгодженості для оцінок, що наведені в табл. 3.

Розрахунки, що були здійснені за вищеписаним алгоритмом, упустимо, а отримані результати занесемо в табл. 1–4.

Крок 7. Синтез пріоритетів. У нашій задачі ранжування базових властивостей мобільності

ВАН, що є найважливішими для вибору військової техніки, на другому рівні ієрархії (критерії) елементи вектора пріоритетів множаться на ваговий коефіцієнт мети. На третьому рівні ієрархії (перелік можливих альтернатив) відносна вага кожної з базових властивостей за порівнюваним критерієм множиться на пріоритет даної якості (критерію), потім отримані добутки додаються. Таким чином отримуємо елементи глобального вектора пріоритетів, на підставі значення якого можна визначити найвагоміші базові властивості мобільності для вибору ВАН.

Для спрощення розрахунків згідно з формулою (4) значення векторів пріоритетів базових властивостей відносно технічних показників, отриманих раніше, зведемо в табл. 5.

Таблиця 5. Відносна вага базових властивостей мобільності військової автомобільної техніки

Table 5. Relative weight of the basic mobility properties of military vehicles

Базові властивості	Вектор пріоритетів базових властивостей відносно технічних показників			
	ТС	ВО	ТО	ВЦ
ШХ	0,227	0,384	0,161	0,093
МВ	0,194	0,267	0,068	0,056
КВ	0,094	0,039	0,078	0,039
ПХ	0,057	0,160	0,039	0,161
СТ	0,388	0,056	0,268	0,384
АВ	0,039	0,093	0,385	0,266

Джерело: розраховано та складено автором

Відповідно до (4) маємо таку систему рівнянь для обчислення ваг усіх базових властивостей мобільності ВАН, підставивши відповідні значення з табл. 3 і 4 в систему рівнянь (5), отримуємо наступні значення ваг базових властивостей мобільності, що оцінювалися (перше завдання):

$$\begin{aligned}
 U_1 &= w_1 \times u_{11} + w_2 \times u_{21} + w_3 \times u_{31} + w_4 \times u_{41} = 0,155; \\
 U_2 &= w_1 \times u_{12} + w_2 \times u_{22} + w_3 \times u_{32} + w_4 \times u_{42} = 0,094; \\
 U_3 &= w_1 \times u_{13} + w_2 \times u_{23} + w_3 \times u_{33} + w_4 \times u_{43} = 0,051; \\
 U_4 &= w_1 \times u_{14} + w_2 \times u_{24} + w_3 \times u_{34} + w_4 \times u_{44} = 0,125; \\
 U_5 &= w_1 \times u_{15} + w_2 \times u_{25} + w_3 \times u_{35} + w_4 \times u_{45} = 0,316; \\
 U_6 &= w_1 \times u_{16} + w_2 \times u_{26} + w_3 \times u_{36} + w_4 \times u_{46} = 0,258;
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Отримані результати дозволяють нам побачити ієрархію базових властивостей мобільності ВАТ, вагомішими з яких є «Стійкість» (0,316), «Автономність» (0,258) і «Швидкохідність» (0,155) тощо.

Висновки. При розв'язанні задачі були отримані результати, які визначили основні технічні показники (стійкість, автономність і швидкохідність) для ВАТ, що практично підтверджуються при використанні військової колісної техніки на сучасному полі бою і дають змогу підвищити живучість екіпажу і самого транспортного засобу. У майбутньому ці методи можна використати для різного типу машин при оперативній оцінці впливу показників з мобільності на транспортний засіб.

Бібліографічний список

- Бадюл М. Г., Крамаренко В. А. Застосування методу аналізу ієрархій у проектуванні та будівництві. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2013. Вип. 70. С. 27–35.
- Деякі питання здійснення оборонних закупівель на період дії правового режиму воєнного стану: Постанова Кабінету Міністрів України від 11.11.2022 р. № 1275 (дата звернення: 18.07.2023). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1275-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 01.09.2023).
- Екологізація суспільства: Соціальна роль та моделювання / Е. П. Семенюк, Т. В. Олянишен, В. М. Сеньківський, О. В. Мельников, Я. В. Котляревський. Львів: Укр. акад. друкарства, 2012. 460 с.
- Кульчицька Х. Б., Предко Л. С. Застосування методу аналізу ієрархій при виборі проекту в поліграфії. *Поліграфія і видавнича справа*. 2018. № 1. С. 51–60.
- Мельников О. В., Котляревський Я. В. Підвищення ефективності природоохоронної діяльності в поліграфії. *Наукові записки* [Укр. акад. друкарства]. 2014. № 1–2 (46–47). С. 104–111.
- Питання оборонних закупівель: Постанова Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 р. № 363 (ост. зміни 16.05.2023). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/363-2021-%D0%BF#n204> (дата звернення: 01.09.2023).
- Про оборонні закупівлі: Закон України від 17.07.2020 р. № 808-IX (ост. зміни 24.02.2023). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/808-20#n414> (дата звернення: 01.09.2023).
- Трунова О. В. Застосування методу Сааті при прийнятті управлінських рішень. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Сер. Педагогічні науки*. 2013. Вип. 108.1. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VchdpuP_2013_1_108_34 (дата звернення: 01.09.2023).
- Agro-Food Value Added Chains: Methodology, Technique and Architecture / G. Ryzhakova, S. Petrukha, N. Petrukha, O. Krupelnyska, O. Hudenko. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. 2022. Vol. 4, No 45. P. 385–395.
- Arndt K., Cormier K., Ryazanov E. Value Chain Management and Overcoming Rural Poverty. Project Experience in Kyrgyzstan. Bishkek: Local Market Development, 2005. 50 p.
- Modeling the Effects of Key Threats on the Economic Security of Industrial Enterprises / S. Shynkar, B. Brynzei, N. Rozumovych, M. Kurliak. *SHS Web Conf*. 2019. Vol. 67. URL: https://www.shs-conferences.org/articles/shsconf/abs/2019/08/shsconf_NTI-UkrSURT2019_04010/shsconf_NTI-UkrSURT2019_04010.html (дата звернення: 01.09.2023).
- Saaty T. L. How to make and justify a decision: the analytic hierarchy process. Part 1: Examples and Applications. *Systems Research and Information Technology*. 2002. № 1. P. 95–108.
- Saaty T. L. Theory of the Analytic Hierarchy Process. Part 2.1. *Systems Research and Information Technology*. 2003. № 1. P. 48–71.
- Saaty T. L. Theory of the Analytic Hierarchy Process. Part 2.1. *Systems Research and Information Technology*. 2003. № 1. P. 56–64.
- Saaty T. L. Theory Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes-Examples. Part 2.2. *System research and information technologies*. 2003. № 2. P. 7–33.
- Saaty T. L. The Analytic Network Process. Examples. Part 2.3. *System research and information technologies*. 2003. № 4. P. 7–23.

Стаття надійшла 20.08.2023

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПІДВІСКИ ПОВНОПРИВІДНОГО АВТОМОБІЛЯ ДЛЯ БЕЗДОРІЖЖЯ

**Михайло Манзяк¹, Віталій Хома², Михайло Грубель¹, д. т. н.,
Любомир Крайник², д. т. н., Ярослав Сало³**

¹ *Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного,
вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, Україна,*

e-mail: [e-mail: Manziakdoc@gmail.com](mailto:Manziakdoc@gmail.com), m.g.grybel@gmail.com

² *Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,*

e-mail: homa.v@hotmail.com, l.krainyk@gmail.com

³ *Львівська філія УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого,
вул. Л. Мартовича, 15, смт Магерів, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
lfilia@ukr.net*

Манзяк М., Хома В., Грубель М., Крайник Л., Сало Я. Оцінка ефективності підвіски повнопривідного автомобіля для бездоріжжя

Умови збройних конфліктів, зокрема російсько-української війни, виявили особливу потребу в забезпеченні високої мобільності військової автомобільної техніки (ВАТ) протягом останніх десяти років. Очевидно, що це також зумовлює зростання вимог до конструкцій автотехніки в умовах бездоріжжя – насамперед щодо підвіски. Проаналізовано вплив характеристик підвіски та шин на обмеження максимально можливих швидкостей руху бездоріжжям. Обмеження максимальних швидкостей руху формується залежно від гранично допустимих значень рівня віброколивних навантажень на водія та екіпаж, збурених нерівностями, мікропрофілем бездоріжжя та відповідними передавальними функціями підвіски й шин.

Стаття присвячена визначенню впливу ходу підвіски на швидкість руху високомобільної багатоцільової колісної транспортної машини на прикладі наявних в ЗС України американських HMMWV. Для цього були використані характеристики підвіски, шин та коливної системи транспортного засобу. Результати оцінки вертикальних вібропришвидшень показали, що більший хід підвіски дозволяє уникнути пробою підвіски в діапазоні швидкостей 10-60 км/год і формує відповідну мобільність руху та ресурс роботи підвіски в умовах бездоріжжя. У результаті дослідження отримано рекомендації щодо необхідних значень амплітуди/ходу підвіски з умов забезпечення необхідної мобільності колісної автотехніки. Представлена методика оцінки ефективності підвіски при проїзді перешкоди дозволяє кількісно оцінити максимальну швидкість руху з урахуванням кінематики конкретних конструкцій. Це є важливим на етапі проектування та формування відповідної законодавчої нормативної бази, зокрема для важкої автотехніки.

Ключові слова: пробій підвіски, вертикальні вібропришвидшення, колісна військова автомобільна техніка, імітаційна модель, опорна поверхня, пружно-демпфуюча характеристика.

Manziak M., Khoma V., Hrubel M., Krainyk L., Salo Ya. Evaluation of the off-road suspension efficiency for all-wheel-drive vehicles

Armed conflicts, especially the Russian-Ukrainian war, have emphasized the importance of high mobility for military vehicles. This requirement increases the need for off-road vehicle designs, especially regarding suspension systems. The maximum speed limitations are determined based on the vibration loads experienced by the driver and crew, caused by irregularities, micro-profile of the terrain, and the respective transmission functions of the suspension and tires.

This article focuses on determining the influence of suspension travel on the speed of movement for a highly mobile multi-purpose wheeled transport vehicle, using the American HMMWV vehicles as an example, which are currently used by the Ukrainian Armed Forces. The study took into account the suspension characteristics, tire properties, and oscillation system of the vehicle. Results show that a larger suspension travel avoids suspension failure within the speed range of 10-60 km/h and provides the necessary mobility and operational lifespan of the suspension system in off-road conditions. The study also obtained recommendations concerning the required values of suspension travel to ensure the necessary mobility of wheeled vehicles, which is crucial during the design phase and the establishment of corresponding legislative regulations, particularly for heavy automotive vehicles. The methodology presented for evaluating suspension efficiency during obstacle traversal allows for quantitatively assessing the maximum speed with consideration of the kinematics of specific vehicle designs.

Key words: suspension failure, vertical vibration accelerations, military wheeled vehicles, simulation model, support surface, elastic-damping characteristics.

Постановка проблеми. Максимальні швидкості руху бездоріжжям, насамперед сухим або з малим вмістом вологи, обмежуються не тільки тяговошвидкісними характеристиками

сучасної автотехніки, але насамперед досягненням граничних, дискомфортних для організму водія/екіпажу віброколивних навантажень. Особлива проблема виникає під час руху автомобілів бездоріжжям за умов виникнення так званого пробою підвіски, що внаслідок фактично жорсткого механічного сполучення кузова автомобіля і нерівностей опорної поверхні зумовлює різке, практично на порядок ударне збільшення навантажень на водія/екіпаж. Для військової автотехніки (ВАТ) додатково це ще і зрив прицільності ведення вогню під час руху.

Власне пробій підвіски є критичним оціночним показником ефективності підвіски автомобіля в умовах бездоріжжя. Виробники військових автомобілів у процесі поточного переходу на наступне покоління машин вже активно працюють над впровадженням незалежних довгоходових підвісок на нових моделях, що дозволяє знизити невідповідності маси та вібронавантаження кузова та екіпажу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За умов руху бездоріжжям реального театру бойових дій основним обмежувальним чинником швидкості руху є гранично допустимі порогові значення віброколивних навантажень. Оцінці останніх у взаємозв'язку з характеристиками підвіски автомобілів загального призначення та мікропрофілем доріг присвячено низку досліджень [1; 4; 5], в основу яких покладено граничні, порогові рівні віброколивних навантажень згідно з міжнародним добровільним стандартом ISO [11]. Однак щодо руху бездоріжжям слід констатувати недостатню увагу цьому питанню у вітчизняних роботах (що частково пояснюється як відсутністю відповідних вимог у військових стандартах щодо ВАТ як колишнього СРСР, так і сучасної РФ та відсутністю національних ДСТУ В щодо ВАТ [2]). За результатами досліджень можна стверджувати, що віброколивні навантаження, окрім втрати і відчутного зниження фізичної активності екіпажу, також мають суттєвий вплив на ефективність ведення бойових дій. Зокрема, точність ведення вогню, імовірність ураження цілей після 6-8 годин віброколивних навантажень під час руху бездоріжжям знижується у 2-2,3 рази порівняно зі свіжим екіпажем.

Значення повного ходу підвісок повнопривідних автомобілів, переважно ресорних, залежного типу, що складають основу сучасного парку ВАТ ЗСУ, здебільшого в межах 170-270 мм (зрештою, як волонтерських джипів-кросоверів загального призначення, що наразі є основою поповнення автопарку). Поряд з тим на військових НММВВ М917, та й його наступнику Oshkosh L-ATV значення повних ходів

(амплітуди) підвіски коливаються відповідно в межах 325-420 мм [6].

Величина ходу підвіски під час руху бездоріжжям впливає на вірогідність та частоту виникнення «пробойів» підвіски і передачу пікових вертикальних навантажень на кузов автомобіля. Відповідно як при розробці/поставках відповідної автотехніки, так і при формуванні національного ДСТУ В щодо ВАТ необхідно звернути увагу та нормувати цей параметр, очевидно з розмежуванням вимог щодо машин переднього краю та машин тилового транспорту, що експлуатуються переважно на автодорогах з твердим покриттям.

Хід підвіски колісної військової автомобільної техніки значно впливає на середню швидкість руху військових та виконання бойового завдання в умовах бездоріжжя. За даними зарубіжних досліджень, перехід на незалежну підвіску дозволяє збільшити комфортність і середню швидкість руху на 50-70 % [2]. Середні швидкості руху колони ВАТ бездоріжжям в арміях НАТО вищі порівняно з пострадянськими державами, з Україною включно. Отже, для успішного виконання бойового завдання потрібно мати автомобільну техніку з підвіскою, яка забезпечує максимальну ефективність ведення бойових дій на бездоріжжі.

Постановка завдання. Завданням дослідження є опрацювання в середовищі MATLAB Simulink імітаційної моделі проїзду зразка повнопривідної ВАТ через дискретну перешкоду типу "лежачий поліцейський". Моделювання проводиться з метою відтворення процесу роботи незалежної підвіски з точки зору пробою підвіски та його впливу на середню швидкість руху. Також метою роботи є обґрунтування необхідного значення ходу підвіски з метою запобігання пробою при русі ВАТ в типових умовах бездоріжжя.

Виклад основного матеріалу. Базовою проблемою оцінки відповідності характеристик автомобілів для бездоріжжя є власне велика різноманітність та нестабільність опорних поверхонь для проведення експериментальних досліджень відповідності необхідним вимогам. Переважно для оцінки характеристик підвіски у практиці країн НАТО для цього використовують штучні стандартизовані тверді поверхні типу «бельгійська бруківка» – щодо оцінки віброколивних навантажень та максимально можливих швидкостей руху в цих умовах [2]. Щодо нещодавніх нових вимог, насамперед в армії США щодо амплітуди ходу підвіски колісної ВАТ понад 400мм, то оцінка базується на експериментальному замірі цього параметра в статичі [6], що, однак, не дає оцінки ефективності підвіски в плані оцінки відповідних віброколивних

навантажень на кузов, екіпаж та насіння підвіскою коливань кузова при проїзді граничної з умов пробою перешкоди. З врахуванням методології закордонних досліджень ефективності підвіски ВАТ [9] відповідно до поставлених завдань створена на попередніх етапах дослідження імітаційна модель [3] потребує незначних змін. Зміни полягають у доробці підсистеми обмеження ходу та заданні пружно-демпфуючих характеристик буфера у крайніх положеннях підвіски. За аналогією з оцінкою ефективності роботи підвіски автомобілів загального призначення у ролі випробувального бар'єру обрано стандартизовану для автодоріг перешкоду – так званий пристрій для обмеження швидкості руху – «лежачий поліцейський». Оскільки нормативно «лежачий поліцейський» має висоту 50 мм, а хід підвіски переважної більшості сучасних закордонних зразків ВАТ становить 300 – 400 мм, то пробою підвіски не відбуватиметься, з іншої сторони

перепади висот на бездоріжжі сягають до 400 мм [4], тому виходячи з цього цілком логічно промоделювати пристрій «лежачий поліцейський» із збільшеною до 150 мм висотою.

У всьому іншому структура моделі залишається без змін і базується на аналізі публікацій за вказаною тематикою та сформована з таких етапів:

- задання дискретної перешкоди типу «лежачий поліцейський» відповідно до ДСТУ 4123:2006 [7];
- задання технічних характеристик автомобіля та параметрів підвіски;
- розрахунок вертикальних та поздовжніх коливань кузова автомобіля при русі з заданою швидкістю;
- визначення максимально можливої швидкості проїзду через перешкоду без досягання пробою підвіски.

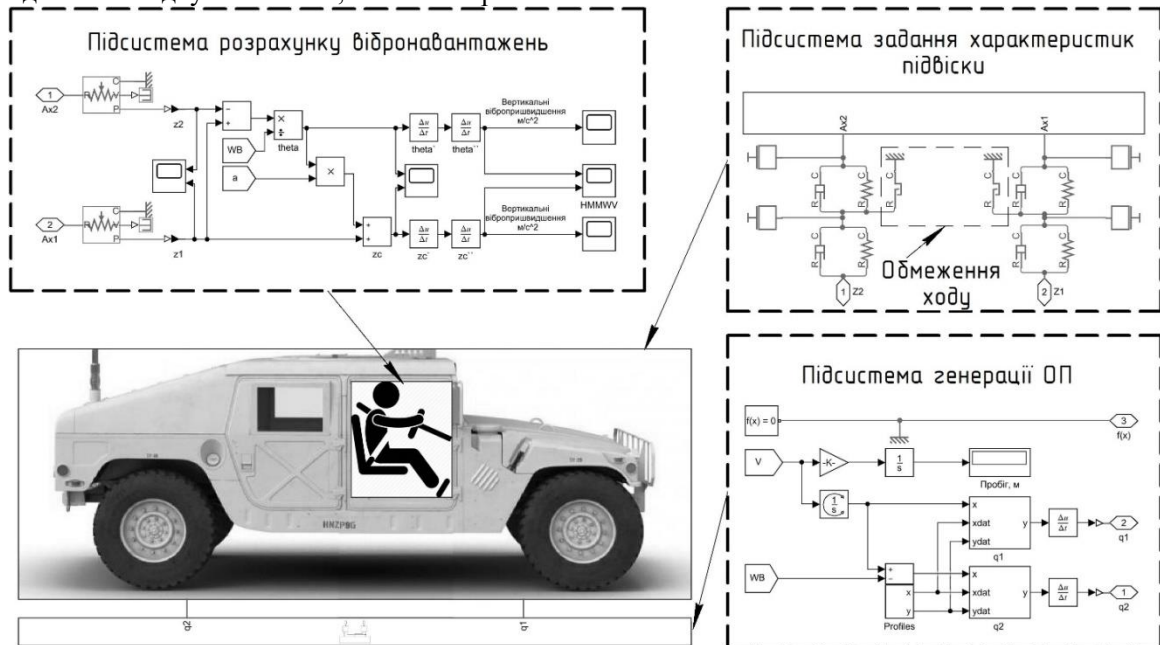


Рис. 1. Блок-схема моделі проїзду зразка колісної ВАТ через дискретну перешкоду
Fig. 1. Block diagram of a model of passage of a wheeled MV sample through a discrete obstacle

За прототип обрано зразок ВАТ, який широко використовують у підрозділах ЗС України і який фігурує в багатьох наукових дослідженнях [2; 6; 8–10], а саме високомобільний багатоцільовий колісний транспортний засіб НММВВ (англ. *the High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle*). З іншого боку, модифікації НММВВ комплектувалися різними незалежними підвісками, що при ідентичності решти технічних характеристик дає змогу виокремити вплив ходу підвіски на швидкість руху.

Для цього використано характеристики підвіски, шин та в загальному коливної системи, що впливають на забезпечення плавності руху зазначеного зразка. Для цього опрацьовано публі-

кації [8–10], де досліджувалася модифікація НММВВ масою 2000 кг, обладнана незалежною підвіскою ТАК-4 виробництва Oshkosh Corporation з ходом підвіски до 355 мм (модифікація М1114) та незалежною підвіскою з ходом до 228 мм (модифікація М998). Вихідна модель базується на основі технічних характеристик, що наведені в таблиці.

Усі розміри, які необхідні для відтворення кривизни профілю «лежачого поліцейського» взяті з ДСТУ 4123:2006 «Пристрій примусового зниження швидкості дорожньо-транспортної техніки на вулицях і дорогах» [7] та збільшені втричі, отриманий таким чином мікропрофіль перешкоди наведено на рис.2.

Таблиця. Короткі технічні характеристики HMMWV [8]

Table. Brief technical specifications of HMMWV [8]

Параметр	Значення	
	Передня вісь	Задня вісь
Споряджена маса, кг	2000	
Підресорена маса, кг	950	800
Непідресорена маса, кг	125	125
Сумарна жорсткість підвіски, Н/м	150 000	150 000
Сумарне демпфування амортизаторів, Н*с/м	30 000	30 000
Хід підвіски, м	0,355 (0,228)	0,355 (0,228)
Сумарна жорсткість шин, Н/м	400 000	400 000
Віддаль до центру мас, м	1,07	2,23
Колісна база, м	3,3	
Момент інерції кузова, кг*м ²	4332	

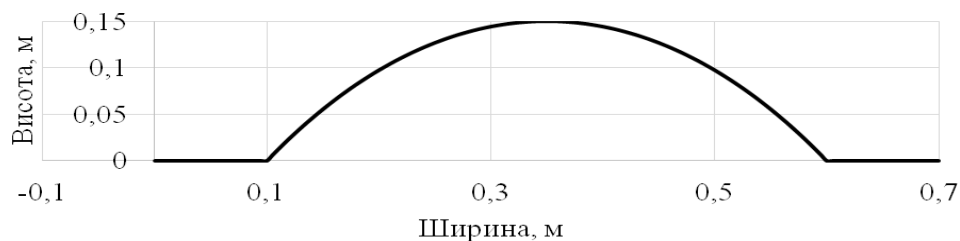


Рис. 2. Поперечний профіль перешкоди збільшеної висоти типу «лежачий поліцейський»

Fig. 2. The transverse profile of the obstacle of increased height of the «speed bumps» type

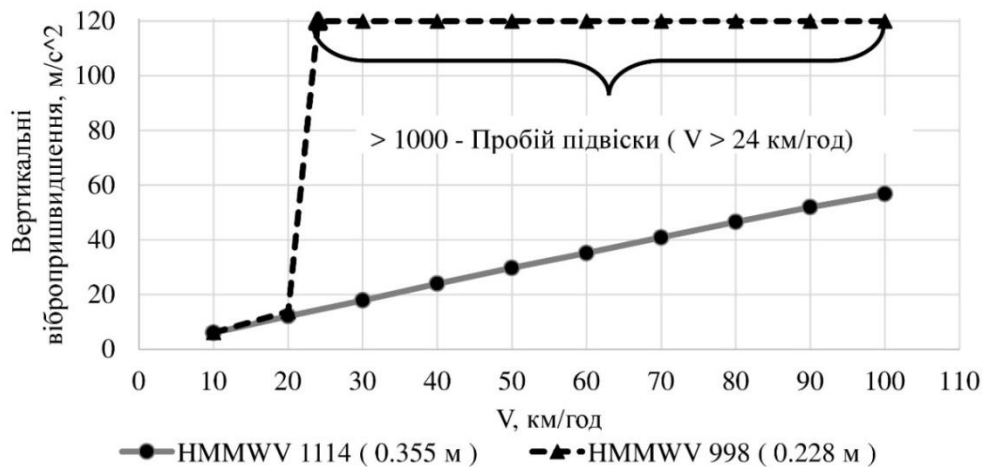


Рис. 3. Вібропришвидження при проїзді HMMWV через «лежачий поліцейський» висотою 150 мм

Fig. 3. Vibration acceleration when HMMWV passes through speed bumps 150 mm high

На рис. 3 наведено результати оцінки вертикальних вібропришвиджень при проїзді HMMWV M1114 та HMMWV M998 через дискретну перешкоду висотою 150 мм. Відповідно до завдання дослідження з метою якісної оцінки отриманих у процесі моделювання результатів (див. рис. 3) варто відзначити, що більший хід підвіски дозволяє уникати пробою підвіски в діапазоні швидкостей 10 – 60 км/год в той час, коли при малому ході підвіски пробій виникає вже на малих швидкостях – 24 км/год, а отже, цей технічний параметр поряд з показниками плавності формує середню швидкість руху. (Водії звично знижують швидкість руху до порогових значень

уникнення пробою підвіски, що власне, є одним із чинників поточного процесу розробок та появи нових моделей ВАТ в усіх вагових категоріях з суттєво збільшеними амплітудами ходу підвісок). Достатня адекватність вищепрацьованої моделі руху в програмному середовищі MATLAB Simulink з результатами експериментальних досліджень на автодорогах тарейальному бездоріжжі [3; 5] дозволяє констатувати очевидну доцільність використання запропонованої схеми випробувань оцінки ефективності підвісок. Очевидно, що для впровадження її у нормативну базу оцінки доцільні ще подальші експериментальні дослідження як щодо інших моделей автомобілів, так і узага

льнення взаємозв'язку отриманих спектрів віброколивних навантажень, отриманих під час цього тесту, з навантаженнями під час руху типовими видами бездоріжжя.

Висновки. З появою незалежної довгоходової підвіски Timoney для військової автотехніки для бездоріжжя та відповідного підвищення швидкостей руху в цих умовах, купівлі ліцензій Timoney основними виробниками ВАТ – Oshkosh та інших, у т. ч. КамАЗ – модель КамАЗ 43502, що вже як шасі легкоброньованих машин з'явилися на фронті, власних аналогічних розробок інших виробників, стала очевидною тенденція переходу нового покоління цієї автотехніки на підвіски даної схеми.

Реалії неминучого оновлення застарілого автопарку ЗС України, зрештою і повнопривідної автотехніки в аграрній та лісгосподарській сферах, зумовлюють очевидну актуальність відповідних вітчизняних розробок.

Вищевикладена методика оцінки ефективності підвіски при проїзді одиничних регламентованих перешкод на автодорозі І категорії дозволяє кількісно оцінити максимальну швидкість руху з умов кінематики конкретних конструкцій підвіски, що є значимим як на етапі проєктних робіт, так і при формуванні відповідної законодавчої нормативної бази, насамперед щодо ВАТ, та випробувань щодо оцінки ефективності підвіски. Стабільність характеристик опорної поверхні у цьому випадку дозволяє достатньо коректну і порівняльну оцінку як різних конструкцій підвіски однотипних машин, так і різних автомобілів. Звично, що використання як випробувальної дільниці так званої «бельгійської бруківки», прийнятої в більшості армій НАТО для оцінки ефективності підвісок в умовах бездоріжжя, дає більш повну картину щодо рівня віброколивних навантажень і необхідність побудови такої ділянки в Україні очевидна. Однак остання не дозволяє дати оцінку дискомфорту пробою підвіски і, відповідно, ефективності так званих довгоходових підвісок з збільшенням амплітуди ходу до 400-440 мм, що стали характерними віднедавна для нової генерації ВАТ, як один з визначальних чинників підвищення мобільності – середніх швидкостей руху бездоріжжям. Нестабільність мікропрофілю та фізико-механічних характеристик останнього фактично унемо

жливлює як коректну кількісну оцінку відповідності вібронанвантажень певним нормативним пороговим значенням, так і порівняльний аналіз різних конструкцій.

Бібліографічний список

1. Бур'ян М. В. Плавність руху автобусів у взаємозв'язку з характеристиками підвіски та сидіння: дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2020. 151 с.
2. Грубель М. Г., Крайник Л. В. Прохідність військових автомобілів: монографія. Київ, Професіонал, 2023. 182 с.
3. Грубель М. Г., Манзяк М. О., Хома В. В., Ланець О. В., Андрієнко А. М. Імітаційне моделювання мобільності колісної військової автомобільної техніки за умов руху бездоріжжям. *Науково-технічний збірник*. Львів, 2023. №28(2023). С. 27-35.
4. Колебания в транспортных машинах: монография / Е. Е. Александров и др.; ред. Е.Е. Александров. Київ: ВІПОЛ, 1996. 256 с.
5. Крайник Л. В., Бурян М. В., Ланець О. В., Кохан В. Ф. Плавність руху як основа комфортності автомобілів: формування нормативної бази «vehicle road comfort». *Автошляховик України*. 2022. № 3. С. 2-8.
6. Манзяк М. О., Крайник Л. В., Грубель М. Г. Тенденції розвитку конструкцій підвісок військових автомобілів. *Системи озброєння та військової техніки*. 2022. № 1 (65). С. 27-35.
7. Пристрій примусового зниження швидкості дорожньо-транспортної техніки на вулицях і дорогах: ДСТУ 4123:2006. [Чинний від 2006-02-03]. Київ: Держстандарт України, 2006. 6 с. (Національний стандарт України). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25486 (дата звернення: 02.05.2023).
8. Advanced Suspension and Control Algorithm for U.S. Army Ground Vehicles. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA580948.pdf> 2331 (Last accessed: 02.05.2023).
9. Fedaravicus A. et al. Dynamics Study of the carrier HMMWV M1151. *Vibroengineering*. 2013. Vol. 15. P. 1619-1626.
10. Improvement on ride and handling performance in HMMWV suspension control using dual acting semi-active suspension system. *10th Asian Control Conference (ASCC)*. 2015. doi:10.1109/ASCC.2015.7244474 (дата звернення: 02.05.2023).
11. ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements, 1997. 36 p. URL: <https://www.iso.org/standard/7612.html> (дата звернення: 02.05.2023).

Стаття надійшла 18.05.2023

УДК 631.362.7

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЕРНА В УСТАНОВКАХ З РАДІАЛЬНОЮ ПОДАЧЕЮ ПОВІТРЯ

Борис Котов¹, д. т. н., Роман Калініченко², к. т. н., Сергій Степаненко³, д. т. н.,
Юрій Панцир¹, к. т. н.

¹ЗВО «Подільський державний університет»,
вул. Шевченка, 13, м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., Україна
e-mail: panziruriy@gmail.com

²ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут»,
вул. Шевченка, 10, м. Ніжин, Чернігівська обл., Україна
e-mail: rkalinichenko@ukr.net

³Інститут механіки та автоматики АПВ,
вул. Вокзальна, 11, смт Глеваха, Київська обл., Україна,
e-mail: Stepanenko_s@ukr.net

Котов Б., Калініченко Р., Степаненко С., Панцир Ю. Математичне моделювання процесу охолодження зерна в установках з радіальною подачею повітря

Необхідність створення або вдосконалення існуючих установок для охолодження зерна після сушіння, які функціонують окремо від зернової сушарки (виносні охолоджувач зерна) на сьогодні зумовлена вимогами підвищення продуктивності сушарок у господарствах (за рахунок використання охолоджувальних камер як сушильних) та появою в господарствах зерносушарок, агрегованих з топками на твердому паливі, які працюють при періодичному завантаженні. Одним із шляхів розв'язання задач створення виносних охолоджувачів зерна після сушіння є використання вентиляованих бункерів з радіальним розподілом зовнішнього атмосферного повітря для охолодження зерна. Для їх ефективного використання й узгодження продуктивності охолоджувача та сушарки необхідно вивчити закономірності перебігу процесу теплообміну в нестационарному режимі і визначити оптимальні конструктивні і режимні параметри. Такі дослідження доцільно проводити на основі створення математичних моделей нестационарних теплових процесів при охолодженні нагрітого і висушеного зерна. У роботі побудовано математичну модель процесу охолодження зерна в бункерних установках з радіальною повітряною роздачею за схемою дворівневої ієрархії: модель мікрокінетики і макрокінетики охолодження зерна. На рівні мікрокінетики використано рівняння нестационарної теплопровідності зернівки (або елемента шару зерна) з негативним джерелом теплоти з граничними умовами конвективного теплообміну. На другому рівні модель охолодження зерна представлена диференціальним рівнянням теплообміну кільцевого зерна з радіально рухомим охолоджувальним повітрям. Розв'язок рівняння реалізовано в комп'ютерному середовищі Mathematica, для двох варіантів руху повітря: від центру бункера до зовнішньої поверхні і в протилежному напрямі. Результати розрахунків графічно проілюстровані. Встановлено, що нерівномірність розподілу температури зерна за радіальною координатою в стадії завершення процесу при фільтрації шару зерна повітрям від зовнішнього циліндра до внутрішнього менша на 20-30 %, ніж при фільтрації повітря у зворотному напрямі.

Ключові слова: зерно, охолодження, теплообмін, повітря, бункер, радіальний рух повітря.

Kotov B., Kalinichenko R., Stepanenko S., Pantzyr Yu. Mathematical modeling of grain cooling in bunker systems with radial air distribution

The need to create or improve the existing grain cooling systems after drying, which operate separately from grain dryers (portable grain coolers), is currently caused by the requirements to increase the efficiency of dryers on farms (by using cooling chambers as drying units) and the emergence of integrated grain dryers with solid fuel furnaces that operate with periodic loading. One way to address the challenges of creating portable grain coolers after drying is to utilize ventilated bunkers with radial distribution of external atmospheric air for grain cooling. To ensure their effective operation and to align the productivity of the cooler with that of the dryer, it is essential to study the patterns of heat exchange in non-steady-state conditions and determine optimal structural and operational parameters. Such research is best conducted by developing mathematical models of non-steady-state thermal processes during the cooling of heated and dried grain. The present work proposes a developed mathematical model of the grain cooling process in bunker systems with radial air distribution based on a two-level hierarchy: microkinetics and macrokinetics of grain cooling.

At the microkinetics level, the equation of non-steady-state heat conduction for a grain particle (or a grain layer element) with a negative heat source is employed, along with the boundary conditions for convective heat exchange. At the second level, the grain cooling model is represented by a differential equation for heat exchange of a ring-shaped grain

element with radially moving cooling air. The solution to this equation is implemented in the Mathematica computer environment for two airflow scenarios: from the center of the bunker to the outer surface and in the opposite direction. The results of the calculations are graphically illustrated. It has been determined that the temperature non-uniformity of grain along the radial coordinate of the layer during the final stage of the process, with air filtration from the external cylinder to the central one, is 20-30 % lower than when air filtration is carried out in the reverse direction.

Key words: grain, cooling, heat exchange, air, bunker, radial airflow.

Постановка проблеми. На сьогодні сушильний парк господарств – виробників зерна представлено переважно шахтними зерносушарками різноманітних конструкцій [7; 11]. Як показала практика експлуатації [11], шахтні зерносушарки, внаслідок певних конструктивних недоліків, не забезпечують необхідного нормованого ефекту охолодження висушеного зерна. Конструктивні недоліки шахтних охолоджувачів з повіторозподільними коробами, які є продовженням сушильних камер зерносушарки, зумовлені прагненням універсальності конструктивних елементів – блоків, з яких складаються зерносушарки, що притаманні всім навіть модернізованим конструкціям.

Це пояснюється тим, що дослідження останніх років у галузі зерносушіння були спрямовані, переважно, на інтенсифікацію процесу сушіння. Важливому процесу охолодження висушеного зерна не було приділено належної уваги дослідниками. Поява останніми роками в господарствах зерносушильної техніки, яка агрегатована топковими пристроями, що працюють на твердому паливі (рослинні рештки, солома, деревні пелети тощо), висунула нові вимоги до проблеми охолодження висушеного зерна. Як правило, зерносушарки бункерного, колонкового або шахтного типів незначної продуктивності функціонують у режимі періодичного завантаження, а топкові установки працюють у безперервному режимі. Звідси виникає потреба створення виносних (позасушильних) охолоджувачів просушеного зерна.

Найпростішою конструкцією реалізації охолоджувача зернового матеріалу є колонкова установка з радіальним розподілом охолоджувального повітря в кільцево-циліндричному шарі зерна. Особливістю такої конструкції є зміна швидкості фільтрувального повітря: зменшення швидкості повітря при русі від внутрішнього циліндра до зовнішнього або збільшення швидкості при русі в зворотному напрямі. Це ускладнює розрахунки нестационарного теплообміну охолоджувального повітря із зерном. На сьогодні відсутні методики визначення раціональних (оптимальних) режимів охолодження зерна примусовою фільтрацією повітря крізь кільцевий шар зерна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Охолодження висушеного зерна є обов'язковою, нормованою інструкцією [4] операцією, яка давно застосовується разом з процесом сушіння. Дослідження обладнання для охоло-

дження зерна досить детально висвітлене у відомих працях [1; 7; 11] і публікаціях [2; 3; 13–15].

Вивчення закономірностей охолодження зерна повітряними потоками, зокрема у щільному рухомому та нерухомому шарі [10; 12], у псевдозрідженому шарі [9] методами наближених розрахунків є доволі поширеним, однак вони не відтворюють реальної картини динаміки комплексної зміни всіх показників і параметрів процесу.

Поряд з методами досліджень у працях, що перелічені вище, застосовуються методи числового моделювання з використанням комп'ютерних середовищ Mathcad [16] і Matlab [8].

Доробком авторів цієї праці є ряд узагальнених існуючих та розроблених математичних моделей процесів охолодження рослинної сировини [7; 11], а також метод ідентифікації математичних моделей за даними прямих експериментів [5; 6].

Однак вищезгадані прикладні комп'ютерні програми не надають можливості точних розв'язків диференціальних рівнянь у частинних похідних. Тому виникає потреба у створенні й аналізі більш точного математичного опису динаміки теплових процесів в охолоджувальних установках, які більш детально враховуватимуть особливості динамічних процесів.

Постановка завдання. Побудова математичної моделі нестационарного теплообміну в процесі охолодження зерна при змінних в часі та за координатами основних режимних параметрах процесу та її ідентифікація за даними експериментальних досліджень з метою розробки практичних рекомендацій з визначення раціональних режимних і конструктивних параметрів бункерно-колонкових охолоджувачів зерна.

Виклад основного матеріалу. При складанні математичного опису використовувалась методологія побудови багато- (дво-) рівневої математичної моделі охолодження зерна в рухомому циліндричному шарі матеріалу (з кільцевим поперечним перетином) за використання двоступеневої ідентифікації параметрів. На першому етапі формулюється модель елементарного шару (моношару) зерна або однієї зернівки, на другому етапі-макрорівні складається двовимірна математична модель стаціонарного теплообміну в гравітаційно -рухомому кільцево-циліндричному шарі зерна при його охолодженні фільтрацією повітря в радіальному напрямі.

При формулюванні математичних моделей прийнято такі спрощення та припущення:

1. Зерновий матеріал переміщується (гравітаційно) зверху донизу рівномірним потоком повітря в радіальному напрямі рівномірно в поперечному перетині, змінюючи швидкість у напрямі руху.

2. Зернівки мають кулясту форму з еквівалентним діаметром d_e та коефіцієнтом форми ψ .

3. У зернівці діє негативне джерело теплоти, що моделює випаровування залишкової вологи (з постійною швидкістю).

$$\frac{\partial[r\theta(r,\tau)]}{\partial\tau} = a_{ef} \frac{\partial^2[r\theta(r,\tau)]}{\partial r^2} - \frac{q_V r}{c \cdot \rho}, \quad (0 < r < R);$$

(1)

з крайовими умовами:

$$-\frac{\partial\theta(R,\tau)}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda}(\theta(R,\tau) - t_c) = 0;$$

$$\theta(r, 0) = \theta_0; \frac{\partial\theta(0,\tau)}{\partial r} = 0; \theta(0,\tau) \neq 0,$$

де θ, t_c – температура зерна та охолоджувального повітря; R, r – радіус зернівки та поточний радіус зернівки; q_V – об'ємне внутрішнє негативне джерело енергії; a_{ef} – ефективний коефіцієнт температуропровідності; c – питома теплоємність зерна; ρ – густина зерна; α, λ – коефіцієнти теплообміну та теплопровідності зерна; τ – поточний час; ε – критерій фазового переходу.

Розв'язок рівняння (1) з крайовими умовами (2) відомий [11]:

$$\theta_0 - \theta(r, \tau) = (\theta_0 - t_c) \left[1 + \frac{Po}{6} \left(1 + \frac{2}{Bi} - \frac{r^2}{R^2} \right) \right] -$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a_{ef}}{R} \tau \right) \right],$$

(3)

де $Po = \frac{-q_V \cdot R^2}{\lambda(\theta_0 - t_c)}$ – критерій Померанцева; $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ – критерій Біо; $a_T = \frac{a_T}{1 - \varepsilon}$, де a_T – коефіцієнт температуропровідності; $A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}$ – початкові теплові амплітуди; μ_n – розв'язки характеристичного рівняння: $-\mu = (Bi - 1) \operatorname{tg} \mu$.

Оскільки теплообмін відбувається між повітрям та поверхнею зерна, то температура визначається експериментально пірометричним методом. Перепишемо рівняння (3) для температури поверхні зерна:

$$\theta_0 - \theta_n(\tau) = (\theta_0 - t_c) \left[1 + \frac{Po}{3Bi} \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) A_n \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a_{ef}}{R} \tau \right) \right].$$

(4)

Для використання алгоритму Левенберга-Марквардта в пошуку невідомих коефіцієнтів a_T та λ , потужності джерела q_V в рівнянні (3) визначаємо за даними емпіричних залежностей [7; 12]:

$$a_T = 14.7 - 10U; \lambda = 0.27 + 2U;$$

$$Bi = \frac{R}{\lambda} \left[0.06V^{0.79} d_e^{-0.21} \frac{(1 - \varepsilon_0)^{0.21}}{\varepsilon_0} \lambda V^{-0.79} \right]^{1.163},$$

(5)

де ε_0 – порозність шару зерна.

Розв'язки трансцендентного рівняння $\mu = f(Bi)$ апроксимуємо залежностями: для $(\mu_1) - \mu_1 = b_0 + b_1 Bi + b_2 Bi^{0.3}$; для $(\mu_2 - \mu_6) - \mu = b_0 + b_1 Bi + b_2 Bi^2$.

Для того щоб зменшити вплив випадкових і систематичних похибок, які виникають під час проведення експерименту, на результат визначення кінетичних коефіцієнтів, при розв'язанні зворотної задачі теплообміну, експериментальні дані кінетики охолодження зерна у шарі, що продувається, апроксимовані (для подальших розрахунків як масиву даних) емпіричними залежностями у вигляді:

$$\theta(\tau) = t_0 + (\theta_0 - t_0) e^{-0.54\tau};$$

(6)

для елементарного шару $h=0,025\text{м}$ при питомих витратах повітря $0,63 \text{ кг/кг}\cdot\text{с}$ та при різній висоті шару:

$$\theta(\tau, h) = t_0 + (\theta_0 - t_0) e^{-m(h)\tau},$$

(7)

де $m(h) = 0,078h^{-0.54}$ – коефіцієнт охолодження в регулярному режимі.

На рис. 1 представлено точки, отримані за емпіричною залежністю (6) і кривою, що визначена функцією `genfit` в Mathcad за рівнянням (4).

4. Усі види теплообміну враховуються коефіцієнтом теплообміну, який в часі не змінюються і дорівнює середньому значенню за процес.

5. Теплопровідністю шару зерна і теплообміном з навколишнім середовищем нехтуємо.

За таких умов кількісний опис процесу охолодження зернівки потоком повітря (вимушеною конвекцією) можна представити диференціальним рівнянням теплопровідності з негативним джерелом теплоти [7]

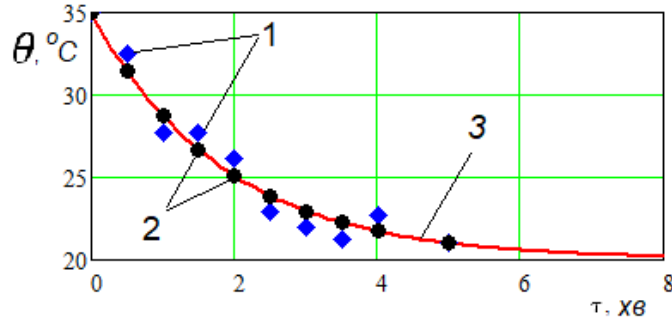


Рис. 1. Кінетика охолодження елементарного шару зерна (1 – експериментальні точки; 2 – точки за емпіричною залежністю (6); 3 – крива, визначена з рівняння (4))

Fig. 1. Kinetics of cooling the elementary layer of grain (1 – experimental points; 2 – points by empirical dependence (6); 3 – curve defined with equation (4))

Підстановкою залежностей $(\mu_2 - \mu_6)$ від Bi в рівняння (4) і використовуючи вбудовану функцію `genfit` у математичному пакеті `Mathcad`, яка реалізує алгоритм Левенберга-Марквардта, визначені фактичні значення Bi , a_{ef} . При цьому $q_V = r_0 \frac{m_b}{\tau_{ox} V_3}$, де m_b – кількість вологи, видаленої із зерна об'ємом V_3 за час τ_{ox} ; r_0 – питома теплота пароутворення води.

Для спрощення подальшого аналізу визначимо середньооб'ємну температуру зернівок за очевидною формулою $\bar{\theta}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \theta(r, \tau) dr$ і, обмежившись першим членом ряду (регулярний режим), отримаємо:

$$\bar{\theta}(\tau) = t_c + (\theta_0 - t_c) \frac{Po}{15} \left[1 + \frac{5}{Bi_1} \right] - \left[1 + \frac{Po}{\mu_1^2} \right] B_n \exp\left(-\mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R} \tau\right), \quad (8)$$

$$\text{де } B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_1^2(\mu_1^2 + Bi^2 - Bi)}; \mu_1^2 = 3Bi.$$

Продиференціювавши залежність $\bar{\theta}(\tau)$ за τ і порівнявши отримане рівняння з (8), після перетворень матимемо:

$$-\frac{d\bar{\theta}(\tau)}{d\tau} = k_0(t_c - \theta) + Q_V, \quad (9)$$

$$\text{де } k_0 = \mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2} = 3Bi \frac{a_{ef}}{R^2}; Q_V = q_V \mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2}.$$

Рівняння (9), яке визначає кінетику охолодження окремої зернини (елементарного шару зерна), відрізняється від відомих тим, що враховує не тільки зовнішній, а й внутрішній теплоперенос та видалення вологи.

Для отримання математичної моделі нестационарного теплообміну рухомого шару зерна в процесі охолодження (модель макрорівня) розкриємо повний диференціал $d\bar{\theta} = \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} dz$. Враховуючи, що величина $\frac{dz}{d\tau} = V_3$ є швидкістю переміщення зерна, то рівняння (9) матиме вигляд:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} + V_3 \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = k_0(t_c - \theta) + Q_V. \quad (10)$$

Температура повітря, яке фільтрується крізь шар зерна, у радіальному напрямку буде змінюватися в часі (τ) та за координатою r (поточний радіус колонки).

Зміна тепловмісту (ентальпії) повітря при фільтрації крізь шар зерна:

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} dr = \frac{c_p \varepsilon V_n d\tau}{\partial r} dr. \quad (11)$$

Зміна тепловмісту повітря в часі:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau = \frac{c_p \varepsilon V_n d\tau \partial t}{\partial \tau} d\tau = \frac{c_p \varepsilon dr \partial t}{\partial \tau} d\tau; \quad V_n d\tau = dr. \quad (12)$$

При переміщенні повітря крізь шар зерна воно забирає теплоту від зерна на елементарній ділянці dr за час $d\tau$ в кількості:

$$\partial \theta = \alpha F_V (\theta - t) dr d\tau, \quad (13)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, $F_V = \sigma \rho_n$, $\sigma = \frac{f}{m}$ – питома поверхня зерна, m – маса зерна, ρ_n – насипна густина зерна.

З рівнянь (11)–(13) матимемо:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_r(r) \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha F_V (\theta - t), \quad (14)$$

де $V_r(r)$ – швидкість повітря в шарі за радіусом.

Значення швидкості повітря, що змінюється в напрямку руху, визначимо за залежністю

$$V_r(r) = \frac{L_n}{2\pi r H_n}, \quad (15)$$

де L_n – об’ємні витрати повітря, H_n – висота фільтрованого шару зерна.

Розрахункова схема охолодження зерна в циліндрично-колонковому шарі наведена на рис. 2

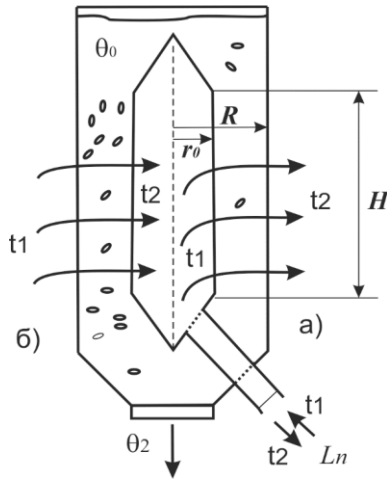


Рис. 2. Розрахункова схема охолодження зерна в циліндрично-колонковому шарі

Fig. 2. The calculation scheme for grain cooling in a cylindrical-columnar layer

Для практичних розрахунків можна знехтувати першою складовою в рівнянні (14), оскільки $V_r \frac{\partial t}{\partial \tau} \gg \frac{\partial t}{\partial \tau}$.

Таким чином, динаміка охолодження зерна при разовому завантаженні моделюється системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + V_3 \frac{\partial \theta}{\partial z} &= k_0(t_c - \theta) + Q_V; \\ V_r(r) \frac{\partial t}{\partial r} &= \alpha(r) F_V(\theta - t). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При безперервному (стаціонарному) режимі охолодження зерна температура його в різних точках об’єму не буде залежати від часу ($\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = 0$). Стаціонарний режим охолодження в безперервно діючому охолоджувачі описуватиметься системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} V_3 \frac{\partial \theta}{\partial z} &= k_0(t_c - \theta) + Q_V; \\ V_r(r) \frac{\partial t}{\partial r} &= \alpha(r) F_V(\theta - t). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Для числового (комп’ютерного) розв’язку систем (16) та (17) необхідно мати числову залежність $\alpha = f[V_r(\tau)]$. Оскільки коефіцієнт теплообміну залежить від гідродинамічного режиму фільтрації повітря крізь шар зерна, що визначається значенням швидкості повітря на вході в шар зерна V_0 , то для ідентифікації критеріальної залежності

$$Nu = A \cdot Re^n \quad (18)$$

було проведено експериментальні дослідження кінетики охолодження шару нагрітого зерна за різних значень швидкості повітря на вході в шар. Дані експериментів апроксимовано залежністю

$$\theta(\tau) = t_0 + (\theta_0 - t_0)e^{-m(V_r)\tau}. \quad (19)$$

Залежність коефіцієнта охолодження від швидкості повітря наведена на рис. 3.

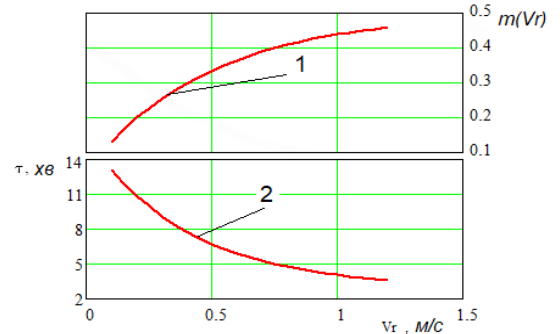


Рис. 3. Зміна коефіцієнта охолодження $m(V_r)$ – крива 1;

експозиції охолодження $\tau(V_r)$ (крива 2) від швидкості повітря

Fig. 3. Change in the cooling coefficient $m(V_r)$ – curve 1; cooling exposure $\tau(V_r)$ (curve 2) from the speed of the air

У результаті обробки отриманих експериментальних даних визначено критеріальне рівняння (18), яке можна представити в розгорнутому вигляді таким чином:

$$\alpha(r) = d_3^{-0,2} \frac{(1-\varepsilon)^{0,2}}{\varepsilon} \left(\frac{V_0 r_0}{r}\right)^{0,8} v^{-0,8} \cdot 0,0168, \dots \quad (20)$$

де d_3, ε – діаметр зернини та порозність шару; V_0, R_0 – швидкість повітря на вході в шар та радіус внутрішнього циліндра бункера; v – кінематична в’язкість повітря.

Задача дослідження теплообміну полягає у вивченні й оцінці умов найбільш повного використання охолоджувального повітря, що визначається рівністю температури повітря і зерна на виході з шару і, відповідно, визначає ефективність функціонування охолоджувальних пристроїв.

Для вивчення закономірностей зміни параметрів повітря та зерна за різних способів подачі охолоджувального повітря в зерновий шар (від внутрішнього до зовнішнього циліндра і навпаки за різних витрат повітря) проведено числові експерименти на основі отриманих систем рівнянь (16) та (17) при початкових умовах: $\theta(0, r) = \theta_1$; $t(\tau, R_0) = t$ – при фільтрації повітря від центрального циліндра до зовнішнього; $\theta(0, r) = \theta_1$; $t(\tau, R) = t$ – при фільтрації повітря від зовнішнього до внутрішнього циліндра.

Для роботи колонкового охолоджувача безперервної дії граничні умови записано у

вигляді: $z = 0; \theta = \theta_1; r = R_0; t = t_1$ – прямий рух повітря; $z = 0; \theta = \theta_1; r = R; t = t_1$ – зворотний рух повітря.

Результати числового розв'язку систем рівнянь (16) та (17) у комп'ютерному середовищі Mathematica отримані у вигляді зміни параметрів повітря та зерна в часі і за радіальною координатою (рис. 4–6).

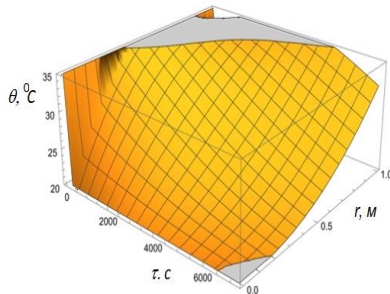


Рис. 4. Зміна температури шару зерна в процесі охолодження при фільтрації повітря від внутрішнього циліндра до зовнішнього

Fig. 4. Change in the temperature of the grain layer during cooling when air moves from the inner cylinder to the outer cylinder

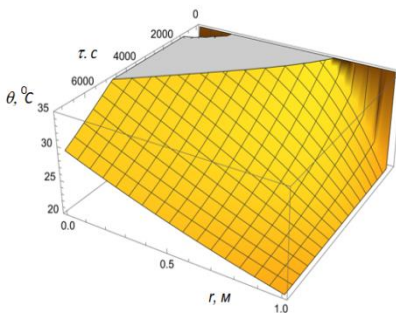


Рис. 5. Зміна температури шару зерна в процесі охолодження при фільтрації повітря від зовнішнього циліндра до внутрішнього

Fig. 5. Change in the temperature of the grain layer during the cooling process under air filtration from the outer cylinder to the inner cylinder

Нерівномірність розподілу температури зернової маси за радіальною координатою за однакових значень технологічних параметрів процесу, але за різних напрямів фільтрації повітря наведено на рис. 6.

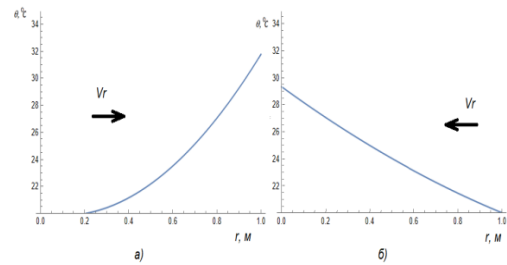
На рис. 4–6 проілюстровано, що при фільтрації охолоджувального повітря від центру бункера до зовнішнього циліндра нерівномірність розподілу температури зерна на внутрішньому і зовнішньому циліндрах на 25 % більша, ніж при фільтрації в протилежному напрямі, при визначеній експозиції охолодження.

Рис. 6. Розподіл температури зерна за радіальною координатою, експозиція $\tau(V_r) = 2 \text{ год}$:

а) при фільтрації повітря від внутрішнього циліндра до зовнішнього; **б)** при фільтрації повітря від зовнішнього циліндра до внутрішнього

Fig. 6. Distribution of grain temperature by radial coordinate, exposure $\tau(V_r) = 2 \text{ h}$: **a)** under air filtration

from the inner cylinder to the outer one; **b)** under air filtration from the outer cylinder to the inner one



Висновки. Удосконалено математичні моделі для дослідження динаміки процесу охолодження зерна в установках з радіальним розподілом охолоджувального повітря, які являють собою дворівневий математичний опис з проміжною процедурою ідентифікації теплофізичних коефіцієнтів. Моделі враховують особливості внутрішнього теплопереносу і зовнішнього теплообміну. Математична модель макrorівня з обчисленими коефіцієнтами за експериментальними даними є основою для розрахунку кінетики охолодження. Числовими експериментами визначено, що нерівномірність розподілу температури зерна за радіальною координатою в стадії завершення процесу при фільтрації шару зерна повітрям від зовнішнього циліндра до внутрішнього менша на 20-30 %, ніж при подачі повітря в зворотному напрямі. Це дозволяє переглянути рекомендації щодо використання вентиляваних бункерів для охолодження зерна після сушіння.

Бібліографічний список

1. Активне вентилявання та сушіння зерна / О. І. Гапонюк, М. В. Остапчук, Г. М. Станкевич, І. І. Гапонюк. Одеса: ВМВ, 2014. 326 с.
2. Верхованцева В. О. Визначення ефективності застосування методу охолодження зерна. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. Вип. 11., т. 1. С. 326-331.
3. Верхованцева В. О. Обґрунтування режимних параметрів охолодження зернової сировини у процесі зберігання: дис. канд. техн. наук. Вінниця, 2016. 200 с.
4. Інструкції по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зернових сушарок / Г. Н. Станкевич та ін. Одеса: АРД-ЛТД, 1997. 72 с.
- Калініченко Р. А. Алгоритм параметричної ідентифікації аналітичного марема тичного опису динаміки низькотемпературного сушіння зернових матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2016. № 3(102).
5. Калініченко Р. А. Визначення теплофізичних коефіцієнтів в розв'язках рівняння теплопровідності для ідентифікації процесів термообробки зерноматеріалів. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. №241. С. 325-333.

6. Калініченко Р. А., Войтюк В. Д. Енергоефективні режими роботи машин для високоінтенсивної термообробки зернових матеріалів. Ніжин: Вид. центр НДУ ім. Гоголя, 2017. 261 с.
7. Котов Б. І., Грищенко В. О. Математична модель охолодження вологого зерна у вентилюємих бункерах з радіальним розподіленням повітря. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47 (1). С. 132–139.
8. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Кифяк В. В. Моделювання динаміки нагріву та охолодження зернопродуктів в режимі пневмотранспортера. *Інженерія природокористування*. 2015. № 1. С. 40–43.
9. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Курганський О. Д. Тепло- і масообмін при сушінні і охолодженні зернового матеріалу у щільному рухомому шарі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 1(96). С. 93–95.
10. Котов Б. І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилювання, охолодження): [кол. монографія] / Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва». Київ; Ніжин: Лисенко М. М., 2017. 551 с.
11. Курганський О. Д., Котов Б. І. Аналіз способів охолодження зернового матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. № 2(94). С. 49–52.
12. Кюрчев С. В., Кюрчева Л. М., Верховланцева В. О. Визначення важливого фактора якості пшениці у процесі зберігання із застосуванням охолодження. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2018. Вип. 18, т. 1. С. 3-11.
13. Кюрчев С. В. Механіко-технологічне об'рунтування післязбиральної обробки та зберігання насіння зернових і олійних культур: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Глеваха, 2019. 40 с.
14. Паламарчук І., Кюрчев С., Верховланцева В. Віброхвильовий семіфлюїдизаційний процес низькотемпературної обробки рослинної сировини. *Соціально-економічний розвиток аграрної сфери: інженерно-економічне забезпечення: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2018. С. 308-310.*
15. Theoretical research esofcooling process regularity of the grain material in the layer / В. Kotov, А. Spirin, I. Tverdokhlib, R. Kalinichenko. *INMATEH-AGRICULTURAL ENGINEERING*, 2018. Vol. 54. P. 87-94.

Стаття надійшла 10.05.2023

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗАКРИТИХ ПЕРЕПУСКНИХ КАНАЛАХ РІЗНОГО ПЕРЕРІЗУ

Сергій Баранович, к. т. н., Ігор Стукалець, к. т. н.,
Роман Шеремета, к. т. н., Сергій Коробка, к. т. н., Михайло Бабич, к. т. н.
Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: baranovich1977@ukr.net; igorstukalets@gmail.com; romansheremeta@ukr.net;
korobkasv@ukr.net, m.babych@ukr.net

Баранович С., Стукалець І., Шеремета Р., Коробка С., Бабич М. Методики дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах різного перерізу

Розглянуто різні методики дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах з різним поперечним перерізом. Одна з використаних методик передбачала аналітичний підхід, який відрізнявся складністю математичних розрахунків та наступною візуалізацією гідрогазодинамічних процесів з використанням системи MATLAB. Цей метод дозволив детально проаналізувати особливості каналу та відтворити явища ламінарного режиму перетікання рідин і газів у ньому, надаючи глибше розуміння їхньої природи.

Інша методика передбачала проведення імітаційного комп'ютерного моделювання процесів ламінарного режиму перетікання рідини та газу каналами різного поперечного перерізу в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation. Для застосування цієї методики були задані входні параметри та умови, і отримані результати були докладно проаналізовані та інтерпретовані. Цей підхід надавав можливість створити реалістичні комп'ютерні моделі гідрогазодинамічних явищ, дозволяючи дослідникам докладно вивчати їхню поведінку та взаємодію в умовах різних перерізів каналів.

Порівняння результатів, отриманих за допомогою обох методик, вказало на адекватність відтворення гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах з різним перерізом. Отримані дані не тільки підтвердили точність обраних методів аналізу, а й розширили розуміння перетікання рідини та газу за умови ламінарного руху. Це дослідження відкриває нові горизонти для подальших наукових досліджень у сфері гідрогазодинамічних явищ і може бути застосоване у важливих інженерних проектних розрахунках, де необхідна висока точність, відповідність дійсності та надійність обчислень гідрогазодинамічних процесів.

Ключові слова: гідрогазодинаміка, технологічний канал, система *MATLAB*, середовище *SOLIDWORKS Flow Simulation*.

Baranovych S., Stukalets I., Sheremeta R., Korobka S., Babych M. Methods of researching hydro-gas-dynamic processes in closed bypass channels of different cross-sections

The article considers different methods of researching the hydro-gas-dynamic processes in closed bypass channels with different cross-sections. One of the used methods involved an analytical approach, which was distinguished by the complexity of mathematical calculations and the subsequent visualization of hydro-gas-dynamic processes using the MATLAB system. This method facilitated a detailed analysis of the channel's features and reproduction of the phenomena of a laminar mode of the flow of liquids and gases in it, providing a deeper understanding of their nature.

Another technique involved simulation computer modeling of the processes of laminar flow of liquid and gas through channels of different cross-sections in the SOLIDWORKS Flow Simulation environment. To apply this technique, the input parameters and conditions were specified, and the obtained results were analyzed and interpreted in detail. This approach was used to create realistic computer models of hydro-gas-dynamic phenomena, allowing researchers to deeply study their behavior and interaction in the conditions of different cross-sections of channels.

A comparison of the results obtained using both methods indicated the adequacy of their reproduction of hydro-gas-dynamic processes in closed bypass channels with different cross-sections. The obtained data not only confirmed the accuracy of the chosen methods of analysis but also expanded the understanding of the flow of liquid and gas under the conditions of their laminar movement. This research opens up new horizons for further scientific studies in the field of hydro-gas-dynamic phenomena and can be applied in important engineering design calculations where high accuracy and reliability of hydro-gas-dynamic process calculations are required.

Key words: hydro-gas-dynamics, technological channel, *MATLAB* system, *SOLIDWORKS Flow Simulation* environment.

Постановка проблеми. Теоретичні за-
сади визначення продуктивності довгих закритих каналів з ламінарним режимом руху рідин і газів ґрунтуються на коефіцієнті Пуазейля,

який розроблений для каналу круглого перерізу, а на практиці закриті канали, які з'єднують камери елементів конструкцій різного типу

механізмів і машин, виконуються трикутного або прямокутного перерізу, тому теорія перетікання такими каналами вимагає уточнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянувши теоретичні засади перехідних процесів у теоріях розрахунку закритих технологічних каналів, бачимо, що використовується K_p – коефіцієнт Пуазейля [2-5; 7; 8; 11; 12], який визначають за формулою

$$K_p = \frac{\pi D^4}{128\eta l}, \quad (1)$$

де D – діаметр каналу, мм;
 l – довжина каналу, мм;
 η – коефіцієнт в'язкості, мм.

Використання цього коефіцієнта в обчисленнях гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів є справедливим тільки для круглих перерізів, інші ж форми перерізів потребують додаткових досліджень.

Постановка завдання. Для визначення гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів використовують формули, в яких застосовують коефіцієнт Пуазейля, що визначається з виразу (1), який передбачає перетікання рідин і газів каналами круглого перерізу. Однак на практиці технологічні канали в елементах конструкцій виконують також квадратного, прямокутного, трикутного та іншої форми перерізу, оскільки їх виготовлення є технологічно простішим, а відповідно й менш затратним у виробництві. Тому виникає потреба розробити й дослідити методики визначення гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів з різними геометричними перерізами.

Виклад основного матеріалу. Проведемо розрахунки гідрогазодинамічних характеристик каналів з круглим і квадратним перерізом [5]. Визначимо швидкість і продуктивність перетікання рідин і газів. Для рівняння пропускної здатності каналів різної конфігурації будемо вважати, що їхні площі перерізів A однакові.

Для каналу круглого перерізу (рис. 1) диференціальне рівняння Нав'є-Стокса у полярній системі координат, враховуючи симетрію [1], матиме вигляд:

$$\frac{d^2 g}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg}{dr} = -k, \quad (2)$$

$$\text{де } k = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx};$$

η – динамічна в'язкість рідини (газу), Па/с;

p – тиск рідини (газу), Па;
 g – швидкість перетікання повітря в каналі, м/с.

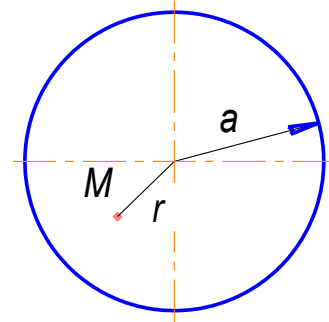


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення швидкості руху рідин і газів каналом круглого перерізу

Fig. 1. Calculation scheme for determining the speed of movement of liquids and gases along the channel under the conditions of a circular cross-section

Розв'язок рівняння 1 матиме такий вигляд:

$$g = -\frac{k \cdot r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2, \quad (3)$$

де C_1, C_2 – числові сталі, які за належно вибраних значень дають будь-який частковий розв'язок рівняння.

Оскільки швидкість обмежена, то $C_1 = 0$, а значення сталої C_2 знаходимо з граничної умови, при $r = a, g = 0 \rightarrow C_2 = \frac{k \cdot a^2}{4}$.

Отже,

$$g = \frac{k}{4} (a^2 - r^2). \quad (4)$$

Тоді продуктивність

$$\begin{aligned} Q &= \iint_A \rho g dA = \int_0^a \frac{k\rho}{4} (a^2 - r^2) \cdot 2\pi r dr = \\ &= \frac{\pi k \rho}{r} \left(\frac{a^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right) \Big|_0^a = \frac{\pi k \rho a^4}{8}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тоді радіус каналу круглого перерізу

$\frac{a^2}{\sqrt{\pi}}$ і його пропускна здатність

$$Q = \frac{k \rho a^4}{8\pi} = 0,0398 k \rho a^4. \quad (6)$$

Розподіл зміни швидкості руху рідин і газів каналом круглого перерізу зображено на рис. 3 [6; 10].

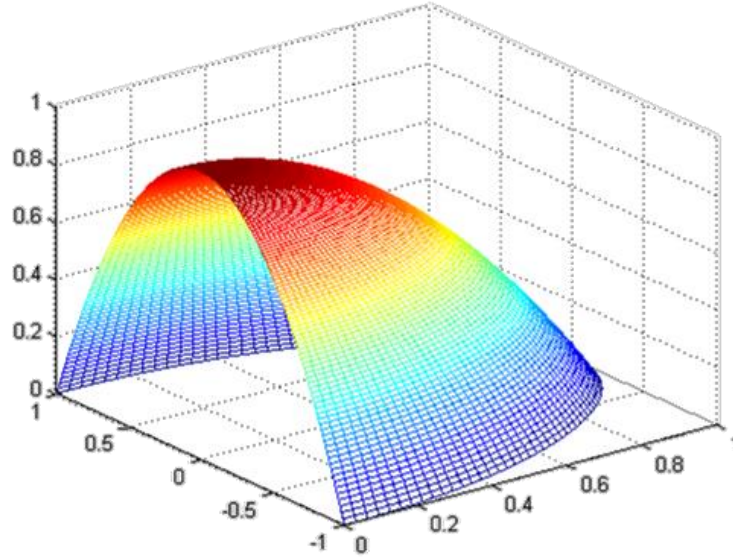


Рис. 2. Графік розподілу швидкості каналом круглого перерізу в системі *MATLAB*
Fig. 2. Graph of velocity distribution along a circular channel in the *MATLAB* system

Для каналу квадратного перерізу (рис. 3) диференціальне рівняння Нав'є-Стокса матиме такий вигляд:

$$\frac{d^2 g}{dy^2} + \frac{d^2 g}{dz^2} = -k. \quad (7)$$

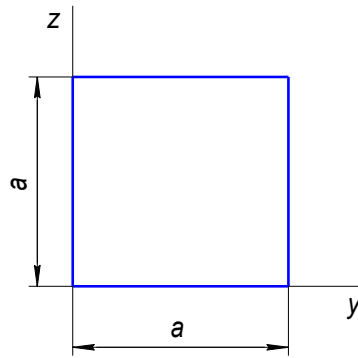


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення швидкості руху рідин і газів каналом квадратного перерізу
Fig. 3. Calculation scheme for determining the speed of movement of liquids and gases in a channel with a square section

Отже, формула для визначення швидкості руху повітря в каналі квадратного перерізу матиме остаточно такий вигляд [1]:

$$g = \frac{4ka^2}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{\pi(2n-1)y}{a}\right)}{(2n-1)^3} \times \left(1 - \operatorname{ch}\left(\frac{\pi(2n-1)z}{a}\right) + \frac{\operatorname{ch}(\pi(2n-1)) - 1}{\operatorname{sh}(\pi(2n-1))} \operatorname{sh}\left(\frac{\pi(2n-1)z}{a}\right)\right) \quad (8)$$

Обчислимо витрату повітря

$$Q = \rho \int_0^a \int_0^a |g| dy dz = 8 \frac{4ka^4 \rho}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \times \left(1 - \frac{2(\operatorname{ch}(\pi(2n-1)) - 1)}{\pi(2n-1)\operatorname{sh}(\pi(2n-1))}\right) = 0,0351ka^4 \rho \quad (9)$$

Швидкості руху рідин і газів каналом квадратного перерізу зображено на рис. 4.

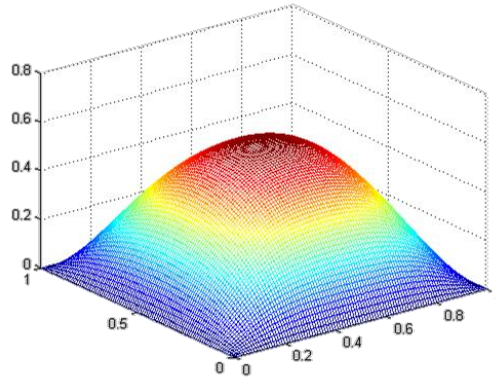


Рис. 4. Графік розподілу швидкості руху рідин і газів каналом квадратного перерізу в системі *MATLAB*
Fig. 4. Graph of velocity distribution along a square channel in the *MATLAB* system

Обчислення показують, що у виразі суми достатньо взяти 2 або 3 доданки. Підтвердженням цього є складена програма в середовищі *MATLAB*.

Отримані рівняння дозволяють більш точно визначати гідрогазодинамічні процеси в перепускних каналах різного перерізу, які використовуються в техніці.

Методика імітаційного моделювання гідрогазодинамічних процесів у середовищі *SOLIDWORKS Flow Simulation* [9; 13; 14] передбачає насамперед створення твердотілої геометричної моделі каналу певного поперечного перерізу,

визначення області дослідження, обмеженої об'ємом каналу, задання вхідних параметрів процесу (швидкісних або об'ємних характеристик) та умов дослідження. Твердотілу модель каналу перетворюють у сіткову з розміром елементів, який забезпечить достатню точність результатів. Задання цілей дослідження залежить від результатів, які необхідно отримати. Кінцевим етапом моделювання є аналіз одержаних результатів та їх інтерпретація. Для візуального сприйняття отриманих результатів будують діаграми, як показано на рис. 5, 6.

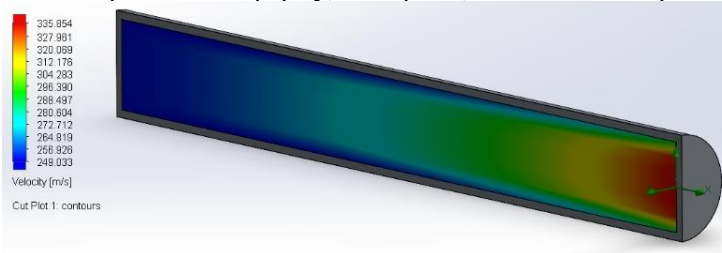


Рис. 5. Діаграма розподілу швидкості каналом круглого перерізу з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

Fig. 5. Plot of velocity distribution along a circular channel using the *Flow Simulation* module of the *SOLIDWORKS* system

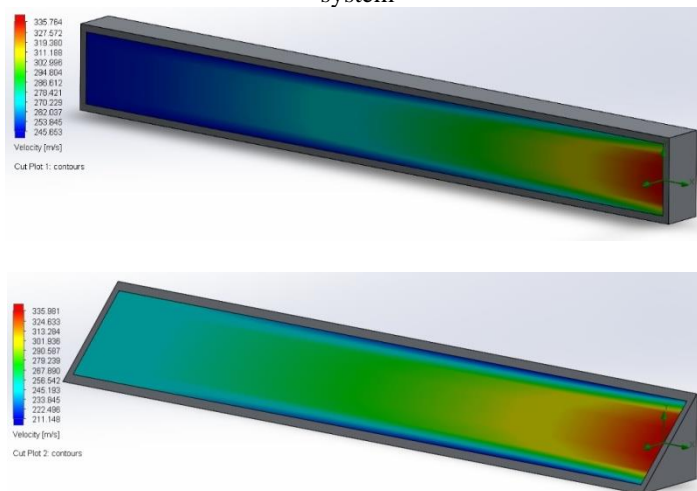


Рис. 6. Діаграма розподілу швидкості каналом квадратного перерізу з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

Fig. 6. Plot of velocity distribution along a square channel using the *Flow Simulation* module of the *SOLIDWORKS* system

Як бачимо, вищенаведені методики показують майже однакові характеристики відтворення гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах.

Висновки. Отримано залежності для визначення характеру впливу геометричних параметрів перерізу перепускних каналів на гідрогазодинамічні процеси, які впливають на підвищення точності визначення характеристик процесу роботи закритих каналів.

Порівняння отриманих залежностей відтворення гідрогазодинамічних характеристик роботи перепускних каналів у двох системах *MATLAB* та *SOLIDWORKS Flow Simulation* показує, що динамічні залежності в обох випадках є подібними і можуть використовуватися під час конструювання виробів, які містять перепускні канали закритого типу.

Бібліографічний список

1. Баранович С. М. Обґрунтування параметрів пульсатора доїльного апарата з регульованою тривалістю такту ссання: дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2015. 165 с.
2. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: навч. посіб. Київ: НАУ, 2004. 336 с.
3. Константінов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка рідини і газу: [підручник]. Київ: Вища шк., 2002. 277 с.
4. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник. Київ: Фірма «Інкос», Центр навч. літ., 2006. 616 с.
5. Кулінченко В. Р. Гідродинаміка: навч. посіб Київ: НМК ВО, 1992. 272 с.
6. Пейч Л. И., Точилин Д. А., Поллак Б. П. LabVIEW для новичков и специалистов. Москва: Горячая линия-Телеком, 2004. 384 с.
7. Турик В. М. Гідрогазодинаміка: курс лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 8,37 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 145 с.
8. Свирень Н. О., Петренко Н. Н. Приложение законов гидродинамики к особенностям пневматических высевающих аппаратов. *Збірник наукових праць Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 1998. № 2. С. 177-180.
9. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів: курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів: ЛНУП, 2022. 109 с.
10. Тревис Дж. LabVIEW для всех / пер. с англ. Н. А. Клушина; под ред. В. В. Шаркова, В. А. Гурьева. Москва: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. 544 с.
11. Цяпко М. Ф., Мамаєв Л. М. Гідрогазодинаміка. Київ: ІСДМО, 1995. 211 с.
12. Цяпко М. Ф., Яловий М. І., Павленко А. М. Гідрогазодинаміка. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2009. 264 с.
13. An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation: Student Guide. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2013. 19 p.
14. SolidWorks, "SOLIDWORKS Flow Simulation," Dassault Systemes. URL: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm> (Last accessed: 15.05.2023).

Стаття надійшла 20.06.2023

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ. УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ ТА ПРОГРАМАМИ В АГРОІНЖЕНЕРІЇ

УДК 658.5:004.451

АДАПТИВНО-ЦІННІСНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА РЕГІОНІВ

Анатолій Тригуба¹, д. т. н., Оксана Маланчук², к. ф.-м. н., Андрій Ратушний³, ад'юнкт, Олег
Паньків³, аспірант, Лілія Коваль³, ад'юнкт, Роксолана Шолудько³, здобувач,
Олег Андрушків³, 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; ratuwnuja@ukr.net; pankiv.oleh@gmail.com;
kovallilia494@gmail.com; roksolanasoludko@gmail.com; andrushkivoleg6@gmail.com

Тригуба А., Маланчук О., Ратушний А., Паньків О., Коваль Л., Шолудько Р., Андрушків О.
Адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами розвитку громад та регіонів

Виконаний аналіз стану питання в теорії та практиці реалізації проєктів розвитку громад та регіонів. Встановлено, що для проєктного та портфельного управління наявні методології та підходи, які мають переваги та недоліки. Обґрунтована доцільність розроблення адаптивно-ціннісного підходу до управління проєктами розвитку громад та регіонів, який забезпечить усунення існуючих недоліків. Запропонований адаптивно-ціннісний підхід забезпечує врахування особливостей та специфіки проєктів розвитку громад та регіонів і враховує сучасні реалії громад, що лежать в основі ефективного управління проєктами їх розвитку.

Запропонований адаптивно-ціннісний підхід до управління проєктами розвитку громад та регіонів враховує невизначеність та ризики, що властиві проєктам розвитку громад, а також забезпечує досягнення цілей та створення максимальної цінності для стейкхолдерів. На підставі адаптивно-ціннісного підходу розроблено алгоритм управління проєктами розвитку громад та регіонів, який охоплює 14 кроків, що відображають виконання процесів з обґрунтованими їх особливостями. Між цими етапами існують взаємозв'язки, які системно зумовлюють формування портфелів проєктів із максимальною їх цінністю та врахуванням змін проєктного середовища.

У результаті виконаних досліджень сформовано проєктні ідеї та їх альтернативи для портфелів проєктів розвитку громади. Сформовано варіанти конфігурації проєктів розвитку громад у різних сферах, а також використовуючи представлений вище підхід для кожного з цих варіантів визначено показники доцільності включення проєктів у портфель розвитку громади. Сформовано портфель проєктів розвитку для умов заданої громади, який включає 4 проєкти (проєкт 5 – створення природного заповідника та відновлення місцевої екосистеми, проєкт 3 – встановлення відеоспостереження в громадських місцях, проєкт 6 – розбудова системи переробки органічних відходів та проєкт 4 – розширення програми патрулювання добровільними формуваннями) загальним бюджетом 1700 тис. \$ та сумарною цінністю для стейкхолдерів – 1,96. Подальші дослідження слід проводити в напрямі розробки системи підтримки прийняття рішень для проєктних менеджерів, яка базуватиметься на запропонованому адаптивно-ціннісному підході до управління проєктами розвитку громад та регіонів.

Ключові слова: управління, проєкти, розвиток, громади, регіони, адаптивно-ціннісний підхід.

Tryhuba A., Malanchuk O., Ratushnyi A., Pankiv O., Koval L., Sholudko R., Andrushkiv O. Adaptive value approach to managing the projects of community and regional development

After analyzing the current state of community and regional development projects, it has been determined that there are both advantages and disadvantages in current methodologies and approaches to project and portfolio management. To eliminate existing shortcomings, it is necessary to develop an adaptive value approach that takes into account the specific features and current realities of the communities involved.

This adaptive value approach will consider uncertainties and risks inherent in community development projects while ensuring that goals are met and the maximum value is created for stakeholders. To achieve this, a 14-step algorithm for managing community and regional development projects has been developed. This algorithm reflects the processes involved

in managing projects and their specific features, while also considering the interrelationships between stages and changes in the project environment.

As a result of this research, project ideas and alternatives for portfolios of community development projects have been formed. Various configurations of community development projects were proposed, and using the adaptive value approach, the feasibility of including projects in a community development portfolio was determined for each option. Based on this approach, a portfolio of development projects was formed for a specific community, which included four projects (project 5 - creation of a nature reserve and restoration of the local ecosystem, project 3 - installation of video surveillance in public places, project 6 - development of an organic waste recycling system, and project 4 - expansion of the volunteer patrol program formations). The total budget for these projects was \$1,700,000, with a total value for stakeholders of 1.96. Further research is needed to develop a decision-making support system for project managers based on the proposed adaptive value approach to the management of community and regional development projects.

Key words: management, projects, development, communities, regions, adaptive value approach.

Постановка проблеми. Адміністративно-територіальна реформа в Україні зумовила реформування інших соціальних напрямів забезпечення життєдіяльності населення, таких як медицина, безпека регіонів та громад, ресурсне та енергозабезпечення громад, а також охорону навколишнього середовища громад [1–3]. Розвиток цих напрямів відповідно до існуючих реалій потребує реалізації відповідних проєктів, які спрямовані на покращання інфраструктури, освіти, охорони здоров'я, соціальних послуг і природного середовища. Це сприяє підвищенню загальної якості життя мешканців громад та забезпечення їхніх основних потреб. Інвестиції в розвиток громад і регіонів сприяють зростанню місцевої економіки, а також створюють нові робочі місця, підвищують ефективність виробництва та збільшення платоспроможного населення громад і їх добробуту. При цьому територіальні проєкти розвитку часто сприяють підвищенню рівня співпраці та взаємодії в межах громади чи регіону. Це сприяє зміцненню соціального капіталу та покращанню взаємин між мешканцями громад. Загалом реалізація проєктів розвитку громад та регіонів є ключовим інструментом для створення стійкого та заможного суспільства, яке задовольняє потреби та цінності свого населення й забезпечує якісний розвиток на довгострокову перспективу [4–6].

При цьому виникає потреба в ефективному управлінні зазначеними проєктами. Управління проєктами розвитку громад та регіонів є ключовою складовою сучасного проєктного менеджменту. Якісне управління потребує відповідного інструментарію, який забезпечує вчасну та ефективну реалізацію проєктів, продукти яких забезпечують підвищення якості життя населення громад, стає соціально-економічне зростання і підвищення рівня задоволення потреб та цінностей населення громад. Проте в сучасних умовах, коли спостерігаються невизначеності через воєнний стан та швидкі зміни в соціальному, економічному та екологічному середовищі, традиційні моделі та методи управління проєктами недостатньо ефективно забезпечують вирішення управлінських задач з існуючими викликами та можливостями громад [7–9]. Зокрема, сучасні реалії передбачають стрімкі зміни та несподівані

події, такі як війни, кризи, зміни клімату та технологічні революції. Традиційні методи управління проєктами не завжди можуть адаптуватися до цих змін. При цьому споживачі продуктів проєктів розвитку громад та регіонів вимагають більшого впливу на їх формування, що зумовлює використання адаптивно-ціннісного підходу до управління. Саме цей підхід забезпечує врахування вимог, потреб та цінностей населення громад та інших стейкхолдерів проєктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні існують численні традиційні методології та підходи управління проєктами [10–12]. Вони успішно використовуються в різних галузях і мають свої переваги й недоліки. Однак вони не завжди забезпечують адаптування до змінних потреб та умов сучасних громад та регіонів. На підставі виконаного аналізу існуючих методологій та підходів управління проєктами встановлено їх переваги на недоліки (табл. 1).

Кожен із цих підходів має свої контекстні переваги та недоліки, і вибір методології повинен бути дійсним з урахуванням конкретного виду та особливостей проєкту, вимог до нього, доступних ресурсів і специфіки громади або регіону. У деяких випадках також можна корисно комбінувати різні методології або розглядати адаптивні підходи до управління проєктами для кращого відтворення існуючих змін у проєктному середовищі та наявних ресурсів для реалізації проєкту [13–15]. Обираючи методологію або підхід до конкретного проєкту розвитку громади чи регіону, важливо брати до уваги його унікальні характеристики, вимоги та обмеження, а також враховувати ступінь змін та невизначеності, які можуть виникнути під час його виконання.

Наявність недоліків існуючих методологій та підходів свідчить про доцільність розроблення такого підходу, який забезпечить їх усунення під час управління проєктами розвитку громад та регіонів [16–19]. Для цього пропонується розробити адаптивно-ціннісний підхід, який забезпечить врахування особливостей та специфіки таких проєктів та сучасні реалії громад, що лежать в основі ефективного управління проєктами їх розвитку.

Таблиця 1. Аналіз існуючих методологій та підходів до управління проектами
Table 1. Analysis of existing methodologies and approaches to project management

Методології та підходи	Переваги	Недоліки	Можливості використання у проектах розвитку громад та регіонів
«Waterfall» (водоспадна модель)	Достатньо зрозуміла та легка у впровадженні	Не дає змоги ефективно адаптуватися до змін у проекті	Використовується в проектах зі стабільними вимогами, коли зміни в ході проекту малоімовірні та небажані.
	Ідеально підходить для проектів зі стабільними вимогами і низьким рівнем змін.	Немає можливості оцінювати реальний продукт раніше кінця проекту.	Добре підходить для проектів з чітко визначеними цілями та обмеженими бюджетами, де необхідні детальна документація та планування.
	Документовані вимоги і результати кожного етапу.	Ризик відхилення від графіка через недооцінку ресурсів або труднощі в розробці.	
«Agile» (гнучкі методи) PRINCE2 (Проекти в контрольованих середовищах)	Здатність швидко реагувати на зміни та вимоги клієнта.	Вимагає більш активної участі клієнта, що може бути складним для деяких проектів.	Застосовується в проектах, де вимоги можуть змінюватися та необхідно швидко реагувати на зміни в середовищі.
	Акцент на взаємодію команди та співпрацю з клієнтом.	Може призвести до сильного внутрішнього розподілу завдань у команді.	Сприяє активній участі громади та забезпечує можливість адаптації проекту до своїх потреб і цінностей.
	Частіша видача функціональних версій продукту.	Потрібен досвід і вправність у розробці для успішного впровадження.	
	Пропонує системний підхід до управління проектами.	Може бути важким для впровадження в менших організаціях чи в менших проектах.	Забезпечує системний підхід до управління проектами, що дозволяє керувати ризиками та забезпечити документообіг процесів у проектах розвитку громад та регіонів.
	Встановлює чіткі ролі та відповідальність у проекті.	Вимагає значних зусиль на підготовку документації.	Встановлює чіткі ролі та відповідальність у проектах, що сприяють ефективному розподілу завдань та управлінській команді.
	Забезпечує документальність і керованість процесів.		
Керування критичним ланцюгом проектів (ССРМ)	Акцент на управлінських ресурсах для виконання задач проекту.	Вимагає детального планування та великої обережності під час оцінки тривалості виконання завдань.	Використовується для управління ресурсами та уникнення їх перенавантаження в проектах розвитку громад та регіонів.
	Зосередження на критичних завданнях, що погіршує швидке завершення проекту	Може вимагати змін в організаційній культурі.	Спрямований на зосередження уваги на завданнях, які є критичними для завершення проекту в найкоротший час, що сприяє швидкому завершенню проекту та ефективному використанню ресурсів.

Управління проектами за допомогою методу критичного шляху (CPM)	Допомагає ідентифікувати критичні завдання та ресурси.	Не завжди ефективний для проектів зі значними залежностями та змінами у завданнях.	Допомагає ідентифікувати та керувати критичними завданнями в проектах розвитку громад та регіонів, що сприяє точному плануванню та управлінню часовими рамками.
	Дозволяє точно планувати та керувати часовими рамками проекту.	Важко отримати ресурси та витрати.	Може використовуватися для оптимізації часового графіка та уникнення затримок у виконанні проекту.

Постановка завдання. Для підвищення ефективності управління проектами розвитку громад та регіонів пропонується адаптивно-ціннісний підхід, який є інноваційним інструментом вирішення науково-прикладних задач управління проектами з мінливим проектним середовищем, обмеженими ресурсами та особливими вимогами мешканців громад. Мета статті полягає в означенні переваг та можливостей використання адаптивно-ціннісного підходу до управління проектами розвитку громад та регіонів, а також в обґрунтуванні його складових (процесів) та використанні їх на практиці для досягнення результатів підвищення ефективності реалізації зазначених проектів.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах соціально-економічних змін та глобальних викликів, які стоять перед громадами та регіонами, управління проектами розвитку виявляється ключовим напрямом досягнення успіху та стратегічних цілей [20–22]. Однак у зв'язку зі зростаючою невизначеністю та змінами в середовищі, традиційні методи управління проектами можуть виявитися неефективними. У статті пропонується використовувати адаптивно-ціннісний підхід до управління проектами розвитку громад та регіонів, який має низку особливостей, що представлені у табл. 2.

Таблиця 2. Особливості використання адаптивно-ціннісного підходу до управління проектами розвитку громад та регіонів

Table 2. Features of the use of the adaptive value approach to managing the projects of community and regional development

Критерій	Характеристика
Спрямованість на реальні потреби громади	Адаптивно-ціннісний підхід дозволяє активно включати місцеву громаду в процес управління проектом, враховуючи їх потреби, цінності та переваги. Це завдяки створенню ініціатив, які дійсно відповідають вимогам та очікуванням мешканців громад.
Гнучкість	Адаптивно-ціннісний підхід дає змогу швидко реагувати на зміни і адаптувати виконання роботи та формування продукту проекту до нових обставин
Активність громад	Враховання цінності для стейкхолдерів і потреб громади, що сприяє більш активній участі населення громад в обговоренні та формуванні бажаних продуктів проектів
Сталість результатів	Зосередження на цінності продукту проекту для громади може забезпечити більш стійкі та сталі результати розвитку.
Інновації та зміни	Адаптивно-ціннісний підхід сприяє впровадженню інновацій та новаторських ідей у проект розвитку, що дозволяє більш ефективно розвивати громади та регіони і враховувати місцеві потреби.
Управління	Адаптивно-ціннісний підхід сприяє підвищенню ефективності управління проектами, уникає фокусування на досягненні конкретних цілей та результатів.
Інвестиції	Успішні проекти на базі адаптивно-ціннісного підходу можуть залучити більше інвестиційної та фінансової підтримки за рахунок підкреслення значущості та доцільності продукту для громади.

Співпраця та взаємодія	Адаптивно-ціннісний підхід стимулює співпрацю між стейкхолдерами, що сприяє обміну ідеями, ресурсами та найкращими практиками для досягнення спільних цілей.
Ризики	Адаптивне управління проектом дозволяє більш ефективно виявляти, оцінювати та управляти ризиками після завершення процесу, спрямованого на пошук і розв'язання наявних задач.
Ресурси	Адаптивно-ціннісний підхід забезпечує оптимізацію використання ресурсів, узгодження їх із змістом проектів, прогнозування цінності для стейкхолдерів, а також, на відмінну від існуючих підходів, не передбачає виконання адміністративного управління ресурсами.

Адаптивно-ціннісний підхід до управління проектами розвитку громад та регіонів відповідає сучасним викликам і може сприяти більш успішному досягненню результатів – створенню продуктів, які відповідають потребам і цінностям громад та регіонів. Загалом адаптивно-ціннісний підхід до управління проектами розвитку громад та регіонів забезпечує врахування невизначеності та ризиків, що притаманні проектам розвитку, що

забезпечує досягнення цілей та створення максимальної цінності для громад.

Запропонований адаптивно-ціннісний підхід до управління проектами розвитку громад та регіонів передбачає 14 кроків, які відображають вищезначені особливості. Між цими етапами існують взаємозв'язки, які системно зумовлюють визначення цінності з врахуванням змін проектного середовища (рис. 1).

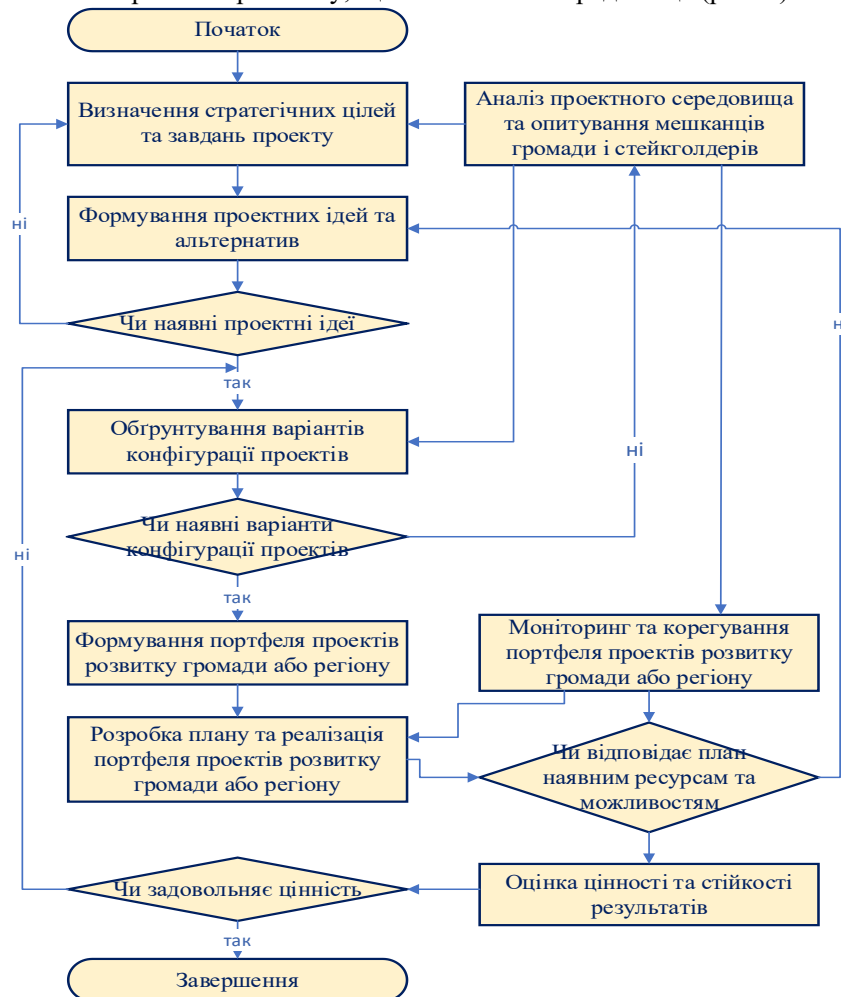


Рис. 1. Алгоритм використання адаптивно-ціннісного підходу до управління проектами розвитку громад та регіонів

Fig. 1. Algorithm for the use of the adaptive value approach to managing the projects of community and regional development

Управлінський процес аналізу проектного середовища та опитування мешканців громади і стейкхолдерів є одним із ключових етапів адаптивно-ціннісного підходу до управління проектами розвитку громад та регіонів. Саме цей етап дозволяє зрозуміти потреби, цінності та очікування цієї громади та інших стейкхолдерів, а також оцінити і врахувати мінливість проектного середовища. Основними особливостями виконання цього етапу є:

1. Глибокий аналіз складових проектного середовища (A_{nc}) забезпечує вивчення всіх аспектів, які можуть вплинути на реалізацію проектів розвитку громади або регіону. При цьому виконується системно-чинниковий аналіз, що передбачає аналіз та синтез таких груп чинників цінності реалізації проекту:

$$A_{nc} = f(V, E_k, C, P, T_n, E_n), \quad (1)$$

де A_{nc} – процес глибокого аналізу складових проектного середовища; V – управлінська група чинників цінності проекту; E_k – економічна група чинників цінності проекту; C – соціокультурна група чинників цінності проекту; P – політична група чинників цінності проекту; T_n – ресурсна група чинників цінності проекту; E_n – технологічна група чинників цінності проекту; E_n – екологічна група чинників цінності проекту.

2. Аналіз інтересів та вигод стейкхолдерів (A_{sc}) дає змогу взяти до уваги погляди та інтереси різних стейкхолдерів, таких як мешканці громади, бізнес-спільнота, громадські організації, місцеві органи влади тощо. Забезпечення їхньої участі в опитуванні та обговоренні ідей розвитку громади допоможе створити більш об'єктивну картину потреб і вимоги до їх цінності.

3. Вибір методів збору інформації та дослідження проектного середовища (B_{mc}) дає змогу виконати процес збору інформації, використовуючи різні методи, такі як опитування різних фокус-груп, інтерв'ю, аналіз документів, спостереження тощо. Важливо обрати ті методи, які найкраще відповідають конкретним завданням і забезпечують високу об'єктивність в умовах заданих громад.

4. Збір якісної інформації (Z_{ji}) під час аналізу проектного середовища забезпечує формування не тільки якісних баз даних, а й отримання з них якісної інформації, яка допоможе зрозуміти особливості проектного середовища, вимоги до цінності та мотивацію стейкхолдерів.

Отже, на етапі I адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів виконується управлінський процес аналізу проектного середовища та опитування мешканців громади, який має такі складові:

$$Stage_I \in (A_{nc}, A_{sc}, B_{mc}, Z_{ji}). \quad (2)$$

Для виконання етапу I адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів існує потреба у використанні такого інструментарію:

1. Анкети для опитування, що дозволяють зібрати кількісні дані про стан проектного середовища та з них отримати інформацію про цінність, потреби та погляди мешканців і стейкхолдерів. Вони можуть бути розроблені у вигляді структурованих анкет або онлайн-форм.

2. Використання фокус-груп дозволяє отримати якісну інформацію для глибшого розуміння поглядів та думок мешканців і стейкхолдерів. Вони можуть бути проведені у форматі обговорень з невеликою групою мешканців і стейкхолдерів.

3. Дослідження наявних статистичних та звітних документів, що забезпечує отримання важливої інформації про наявні зміни проектного середовища та тенденції зміни його складових.

4. Використання геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє візуалізувати географічні дані та аналізувати їх вплив на проекти розвитку громад.

5. Статистичні та аналітичні програмні продукти використовують для обробки та аналізу даних про мінливе проектне середовище.

Використання зазначеного інструментарію на етапі аналізу проектного середовища та опитування стейкхолдерів є важливим кроком для збору об'єктивної й точної інформації, яка потрібна для виконання наступних процесів адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів.

Наступний етап передбачає визначення стратегічних цілей та завдань проектів розвитку громад і регіонів. Цей етап дозволяє чітко сформулювати мету проектів та завдання, які необхідно виконати для досягнення цієї мети. Основними особливостями виконання цього етапу є:

1. Стратегічне бачення (C_b), що забезпечує визначення стратегічних цілей. Це забезпечує бачення про те, яким чином проєкт сприятиме досягненню стратегічних цілей громади або регіону, а також забезпечує врахування довгострокових планів та бачення стейкхолдерів.

2. Чіткість і конкретність (C_k) сформульованих цілей та завдань. Вони мають бути кількісно вимірювані та досяжні, щоб їх можна було оцінити під час реалізації проектів.

3. Залучення стейкхолдерів (Z_c) для формування стратегічних цілей. При цьому важливо

4. враховувати погляди та інтереси різних стейкхолдерів. Їхні думки та погляди можуть бути враховані в процесі визначення цілей та завдань.

Отже, на етапі II адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів виконується управлінський процес визначення стратегічних цілей та завдань проектів розвитку громад і регіонів, який має такі складові:

$$Stage_II \in (C_s, C_k, Z_c). \quad (3)$$

Для виконання етапу II адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів існує потреба у використанні такого інструментарію:

1. SWOT-аналіз забезпечує виявлення сильних і слабких сторінок під час оцінення взаємозв'язку стратегічних цілей, які зумовлюються впливом внутрішніх та зовнішніх чинників впливу проектного середовища на проект.

2. Використання балансових карт допоможе застосувати їх для визначення стратегічних цілей та завдань проектів і встановити ключові показники ефективності, що дозволяють виміряти досягнення цілей.

3. Матриця цілей та завдань, яка дає змогу для кожної стратегічної цілі вказати конкретні завдання, що забезпечує систематизацію та упорядкування вимог до проекту.

4. Аналіз потреб і очікувань стейкхолдерів забезпечує включення їх пропозиції під час визначення цілей та завдань проектів.

5. Бенчмаркінг дає змогу виконати порівняння запропонованих проектів з аналогічними проектами чи кращими практиками, що може допомогти сформуванню стратегічних цілей з врахуванням вимог та стандартів в окремій предметній галузі, яких вони стосуються (медицина, безпека, екологія тощо).

Використання зазначеного інструментарію на етапі визначення стратегічних цілей та завдань проектів забезпечує врахування вимог стейкхолдерів щодо їх цінностей та потреб громади або регіону, а також сформуванню чіткої критерії оцінки виконання проекту.

На етапі формування проектних ідей та альтернатив завжди розглядається обмежена їх кількість, що є одним із вагомих елементів адаптивно-ціннісного підходу до управління проектами розвитку громад та регіонів. Цей етап дозволяє залучити різних стейкхолдерів до генерації ідей та альтернативних рішень для досягнення стратегічних цілей проекту. Основними особливостями виконання цього етапу є:

1. На етапі формування проектних ідей та альтернативного вибору використовують творчий підхід (T_n) до пошуку інноваційних рішень та можливостей для досягнення стратегічних цілей.

2. Залучення різних стейкхолдерів (Z_y), зокрема мешканців громади, експертів, щоб отримати різноманітні погляди та ідеї.

3. Пошук ідей повинен передбачати

аналіз інновацій та передових практик (A_m) у відповідній галузі.

Отже, на етапі III адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів виконується управлінський процес формування проектних ідей та альтернатив, який має такі складові:

$$Stage_III \in (T_n, Z_y, A_m). \quad (4)$$

Для виконання етапу III адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів існує потреба у використанні такого інструментарію:

1. Брейнштормінг – інструмент, який дозволяє групі учасників генерувати без обмежень ідеї та пропозиції. Важливо створити відкрите та сприятливе середовище для обміну думками між учасниками генерування ідей та пропозицій.

2. Після брейнштормінгу необхідно відібрати найбільш перспективні ідеї, використовуючи критерії оцінки, що забезпечує скринінг ідей.

3. Використання SWOT-аналізу дає змогу порівняти сильні та слабкі сторони ідей, а також можливості та загрози їх реалізації.

4. Методологія TRIZ (теорія розв'язання винахідницьких завдань) може бути використана для стимулювання творчого мислення та пошуку інноваційних ідей.

5. На підставі аналізу сценаріїв виконується розгляд різних сценаріїв та альтернативних рішень, що дозволяє оцінити можливість наслідків і вибрати оптимальний сценарій реалізації проекту.

6. Також виконується проєкція впливу реалізації проектів на інші складові проектного середовища. При цьому важливо знити можливий вплив ідей та альтернатив на громаду, екологію, економіку тощо.

Використання цього інструментарію дозволить забезпечити генерацію ідей та альтернатив, які відповідають стратегічним цілям проекту та підтримують інноваційний підхід до розвитку завдань розвитку громади чи регіону.

На наступному етапі IV виконується обґрунтування варіантів конфігурації проектів, що є ключовим процесом в управлінні проектами розвитку громад та регіонів. Цей етап забезпечує виконання аналізу та оцінки різних варіантів реалізації проектів для вибору оптимального способу досягнення стратегічних цілей. Основними особливостями виконання цього етапу є:

1. різних видів та обсягів ресурсів, технологій, стратегій реалізації проектів тощо

2. Оцінка цінності (O_q) забезпечує кількісне визначення вигоди для стейкхолдерів за кожного з варіантів конфігурації проектів та порівняння їх за цінністю.

3. Оцінка ризиків (O_p) забезпечує для кожного з варіантів конфігурації проєктів виконання аналізу та кількісного оцінення ризиків та обґрунтування протиризикових заходів.

4. Соціальна та екологічна оцінка (O_{ce}) забезпечує визначення соціальних та екологічних наслідків від реалізації проєктів для окремих варіантів їх конфігурації.

Отже, на етапі IV адаптивно-ціннісного управління проєктами розвитку громад та регіонів виконується управлінський процес обґрунтування варіантів конфігурації проєктів, який має такі складові:

$$Stage_IV \in (A_{ок}, O_u, O_p, O_p). \quad (5)$$

Для виконання етапу IV адаптивно-ціннісного управління проєктами розвитку громад та регіонів існує потреба у використанні такого інструментарію:

1. Використання фінансових моделей забезпечує визначення цінності, витрат, доходів, чистого прибутку та інших фінансових показників разом із системою ефективності кожного варіанта конфігурації проєктів.

2. Метод аналізу ієрархій (АНР) дозволяє порівняти різні альтернативи конфігурацій проєктів на основі окремих критеріїв та ваг.

3. Аналіз соціального впливу є інструментом, який забезпечить оцінення окремих варіантів конфігурацій проєктів на підставі соціальних досліджень, включаючи впливи на зайнятість та якість життя мешканців громади, або оцінити інші їх аспекти.

4. Аналіз життєвого циклу (LCA) дозволяє отримати оцінення впливу продуктів проєктів на екологію за різних варіантів конфігурації проєктів.

5. Матриця прийняття рішень дає змогу для кожного з варіантів конфігурації проєктів надати ваги за різними критеріями та оцінки їх за цими критеріями.

6. Чутливість аналізу дає змогу визначити, як зміни проєктного середовища впливають на рішення щодо конфігурації проєктів, а також оцінити стійкість заданих варіантів до змін проєктного середовища.

На підставі використання зазначеного інструментарію можна обґрунтувати вибір оптимального варіанта конфігурації проєктів, враховуючи мінливі складові проєктного середовища (фінансові, екологічні, соціальні та інші), та забезпечити отримання максимальної цінності для громади чи регіону.

На етапі V формування портфеля проєктів розвитку громади або регіону виконується процес вибору проєктів у портфель для досягнення стратегічних цілей за обмеженого бюджету або 3 ресурсів. Цей етап може бути підтриманий мате-

матичними моделями і методами, а також розробленими на їх основі алгоритмами та програмним забезпеченням, що забезпечують оптимізацію портфелів проєктів та пришвидшують прийняття рішень. Основними особливостями виконання цього етапу є:

1. Першим кроком є формулювання обмежень (Φ_o), таких як бюджет, зміст, час, ресурси, цінність тощо. При цьому обмеження (Constraints) включають у себе умови, які повинні бути виконані під час формування портфелів проєктів:

$$\sum(C_i \cdot X_i) \leq B_i, \quad (6)$$

де C_i – ресурси, необхідні для реалізації i -го проєкту, X_i – вибраний i -й проєкт, B_i – обмеження на ресурси в i -му проєкті.

2. Кожен із проєктів оцінюється на основі різних критеріїв (O_k), таких як цінність, ризик, очікуваний прибуток тощо.

Розглянемо цінність для стейкхолдерів (Stakeholder Value), яку можна визначити за допомогою формули, яка враховує різні чинники проєктного середовища, які впливають на вигоди стейкхолдерів від реалізації проєкту. При цьому можна використати формулу

$$Stakeholder\ Value = \sum(W_i \cdot F_i), \quad (7)$$

де *Stakeholder Value* – загальна цінність для стейкхолдерів від реалізації портфеля проєктів; W_i – вага (важливість) конкретного стейкхолдера, яка визначається на основі оцінення важливості та впливу стейкхолдера на проєкт; F_i – чинники (оцінка) впливу на конкретного стейкхолдера проєкту, що є числовим значенням або категорією, що вказує на позитивні або негативні тенденції отримання вигод для стейкхолдерів.

Формулу (7) можна адаптувати під конкретний вид проєкту та його стейкхолдерів. При цьому значення W_i та F_i будуть визначатися на основі аналізу та оцінки впливу конкретних чинників на вигоди стейкхолдерів.

Наприклад, розглянемо проєкт створення модульної анаеробної системи для виробництва біоенергії з органічних відходів громади. У цьому проєкті є два основних стейкхолдери – місцева громада та інвестори. Місцева громада є важливою для успіху проєкту, і її показник ваги (важливості) як стейкхолдера становить $W_i = 0,7$, а чинники (оцінка) впливу на зазначеного стейкхолдера проєкту становить $F_i = +0,5$ (позитивний вплив). Щодо інвесторів, їх вага становить $W_i = 0,3$, а вплив оцінюється я

$$F_i = +0,8 \text{ (позитивний вплив).}$$

Загальна цінність для стейкхолдерів у цьому проєкті становитиме:

$$Stakeholder\ Value = (0,7 \cdot 0,5) + (0,3 \cdot 0,8) = 0,35 + 0,24 = 0,59$$

Таким чином, загальна цінність проекту становить 0,59, що вказує на позитивні вигоди для стейкхолдерів від реалізації зазначеного проекту.

3. Формулювання цільової функції вибору проектів ($\Phi_{цф}$), які мають бути включені в портфель для максимізації цінності або оптимізації заданого критерію, наприклад, ризику, прибутку чи ефективності. Цільова функція (Objective Function) виглядає як функція, яка максимізує або мінімізує суму вагових оцінок проектів:

$$Z = \sum(W_i \cdot P_i), \quad (8)$$

де Z – значення цільової функції; W_i – вага проекту; P_i – оцінка проекту.

Вага проекту (W_i) в цільовій функції для вибору проектів у портфелі може представляти значущість або вагомість кожного проекту у відношенні до заданого критерію або мети портфеля. Можна використовувати такі критерії, як максимізація цінності, мінімізація ризику, максимізація прибутку чи оптимізація ефективності. Цей показник може бути визначеним за допомогою аналітичних методів, таких як аналіз чутливості, аналіз ризику, метод аналізу ієрархій або інших моделей. Наприклад, вагу проекту (W_i) можна призначити на підставі кількісних метрик, таких як показник прибутку, ризику або внутрішньої норми прибутку (IRR).

За допомогою математичних методів оптимізації (наприклад, лінійного програмування, цілочисельного програмування, динамічного програмування) визначається оптимальний склад портфеля проектів, який задовольняє обмеження та максимізує (мінімізує) цільову функцію. На основі результатів оптимізації вибирається оптимальний портфель проектів для реалізації на території громади чи регіону.

Отже, на етапі V адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів виконується управлінський процес вибору проектів у портфель, який має такі складові:

$$StageV \in (\Phi_o, O_k, \Phi_{цф}). \quad \dots\dots\dots(9)$$

На наступному етапі VI, що стосується процесів розробки плану та реалізації портфеля проектів розвитку громади або регіону розробляються плани і графіки, підбираються ресурси та виконавці і відбувається фактичне виконання проектів. Основними особливостями виконання цього етапу є:

1. Кожен проект у портфелі потребує власного плану (P_n), який включає в себе розподіл завдань, графік виконання, витрати, кількість ресурсів, потребу у виконавцях тощо.

2. Визначення потреби у ресурсах (B_n) дає змогу забезпечити те, що ресурси для кожного проекту, включаючи фінанси, людські ресурси, технології, матеріали тощо, задовольнятимуть

вимоги до виконання окремих етапів та завдань.

3. Кожному завданню та етапу проекту призначається відповідний виконавець або команда (P_e), які відповідають за його виконання.

4. Розробка графіків і встановлення віх (P_{cv}) у життєвому циклі проектів забезпечує встановлення часових рамок для кожного проекту, включаючи дати початку і завершення, а також базових віх (критичні події або точки контролю).

5. Моніторинг і контроль (M_k) здійснюється впродовж реалізації проектів завдяки виконанню систематичного моніторингу та контролю відповідності плану реалізації проектів. Це дає змогу виявляти відхилення від плану проектів та вживати вчасних коригувальних заходів щодо змін у реалізації проектів.

6. Планування цінності та ризиків ($P_{цр}$) забезпечує проведення аналізу та кількісного оцінення цінності і ризиків, які можуть виникнути під час реалізації проектів, та розробку планів реагування на їх зміни.

7. Регулярне створення звітів ($C_{зв}$) про хід реалізації проектів, які надсилаються стейкхолдерам і забезпечують прозорість та відповідальність.

Отже, на етапі VI адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів виконується управлінський процес розробки плану та реалізації портфеля проектів, який має такі складові:

$$StageVI \in (P_n, B_n, P_{cv}, M_k, P_{цр}, C_{зв}). \quad \dots\dots\dots(10)$$

Етап VI передбачає детальне планування та реалізацію кожного проекту в портфелі з метою досягнення стратегічних цілей громади чи регіону з максимальною цінністю для стейкхолдерів та оптимальним використанням ресурсів. На цьому етапі використовується інструментарій для ефективного планування, керування ресурсами, виконання процесів моніторингу та контролю проектів. Існує потреба у використанні такого інструментарію:

1. Використання спеціальних програм для проектного менеджменту, наприклад Microsoft Project, Trello, Asana або Jira, дозволяє розробляти графіки проектів, відображати завдання, визначати критичні шляхи, інтегрувати командну роботу та генерувати звіти.

2. Використання комп'ютерних програм для фінансового планування та обліку бюджетів для кожного проекту, а також визначення фінансових результатів та оцінення цінності для

3. стейкхолдерів. З метою врахування особливостей проектного середовища окремих видів проектів існує потреба в розробленні такого інструментарію.

4. Для ефективного управління людськими, матеріальними та іншими ресурсами наявні спеціальні інструменти для ресурсного плану

вання, які допомагають визначати потреби в ресурсах, розподілити ресурси та спостерігати за їх використанням. Для цього використовують системи ERP, такі як SAP, Oracle, Microsoft Dynamics, які дозволяють ефективно використовувати матеріальні і фінансові ресурси. Також використовують системи управління проектами (Project Management Software), такі як Microsoft Project, Asana, Trello. Ці системи дозволяють призначати завдання командам і виконавцям, визначати терміни виконання та відстежувати виконання окремих етапів проектів.

5. Для ідентифікації, оцінки та управління ризиками під час реалізації проектів застосовуються спеціальні інструменти, до яких належать:

✓ матриця ризиків (Risk Matrix) – це інструмент для визначення ймовірності та впливу ризиків на проекти. Ризики поділяють на категорії та оцінюють за окремою шкалою вірогідності їх виникнення;

✓ аналіз сценаріїв (Scenario Analysis) – цей інструмент дозволяє проаналізувати різні сценарії розвитку подій та їх вплив на проекти. Він також забезпечує розроблення плану дій у разі виникнення ризикованих ситуацій;

✓ системи трекінгу ризиків (Risk Tracking Systems) можуть вести облік ризиків, їх статус та заходи, вжиті для їх усунення. Вони можуть надавати звіти та сповіщення про зміни в стані ризиків;

✓ математичні моделі ризиків (Risk Models) використовують для прогнозування ризиків та їх впливу на результати проектів. Наприклад, моделі симуляції або статистичні моделі для аналізу ризиків;

✓ аналіз ризиків із використанням інструменту Cost Risk Analysis дозволяє знизити ризики при оцінці вартості проекту. Він виявляє, які ризики можуть вплинути на бюджет, та дає змогу розширення додаткових резервів, як реакції на ризики.

Вибір інструментарію на цьому етапі полягає в тому, щоб забезпечити системну організацію та контроль реалізації проектів, забезпечити доступ до важливої інформації та спростити процес прийняття рішень для кращої ефективності та досягнення стратегічних цілей громади або регіону.

На наступному етапі VII моніторингу та коригування портфеля проектів розвитку громади або регіону забезпечується постійний нагляд за ходом виконання проектів, змінами в їх проектному середовищі, а також оцінюється їх відповідність стратегічним цілям і завданням. Цей етап має на меті забезпечити ефективне виконання проектів, вчасне виявлення змін та небажаних відхилень від виконання проектів і можливостей

для коригування, а також можливостей максимізації цінності для громади чи регіону. Основними особливостями виконання цього етапу є:

1. На початку етапу моніторингу фіксуються ключові показники цінності для стейкхолдерів (P_{ic}) та вони відстежуються під керівництвом проектного менеджера чи проектного офісу. Це передбачає перевірку виконання, витрат, якості отриманих результатів виконання робіт і формування продуктів проектів.

2. На цьому етапі постійно проводиться оцінка ризиків (A_p), які можуть виникнути в ході виконання проектів, а також можливостей для вдосконалення. Виявлені ризики можуть вплинути на затримки в графіку виконання робіт, збільшення витрат тощо.

3. Для ефективного моніторингу виконання проектів виконують збір даних та аналітику (Z_{da}) стану проектів і проектного середовища. Для цього можуть використовуватися автоматизовані системи, які збирають дані про витрати, виконання завдань і дані про результати формування продуктів проектів.

4. Порівняння актуального стану проектів з планами (P_{cn}), щоб визначити відхилення. Якщо проект відстає від графіка або виходить за бюджет, необхідне коригування. На основі результатів моніторингу та аналізу обґрунтовуються заходи щодо коригування планів або змісту виконання проектів. Це може передбачати зміни в графіку, перерозподіл ресурсів, заходи для зменшення ризиків або заходи для підвищення ефективності реалізації проектів.

5. Регулярна звітність і комунікація (Z_k) з усіма стейкхолдерами є ключовою складовою на цьому етапі. Результати оцінення стану проектів, наявні ризики та заходи для коригування повинні бути доступні для всіх стейкхолдерів.

6. За потреби виконується оновлення стратегії (O_c) розвитку громади або регіону на основі нових знань та результатів моніторингу. Важливо здійснювати управління змінами, що дозволяє ефективно впроваджувати корективи та зміни під час реалізації проектів.

Отже, на етапі VII адаптивно-ціннісного управління проектами розвитку громад та регіонів виконується управлінський процес розробки плану та реалізації портфеля проектів, який має такі складові:

$$Stage VII \in (P_{ic}, A_p, Z_{da}, P_{cn}, Z_k, O_c). \dots\dots\dots(11)$$

Етап моніторингу та коригування портфеля проектів розвитку громади або регіону є постійним процесом, який сприяє досягненню успішних результатів та адаптації до змін у проектному середовищі. Інструментарій для етапу

моніторингу та коригування портфеля проєктів розвитку громади або регіону охоплює різноманітні засоби та програмні рішення для збору, аналізу та управління даними про проєкти та їх стан проєктного середовища. До них належать:

- ✓ системи управління проєктами (Project Management Software) – Microsoft Project, Jira, Trello або Asana, що дозволяють вести облік та моніторинг проєктів, встановлювати завдання, контролювати виконання графіків та витрати;

- ✓ системи управління ризиками (Risk Management Software) – спеціалізовані програмні рішення, наприклад, RiskWatch, RiskMinds, що допомагають виявляти, оцінювати та вирішувати ризики на рівнях проєктів та їх портфелів. Вони можуть забезпечувати аналіз сценаріїв та моделювання ризиків;

- ✓ дашборди та системи звітності (Dashboards and Reporting Systems) можна використовувати під потреби, що дають змогу візуалізувати дані про стан проєктів і ризики. Вони дозволять проєктним менеджерам та стейкхолдерам швидко оцінювати відхилення й ухвалювати відповідні рішення;

- ✓ аналітичні інструменти (Analytics Tools) для аналізу даних та виявлення тенденцій зміни складових проєктів та їх проєктного середовища. Це можуть бути програмні продукти для візуалізації та аналізу даних, такі як Tableau або Power BI;

- ✓ системи управління портфелями (Portfolio Management Systems), що забезпечують централізоване управління портфелями проєктів, враховуючи стратегічні цілі, обмеження та пріоритети. Прикладами таких інструментів є Planview, Project Portfolio Management (PPM) тощо;

- ✓ інструменти відстеження ресурсів (Resource Tracking Tools) забезпечують виконання процесів відстеження ресурсів, таких як людські, матеріальні та фінансові, та їх розподіл між окремими проєктами. До них належать ResourceGuru, Smartsheet;

- ✓ інструменти для ресурсного планування (Resource Planning Tools) забезпечують визначення потреб у ресурсах, їх розподіл та спостереження за їх використанням у реальному часі. До них належать Clarizen.

Під час вибору інструментів слід враховувати те, що вони повинні забезпечити ефективний моніторинг та коригування проєктів у портфелі розвитку громади чи регіону, щоб досягти стратегічних цілей та максимально збільшити цінність для стейкхолдерів.

У результаті виконаних досліджень нами здійснено формування проєктних ідей та альтернатив для портфелів проєктів розвитку громади,

що передано у табл. 3.

У табл. 3 подано загальні ідеї та їх альтернативи для проєктів розвитку громад у різних сферах. Конкретний вибір проєктів і альтернатив залежатиме від потреб конкретної громади, її ресурсів і цілей. Важливо провести аналіз цінності для стейкхолдерів, а також соціальні дослідження для кожного окремого проєкту перед його реалізацією.

На підставі даних табл. 3 сформовано варіанти конфігурації проєктів розвитку громад у різних сферах. Використовуючи представлений вище підхід для кожного з варіантів конфігурації проєктів визначено показники доцільності їх включення у портфель розвитку громади, які наведено у табл. 4.

У табл. 4 представлені дані про проєкти в різних сферах розвитку громади, їх бюджети, цінність для стейкхолдерів, чинники впливу та визначена придатність до включення в портфель проєктів. Аналіз таблиці проєктів показує, що всі запропоновані проєкти в різних сферах розвитку громади мають високий потенціал для включення в портфель. Вони мають важливу цінність для стейкхолдерів та позитивні чинники впливу. Однак вибір конкретних проєктів до портфеля обмежується його загальним бюджетом та іншими можливими обмеженнями. Приймаємо, що громада на реалізацію проєктів може залучити 2000 тис. \$. Провівши розрахунки за формулами (6) – (8), ми сформуваємо раціональний портфель проєктів розвитку громади (рис. 2).

На рис. 2 проєкти розташовано в порядку зниження цінності для громади. Встановлено, що для умов заданої громади портфель її розвитку охоплюватиме 4 проєкти (проєкт 5 – створення природного заповідника та відновлення місцевої екосистеми, проєкт 3 – встановлення відеоспостереження в громадських місцях, проєкт 6 – розбудова системи переробки органічних відходів та проєкт 4 – розширення програми патрулювання добровільними формуваннями) загальним бюджетом 1700 тис. \$ та сумарною цінністю для стейкхолдерів – 1,96. Такий портфель забезпечує отримання максимальної цінності для стейкхолдерів.

Для врахування невизначеності та ризиків, що властиві проєктам розвитку громад, пропонується застосовувати методи моделювання ризиків, такі як метод Монте-Карло. Це дозволяє оцінити вплив ризиків на цільову функцію портфеля, а також врахувати невизначеності та ризики при виборі проєктів. Однак цей процес є достатньо трудомістким і для кожного виду проєктів, які означено в нашому прикладі, слід розробляти свою модель та проводити відповідні дослідження.

Таблиця 3. Результати формування проєктних ідей та альтернатив для портфелів проєктів розвитку громади
Table 3. The results of the formation of the project ideas and alternatives for portfolios of community development projects

Сфера розвитку громад	Категорія проєкту	Проєктна ідея	Альтернативи
Медицина	Охорона здоров'я населення	Розбудова лікарні із сучасним обладнанням	Розширення сімейної медицини, підвищення медичної грамотності населення
	Екстрена медична допомога	Створення мережі надання першої невідкладної допомоги	Покращання системи «112» і підготовка персоналу
Безпека	Захист від злочинності	Встановлення відеоспостереження в громадських місцях	Розширення програми патрулювання добровільними формуваннями
	Профілактика пожежної безпеки	Заміна застарілих пожежних споруд та навчання населення правил пожежної безпеки	Створення добровольчих пожежних формувань на території громади та покращання комунікації
Екологія	Збереження природи та біорозмаїття	Створення природного заповідника та реставрація місцевої екосистеми	Програма зменшення викидів CO ₂ та підтримка використання альтернативних джерел енергії
	Переробка органічних відходів	Розбудова системи переробки органічних відходів із застосуванням сучасних технологій	Реструктуризація системи використання відходів та регулярний моніторинг стану накопичення та використання відходів

Таблиця 4. Результати формування варіантів конфігурації проєктів для портфеля розвитку громади та визначення показників доцільності їх включення у портфель
Table 4. The results of the formation of the project configuration options for the community development portfolio and determination of indicators of feasibility of their inclusion in the portfolio

Сфера розвитку громади	Проєкт (назва)	Бюджет, B_i , тис. \$	Цінність для стейкхолдерів, W_i	Чинники впливу, F_i	Придатність до підключення в портфель
Медицина	Проєкт 1. Розбудова лікарні із сучасним обладнанням	1000	0,35	+0,5	Так
Медицина	Проєкт 2. Розширення сімейної медицини, підвищення медичної грамотності населення	800	0,36	+0,6	Так
Безпека	Проєкт 3. Встановлення відеоспостереження в громадських місцях	500	0,56	+0,7	Так
Безпека	Проєкт 4. Розширення програми патрулювання добровільними формуваннями	400	0,42	+0,6	Так
Екологія	Проєкт 5. Створення природного заповідника та відновлення місцевої екосистеми	700	0,56	+0,8	Так
Екологія	Проєкт 6. Розбудова системи переробки органічних відходів	600	0,42	+0,7	Так

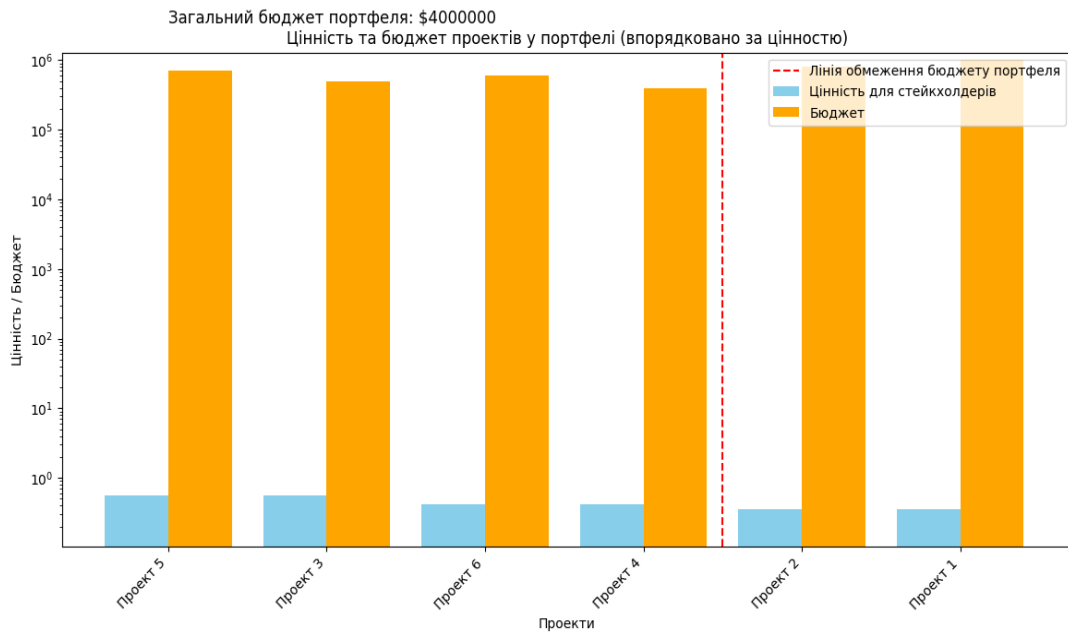


Рис. 2. Результати формування портфеля проектів розвитку громади
Fig. 2. The results of the formation of a portfolio of community development projects

Запропонований адаптивно-ціннісний підхід забезпечує розв'язання науково-прикладних задач управління портфелями проектів розвитку громад та регіонів. Він враховує мінливе проектне середовище, обмежені ресурси та особливі вимоги мешканців громад. У подальшому для використання адаптивно-ціннісного підходу до управління проектами розвитку громад та регіонів слід розробляти систему підтримки прийняття рішень для проектних менеджерів, яка забезпечить пришвидшення виконання зазначеного управлінського процесу та підвищення ефективності реалізації портфелів.

Висновки. 1. Виконаний аналіз стану питання в теорії та практиці реалізації проектів розвитку громад та регіонів свідчить про надзвичайну їх актуальність на сьогодні для України. Для проектного та портфельного управління наявні методології та підходи, кожен із яких має свої контекстні переваги та недоліки. Наявність недоліків існуючих методологій та підходів свідчить про доцільність розроблення такого підходу, який забезпечить їх усунення під час управління проектами розвитку громад та регіонів. Для цього пропонується розробити адаптивно-ціннісний підхід, який забезпечить врахування особливостей та специфіки таких проектів та дасть змогу врахувати сучасні реалії громад, що лежать в основі ефективного управління проектами їх розвитку.

2. Запропонований адаптивно-ціннісний підхід до управління проектами розвитку громад та регіонів відповідає сучасним викликам і сприяє успішному досягненню результатів – створенню

продуктів, які відповідають потребам і цінностям громад та регіонів. Ним враховуються невизначеність та ризики, що притаманні проектам розвитку громад, а також забезпечується досягнення цілей та створення максимальної цінності для стейкхолдерів. На підставі адаптивно-ціннісного підходу розроблено алгоритм управління проектами розвитку громад та регіонів, який передбачає 14 кроків, що відображають виконання процесів з обґрунтованими їх особливостями. Між цими етапами існують взаємозв'язки, які системно зумовлюють формування портфелів проектів із максимальною їх цінністю та врахуванням змін проектного середовища.

3. У результаті виконаних досліджень сформовано проектні ідеї та їх альтернативи для портфелів проектів розвитку громади. На підставі цього сформовано варіанти конфігурації проектів розвитку громад у різних сферах, а також використовуючи представлений вище підхід для кожного з цих варіантів визначено показники доцільності включення проектів у портфель розвитку громади. Встановлено, що всі запропоновані проекти в різних сферах розвитку громади мають високий потенціал для включення в портфель, оскільки забезпечують отримання цінності для стейкхолдерів та мають позитивні впливи чинників проектного середовища. Для умов заданої громади портфель її розвитку охоплюватиме 4 проекти (проект 5 – створення природного заповідника та відновлення місцевої екосистеми, проект 3 – встановлення відеоспостереження в громадських місцях, проект 6 – розбудова системи переробки органічних відходів та проект 4 – розширення програми

патрулювання добровільними формуваннями) загальним бюджетом 1700 тис. \$ та сумарною цінністю для стейкхолдерів – 1,96. Такий портфель забезпечує отримання максимальної цінності для стейкхолдерів. Подальші дослідження слід проводити в напрямі розробки системи підтримки прийняття рішень для проектних менеджерів, яка базуватиметься на запропонованому адаптивно-ціннісному підході до управління проектами розвитку громад та регіонів, а також забезпечить пришвидшення виконання управлінських процесів та підвищить ефективність реалізації портфелів.

Бібліографічний список

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Анализ методологий управления проектами. URL: <http://infostart.ru/public/296315/> (Last accessed: 17.08.2023).
9. ISO 21500:2012. Guidance on Project Management. URL: www.mosaicprojects.com.au/PDF/ISO_21500_Communique_No1.pdf (Last accessed: 02.06.2023).
10. Moore: Управління портфелем проєктів. URL: <http://surl.li/bsklv> (Last accessed: 11.07.2023).
11. P2M: модель управління інноваційними проєктами. URL: <https://studfiles.net/preview/1851808/#10> (Last accessed: 20.07.2023).
12. PMBOK vs PRINCE2 vs Agile project management. URL: https://www.cio.com.au/article/402347/pmbok_vs_prince2_vs_agile_project_management/ (Last accessed: 22.07.2023).
13. 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.
14. Бушуев С. Д., Харитонов Д. А. Ценностный подход в управлении развитием сложных систем. *Управління розвитком складних систем: зб. наук. праць КНУБА*. Київ, 2010. Вип. 1. С. 10-15.
15. Азарова І. Б. Ціннісно-орієнтований підхід в управлінні інвестиційно-будівельними проєктами житлового будівництва: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.22. Харків, 2016. 145 с.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Forecasting the risk of the resource demand for dairy farms basing on machine learning / A. Tryhuba et al. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. 2631. P. 327–340.

Стаття надійшла 30.08.2023

**ІНЖЕНЕРІЯ БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ ТА БЕЗПЕКИ
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**

УДК 614.8

**АНАЛІЗ СТАНУ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ ЯК ПЕРЕДУМОВА
УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ФОРМУВАННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ПОДІЙ**

**Іван Городецький¹, к. т. н., Василь Тимочко¹, к. т. н., Мирон Магац¹, к. т. н.,
Ігор Мазур¹, к. с.-г. н., Андрій Березовецький¹, к. т. н., Михайло Мазурак²**

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

²*Львівська філія УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого,
вул. Л. Мартовича, 15, смт Магерів, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна*

**Городецький І., Тимочко В., Магац М., Мазур І., Березовецький А., Мазурак М. Аналіз стану
виробничого травматизму як передумова управління процесами формування небезпечних подій**

Охарактеризовано проблему нещасних випадків і травматизму на виробництві в Україні та світі. За даними Державної служби статистики України (Держстату), за останні роки щорічно зростає загальна кількість травмованих: 4040 – у 2018 р., 4394 – у 2019 р., 6646 – у 2020 р. і 12315 – у 2021 р. Також, за статистичними даними, кількість важких травмувань з летальними наслідками аналогічно зростає: 275 у 2018 р., 410 у 2019 р., 393 у 2020 р. і 537 у 2021 р. За даними Міжнародної організації з питань праці, серед лідерів кількості нещасних випадків/травматизму з летальними наслідками (на 100 тис. працівників) є Куба (показник 25), Бурунді (13,8), Єгипет (10,7), Коста Ріка (9,7), Філіппіни (9,6). Проаналізовано стан досліджень виробничого травматизму в окремих галузях нагляду: сільське господарство, машинобудування, енергетика, автомобільний транспорт. Охарактеризовано особливості термінології травматизму в нормативних актах та формах Держстату. На основі інформації Державної служби статистики України, Державної служби України з питань праці (Держпраці) та Фонду соціального страхування України проаналізовано стан травматизму за 2018-2021 рр. в окремих галузях (сільське господарство, машинобудування, енергетика, автомобільний транспорт). Наголошено на особливостях небезпечних і шкідливих виробничих чинників аналізованих галузей та їх ролі у формуванні травмонебезпечних ситуацій. Встановлено динаміку виробничого травматизму за останні роки за досліджуваними галузями: постачання електроенергії 143 – у 2018 р., 162 – у 2019 р., 150 – у 2020 р., 149 – у 2021 р.; сільське і лісове господарство відповідно 272, 337, 243, 250; транспорт, складське господарство – 391, 404, 395, 386, переробна промисловість – 1112, 1014, 813, 875. Усього за роками було відповідно 4040, 4394, 6646 і 12315 травмованих осіб. Встановлено групи причин страхових нещасних випадків: організаційні – 66,8%; психофізіологічні – 18,4 %, технічні – 11,9 %; техногенні, природні, екологічні та соціальні – 0,7 %; інші (не належать до жодної із зазначених груп) – 2,2 %. Наголошено на ролі роботодавця в управлінні процесами формування травмонебезпечних подій, удосконаленні функцій управління безпекою праці: планування, організація, мотивація, контроль заходів щодо запобігання небезпечним ситуаціям, аваріям, нещасним випадкам.

Ключові слова: виробничий травматизм, сільське господарство, машинобудування, енергетика, автомобільний транспорт, управління безпекою.

**Horodetskyi I., Tymochko V., Mahats M., Mazur I., Berezovetskyi A., Mazurak M. Analysis of the state of
occupational injury as a prerequisite for managing the processes of dangerous events formation**

The article provides characteristics of the problem of accidents and injuries at work in Ukraine and the world. According to the State Statistics Service of Ukraine, the total number of injured people has been increasing annually in recent years: 4,040 in 2018, 4,394 in 2019, 6,646 in 2020, and 12,315 in 2021. Moreover, according to statistical data, the number of severe injuries with fatal consequences is similarly increasing: 275 in 2018, 410 in 2019, 393 in 2020, and 537 in 2021. According to the International Labor Organization, Cuba (25), Burundi (13.8), Egypt (10.7), Costa Rica (9.7), and the Philippines (9.6) are among the leaders in the number of fatal accidents/injuries. The state of research on industrial injuries in certain branches of supervision is analyzed, particularly in agriculture, mechanical engineering, power engineering, and road transport. The peculiarities of the terminology of traumatism in normative acts and forms of the State Statistics Service are characterized. Based on the information from the State Statistics Service of Ukraine, the State Labor Service of Ukraine, and the Social Insurance Fund of Ukraine, the state of injuries for 2018-21 was analyzed in the branches according to the specialties trained at the Faculty. The features of dangerous and harmful production factors of the analyzed areas and their role in the formation of traumatic situations are emphasized. The dynamics of industrial injuries in recent years in the studied industries were established: electricity supply 143 in 2018, 162 in 2019, 150 in 2020, 149 in 2021; agriculture and forestry, respectively 272, 337, 243, 250; transport, warehousing 391, 404, 395, 386, processing industry 1112, 1014, 813, 875,

respectively. Groups of causes of the insurance accidents were established: organizational – 66.8 % of accidents; psychophysiological – 18.4 %, technical – 11.9 %; technogenic, natural, ecological, and social – 0.7 %; others (do not belong to any of the specified groups) – 2.2 %. Emphasis is placed on the role of the employer in managing the processes of formation of traumatic events and improving the civil safety management functions: planning, organization, motivation, and control of measures to prevent dangerous situations and accidents.

Key words: occupational injury, agriculture, mechanical engineering, power engineering, road transport, safety management.

Постановка проблеми. Проблема травмування на виробництві є досить актуальною з часів початків трудових відносин і до сьогодні, оскільки під час виконання різних видів робіт виникає і впливає на працівників низка небезпечних і шкідливих виробничих чинників. Різні виробничі операції характеризуються множиною небезпечних рухомих і нерухомих робочих зон, небезпечних дій, умов, обставин, що призводять до формування травмонебезпечних ситуацій, а далі аварій, травмувань, професійних захворювань. Кількість виробничих нещасних випадків за останні роки як в Україні, так і у світі є значною. За даними Державної служби статистики України, за останні роки щорічно зростає загальна кількість травмованих: 4040 – у 2018 р., 4394 – у 2019 р., 6646 – у 2020 р. і 12315 – у 2021 р. За статистичними даними, кількість травмувань аналогічно зростає: 275 у 2018 р., 410 у 2019 р., 393 у 2020 р. і 537 у 2021 р. [20]. Найбільш травмонебезпечними є гірничя, переробна промисловість, яка містить галузі машинобудування, сільське і лісове господарство, постачання електроенергії, а також галузь транспорту із засобами підвищеної небезпеки – автомобілями. Так, щорічно у світовому вимірі від аварій на дорогах гинуть близько 1,35 млн осіб, від такого стану країни втрачають близько 3 % внутрішнього валового продукту [1]. За даними Міжнародної організації з питань праці, серед лідерів кількості нещасних випадків/травматизму на 100 тис. працівників є Коста Ріка (9421), Швеція (8005), Нідерланди (5200), Нікарагуа (4891), Фінляндія (4025) і Аргентина (3310); за кількістю виробничих травм з летальними наслідками (на 100 тис. працівників) лідером є Куба (показник 25), Бурунді (13,8), Єгипет (10,7), Коста Ріка (9,7), Філіппіни (9,6) і Зімбабве (9,5) [23]. За даними Відділу статистики праці Департаменту праці США кількість летальних нещасних випадків коливається від 4700 до 5190 за 2011–2021 рр., що відповідає показнику виробничих травм з летальними наслідками у межах 2,7–3,5 (на 100 тис. працівників) за аналогічний період [22]. Для аналізу в статті підібрано галузі нагляду відповідно до спеціальностей факультету механіки, енергетики та інформаційних технологій Львівського національного університету природо користування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Умови праці, обставини і небезпечні дії працівників, інші проблеми, що призводять до

виникнення виробничого травматизму, досліджують як в Україні, так і за кордоном [1–5; 8; 9; 11–13; 22; 23; 25]. Пошуки спрямовані як на аналіз причин травматизму, так і на розроблення заходів запобігання процесам формування травмонебезпечних і аварійних ситуацій під час основних і допоміжних виробничих операцій у різних галузях.

Автори [2; 8] досліджували проблеми ризиків електротравмування на об'єктах підприємств електричних станцій, підстанцій та ефективних мереж надвисокої напруги сфери управління Міністерства енергетики України, де експлуатують велику кількість силового та комутаційного обладнання, яке потребує реконструкції та ремонтних робіт. Зазначено, що найбільша кількість нещасних випадків зі смертельними наслідками в енергетичній галузі була від ураження електричним струмом (55 % від загальної кількості). Тому вдосконалення управління охороною праці в енергетичній галузі повинно передбачати мінімізацію ризиків електротравматизму в електроустановках надвисоких класів напруги, впровадження замкнутого циклічного інформаційного контуру, який містить послідовність логічно обґрунтованих рішень, спрямованих на мінімізацію ризику електротравм та професійно зумовлених захворювань від електричної енергії; для оцінювання ризику електротравматизму доцільно застосовувати причинно-наслідкову модель ризику електротравмування персоналу під час технічного обслуговування та ремонту електроустановок тощо.

Щодо травматизму на транспорті, то автори [9; 24; 26] характеризують і наголошують на причинах дорожніх транспортних пригод (ДТП) у Польщі, зокрема на технічному стані колісних транспортних засобів і найпоширенішій причині аварій – недоліках системи освітлення, що погіршують оглядовість дороги, несправності в гальмівній системі. Встановлено, що кількість ДТП і кількість травмованих у них за роками зростають; зростає також кількість травмованих дітей до 14 років, а також кількість нетверезих учасників руху (наприклад, у Поморському воєводстві найгірші показники). Автор [24] проаналізував летальні випадки на дорогах Польщі залежно від віку пасажирських автомобілів і визначив, що автомобілі віком до 5 років найкраще захищають водіїв, тобто важкі травмування у ДТП виникають у три рази більше з автомобілями, старшими 5 років.

З метою запобігання аваріям автори [1; 9] проаналізували причини травматизму на транспорті і встановили, що за останні роки в Україні основними причинами ДТП і пов'язаного з ними травматизму було перевищення безпечної швидкості, проблеми під час маневрування, порушення правил проїзду на перехрестях, недостатня дистанція на дорозі, на пішохідних переходах тощо. До найпоширеніших небезпечних подій належать перевищення безпечної швидкості руху транспортного засобу і порушення правил проїзду пішохідних переходів. Динаміка травматизму під час дорожньо-транспортних пригод має негативну тенденцію зростання від 24294 до 26141 випадку за останні три роки, а прогнозування показало подальше їх збільшення. Тому потрібно планувати і запроваджувати захисні заходи – законодавчі, управлінські, технічні, організаційні тощо.

Щодо досліджень травматизму в сільському господарстві, то автори [4; 13] встановили, що у галузі тваринництва велике значення для запобігання травмонезбезпечним ситуаціям мають знання поведінки тварин, небезпек операцій, пов'язаних з ними, застосування необхідних технологій та методів захисту (додаткове обладнання, огороження, загони, стійла, контроль вмісту шкідливих газів, пилу, інших речовин у приміщеннях для утримання тварин закритого типу, вентиляційна система, якісне прибирання, застосування засобів індивідуального захисту як тіла, так і органів дихання тощо).

Також автори [3; 14; 19] досліджували специфіку сільськогосподарського виробництва, яка впливає на виробничий травматизм. Вони встановили найбільш травмонезбезпечний період року – третій квартал (час жнив і початок осінніх польових робіт) і запропонували посилити контроль у кварталі, який передуює періоду найбільш інтенсивних сільськогосподарських робіт, що дасть змогу усунути недоліки з питань охорони праці та промислової безпеки; удосконалити організацію безпеки робіт на транспорті; контролювати технічний стан і безпеку виробничих об'єктів, засобів виробництва, роботу трактористів-машиністів та водіїв транспортних засобів; забезпечити повноцінне навчання та перевірку знань з питань охорони праці за найбільш травмонезбезпечними професіями чи видами робіт в АПК [7; 12].

Аналіз динаміки виробничого травматизму в галузі машинобудування [5; 11; 21] показав, що тут є певний стійкий рівень як за загальною кількістю травмованих, так і летального. Автори наголошують на умовах праці, що не відповідають санітарно-гігієнічним нормам, на недостатньому забезпеченні засобами індивідуального захисту; великій кількості машин, механізмів,

транспортних засобів, які потребують покращання стану безпеки, наявності виробничих будинків і споруд в аварійному стані тощо. Відповідно загалом в Україні рівень травматизму в машинобудівній галузі залишається досить високим, тому заходи безпеки мають гармонійно поєднуватись як з технологічними процесами, так і з конкретними діями працівників на робочих місцях – є необхідність системного підходу до аналізу виробничого травматизму, комплексного застосування різних методів для розробки конкретних, науково обґрунтованих рекомендацій з профілактики нещасних випадків.

Постановка завдання. Завданням статті є аналіз динаміки виробничого травматизму окремих галузей в Україні і прогнозування травмонезбезпечних подій на майбутнє, а також аналіз причин, що призводять до формування травмонезбезпечних і аварійних ситуацій і, відповідно, планування запобіжних заходів для зниження кількості нещасних випадків.

Виклад основного матеріалу. Виробничий травматизм є одним з основних понять охорони праці, що характеризує рівень безпеки технологічних операцій та процесів і є сукупністю виробничих травм відповідної галузі, виду діяльності чи підприємства за певний період. Поняття травми і травматизму означені в ДСТУ 2293:2014 [6]. Виробнича травма – це порушення анатомічної цілісності й функцій органів тіла людини внаслідок ушкодження їх небезпечними чинниками виробництва, тобто йдеться про розвиток процесів формування небезпечних та аварійних ситуацій з негативними наслідками. Залежно від чинників впливу травми бувають механічні, термічні, хімічні, електричні тощо.

У законодавстві поняття виробничої травми не означено, а подія, що призводить до травмування, або нещасний випадок на виробництві визначено як «Порядком розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві» [15], так і Законом України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [17].

У згаданому законі «нещасний випадок – обмежена в часі подія або раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора чи середовища, що сталися в процесі виконання ним трудових обов'язків, внаслідок яких заподіяно шкоду здоров'ю працівника або настала його смерть».

Інше визначення значно розширене, викладене в Порядку розслідування: «Нещасний випадок – обмежена в часі подія або раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора чи середовища, що сталися у процесі виконання

ним трудових обов'язків або в дорозі (на транспортному засобі підприємства чи за дорученням роботодавця), внаслідок яких заподіяно шкоду здоров'ю, зокрема від одержання поранення, травми, у тому числі внаслідок тілесних ушкоджень, гострого професійного захворювання (отруєння) та інших отруєнь, одержання сонячного або теплового удару, опіку, обмороження, а також у разі утоплення, ураження електричним струмом, блискавкою та іонізуючим випромінюванням, одержання інших ушкоджень внаслідок аварії, пожежі, стихійного лиха (землетрусу, зсуву, повені, урагану тощо), контакту з представниками тваринного та рослинного світу, які призвели до втрати працівником працездатності на один робочий день чи більше або до необхідності переведення його на іншу (легшу) роботу не менш як на один робочий день, зникнення тощо». Таке деталізоване незакінчене визначення, що містить також згадування професійного захворювання (отруєння – хоча у цьому документі також окремо визначено цей термін), деякі повторення можна пояснити характером документа як інструкції до дії за умови настання відповідної події.

Окремо варто зазначити визначення гострого професійне захворювання (отруєння). Згідно з Положенням, це захворювання (або смерть), що виникло після однократного (протягом не більш як однієї робочої зміни) впливу на працівника шкідливих факторів фізичного, біологічного та хімічного характеру (у тому числі інфекційні, паразитарні, алергійні захворювання). Відомо, що виробничі чинники, які призводять до гострого погіршення стану здоров'я, є небезпечними, а не шкідливими, як зазначено у визначеннях. Щодо інших термінів, які призводять до травматизму, а саме аварія, пожежа, стихійне лиха, то вони означені в Кодексі цивільного захисту [10]. Зокрема, у визначення аварії як «...небезпечної події техногенного характеру, що спричинила ураження, травмування населення або створює на окремі території чи території суб'єкта господарювання загрозу життю або здоров'ю населення та призводить до руйнування будівель, споруд, обладнання і транспортних засобів, порушення виробничого або транспортного процесу чи спричиняє наднормативні, аварійні викиди забруднюючих речовин та інший шкідливий вплив на навколишнє природне середовище» також варто додати про небезпечний, а не тільки шкідливий вплив, адже йдеться про «наднормативні, аварійні викиди забруднюючих речовин».

Розслідування небезпечних подій (нещасних випадків) дає змогу встановити причини їх формування й розвитку, а статистичні дані – аналізувати стан виробничого травматизму за галузями у динаміці та планувати запобіжні заходи.

Для аналізу підібрано галузі відповідно до спеціальностей факультету: 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» – постачання електроенергії; 208 «Агроінженерія» – сільське господарство; 133 «Галузеве машинобудування» – переробна промисловість; 274 «Автомобільний транспорт» – транспорт, складське господарство.

Облік нещасних випадків ведуть як підприємства, у яких сталися такі випадки, так і територіальні органи Пенсійного фонду України, представники яких брали участь у розслідуванні. Облік нещасних випадків та/або гострих професійних захворювань (отруєнь), що сталися з особами, які допущені до роботи без оформлення трудового договору (контракту), ведуть роботодавці, з якими встановлено факт перебування потерпілого у трудових відносинах. Нещасні випадки та/або гострі професійні захворювання (отруєння), а також аварії, що сталися на виробництві, реєструють у журналі за відповідною формою. Держпраці та Пенсійний фонд України надають дані щодо нещасних випадків та професійних захворювань на виробництві Держстату для державного статистичного спостереження. Розподіл кількості потерпілих від нещасних випадків (гострих професійних захворювань (отруєнь), аварій) та від нещасних випадків з летальними наслідками (Л) за даними актів Н-1, пов'язаних з виробництвом, подано у табл. відповідно до інформації Державної служби статистики України, Державної служби України з питань праці та Фонду соціального страхування України [18; 20]. Також варто зазначити, що Державна служба статистики періодично змінює форми подання матеріалу, об'єднує види економічної діяльності у розділи, секції, змінює кількість таблиць. Тому є певні труднощі для аналізу стану травматизму в динаміці за роками, його причинами і, відповідно, управління ними.

Аналіз стану безпеки виробничих операцій під час експлуатації енергетичного обладнання за минулі роки на основі показників травматизму дає змогу встановити рівень небезпечних умов, дій чи обставини, що призвели до травмонезбезпечних ситуацій. Основною проблемою в галузі постачання електроенергії є шкідлива та небезпечна дії електричного струму на працівників, оскільки вони експлуатують електроустановки, працюють у небезпечних зонах електромагнітного поля, електричної дуги, статичної електрики тощо, тобто виконують роботи підвищеної небезпеки. Їхня робота пов'язана з обслуговуванням, управлінням, застосуванням технічних засобів праці або технологічних процесів, що характеризуються підвищеним ступенем ризику виникнення аварій, загрози життю, можливої шкоди здоров'ю та довкіллю [2; 8; 16]. Загалом дія електричного струму

на живу тканину, на відміну від інших шкідливих та небезпечних чинників (хімічних речовин у різних агрегатних станах, випромінювання тощо), має своєрідний характер. Під час проходження електричного струму організмом людини спостерігають термічний, електролітичний, механічний (динамічний) впливи, які є фізико-хімічними процесами в живій та неживій матерії; також електричний струм спричинює біологічний вплив на живі тканини.

У результаті зазначених та інших процесів в енергетиці, зокрема, що стосуються постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря, сталося зростання від 136 до 213 травмованих осіб (рис. 1). До загальної оцінки дані за 2022 р. враховувати не варто, оскільки в умовах війни як окреме обладнання, так і загалом потужності галузі енергетики зазнали значних руйнувань, не властивих для мирного часу. На рис. 1 подано результати статистичних досліджень травматизму за останні роки в галузі енергетики і прогнозування нещасних випадків.

Таблиця. Динаміка виробничого травматизму за окремими галузями
Table. Dynamics of occupational injuries in certain industries

Галузь нагляду	2018 р.		2019 р.		2020 р.		2021 р.		2022 р.	
	Всього -го	в т.ч. «Л»	Всього -го	в т.ч. «Л»	Всього -го	в т.ч. «Л»	Всього -го	в т.ч. «Л»	Всього -го	в т.ч. «Л»
Постачання електроенергії	143	11	162	21	150	19	149	13	213	31
Сільське і лісове господарство	272	40	337	65	243	45	250	47	211	50
Транспорт, складське господарство	391	41	404	62	395	51	386	40	365	55
Переробна промисловість	1112	58	1014	73	813	58	875	57	-	-
Усього	4040	275	4394	410	6646	393	12315	537	4877	437

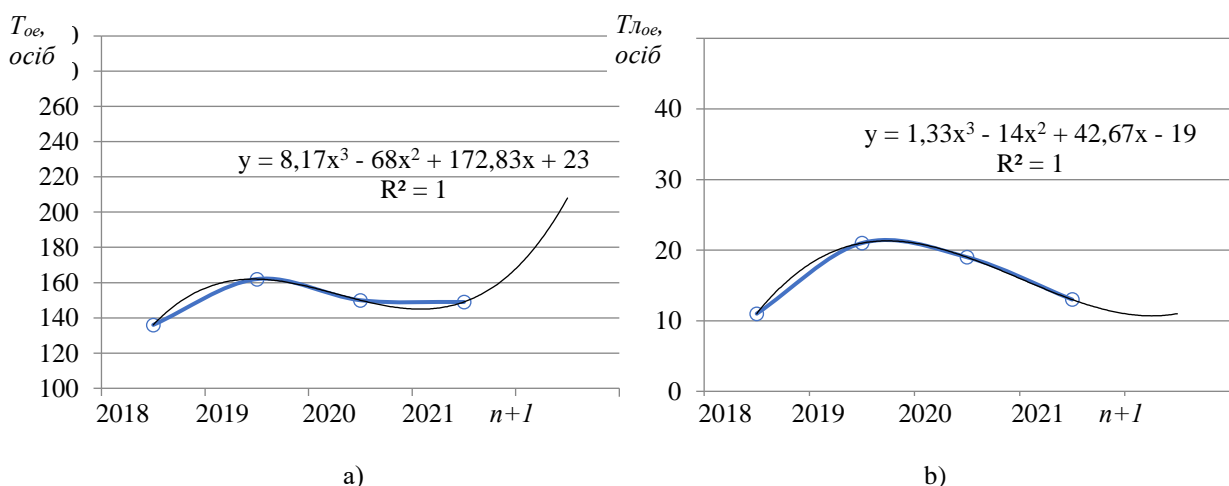


Рис. 1. Оцінка динаміки і прогнозування травматизму в галузі енергетики: а – кількість травмованих осіб (T_{oe}); б – кількість травмованих осіб з летальними наслідками (T_{loe})
Fig. 1. Assessment of the dynamics and prediction of injuries in the field of energy: а – the number of injured persons (T_{oe}); б – the number of injured persons with fatal consequences (T_{loe})

Графічні й аналітичні залежності показують динаміку за минулі роки і прогнозування травматизму в галузі енергетики. Показники прогнозували за допомогою засобів MS EXCEL зі зміною аналізованого явища на один період у майбутньому. Динаміка загального і важких (з летальними наслідками) випадків травматизму (див. рис. 1) показує, що поміж низкою галузей (див. табл.) кількість травмованих є найменшою, однак негативним є те, що рівень формування травмонезбезпечних ситуацій є стабільними, зокрема стосовно важких травм із тенденцією до зростання. Травматизм описано поліноміальними функціями з відповідною достовірністю апроксимації. Прогнозування вказує на зростання травматизму, що свідчить про потребу вдосконалення управління умовами та безпекою праці під час експлуатації енергетичного обладнання і загалом управління процесами формування небезпечних подій.

Статистичні дані показали, що досить небезпечним є сільськогосподарське виробництво (повна назва секції – Сільське господарство, лісове господарство та рибне господарство), як одна з основних складових агропромислового комплексу, де за останні роки було 243–337 травмованих осіб, зокрема 40–65 з летальними наслідками. Небезпечні події часто виникають через низку особливих видів робіт з підвищеною небезпекою в сільському господарстві: роботи, пов'язані з виробництвом, зберіганням, транспортуванням та застосуванням агрохімікатів, пести-

цидів; управління тракторами і самохідним технологічним устаткуванням; роботи на цукрових заводах з обслуговування центрифуг і транспортерів; роботи у силосах, призначених для різної сільськогосподарської продукції, у вагонах-зерновозах; обслуговування і ремонт аспіраційних та пневмотранспортних систем на підприємствах зі зберігання і переробки зерна; розвантаження, складання і зберігання зернових та олійних культур, висівок, макухи і шротів насипом і в затареному вигляді; обслуговування бугаїв-плідників, кнурів і жеребців тощо. Тобто досить поширеними є шкідливі і небезпечні чинники, якими складно управляти з огляду на особливості сільського господарства [3; 7; 13; 19].

Аналогічно, як і для галузі енергетики, побудовано графічні залежності з аналітичними виразами (рис. 2), що описують розвиток явища в динаміці з прогнозуванням на один період у майбутньому.

Динаміка загального і важких (з летальними наслідками) випадків травматизму (див. рис. 2) показує, що кількість травмованих різко зросла у 2018 р., а далі знизилася, рівень формування травмонезбезпечних ситуацій почав зростати у 2021 р., зокрема стосовно важких травм. Травматизм описано логарифмічними функціями, лінія з летальними наслідками показує зростання, що свідчить про потребу вдосконалення управління умовами та безпекою праці у сільському та лісовому господарстві. Частка травматизму в рибному господарстві є незначною – за 2018 р. травмованих не було, у сільському господарстві було 226 потерпілих, а у лісовому та лісозаготівлях – 46 осіб.

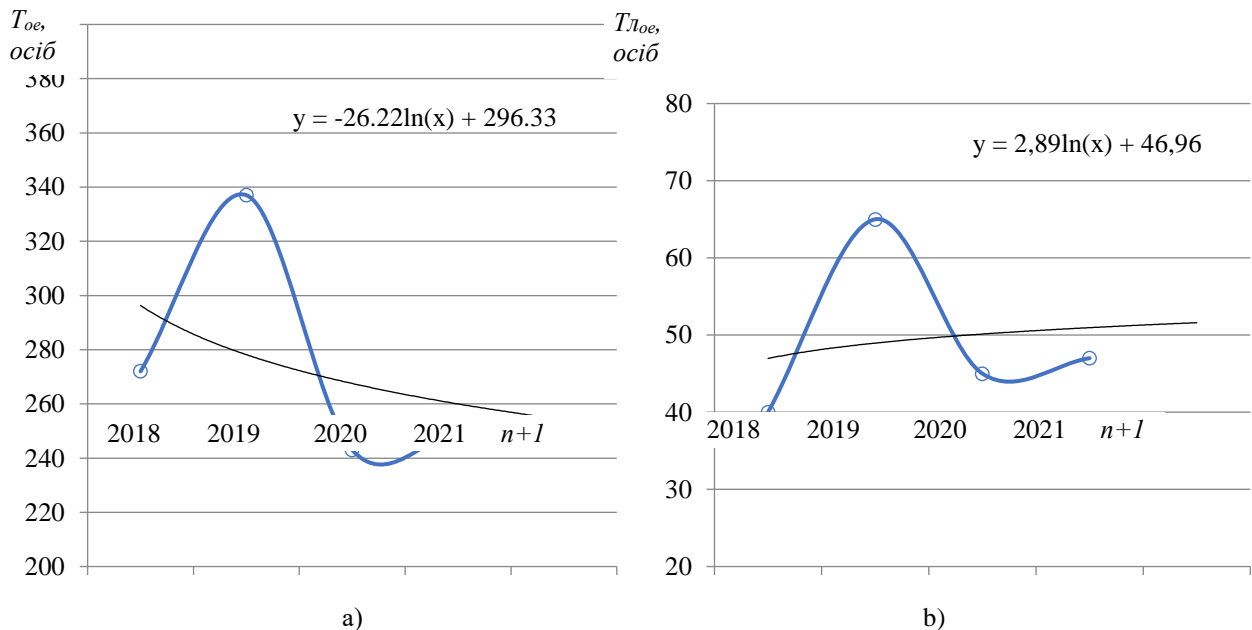


Рис 2. Оцінка динаміки і прогнозування травматизму в галузі сільського і лісового господарства: а – кількість травмованих осіб; б – кількість травмованих осіб з летальними наслідками

Fig. 2. Assessment of the dynamics and prediction of injuries in the field of agriculture and forestry: a – the number of injured persons; b – the number of injured persons with fatal consequences

Аналіз стану безпеки виробничих операцій у галузі транспорту та складського господарства за минулі роки на основі показників травматизму дає змогу встановити рівень небезпечних умов, дій чи обставини, що призвели до травмонебезпечних ситуацій. Основними небезпеками в галузі є притаманні галузі дорожньо-транспортні пригоди (через перевищення безпечної швидкості – зростання на 25,2 і 31,8 %); порушення правил маневрування; порушення правил проїзду пішохідних переходів; порушення правил проїзду перехресть; недотримання дистанції; керування транспортним засобом у

нетверезому стані тощо [1]), а також технічні – конструктивні недоліки та недостатня надійність транспортних засобів, їх незадовільний технічний стан тощо, організаційні – порушення вимог безпеки транспортних процесів, недотримання режимів праці та відпочинку, невикористання засобів індивідуального захисту тощо, психофізіологічні – важкість та напруженість праці, алкогольне сп’яніння тощо. Зазначені та інші шкідливі і небезпечні виробничі та невиробничі чинники призвели до значної кількості випадків травмувань у галузі транспорту (у межах 365-404 за аналізований період – рис. 3).

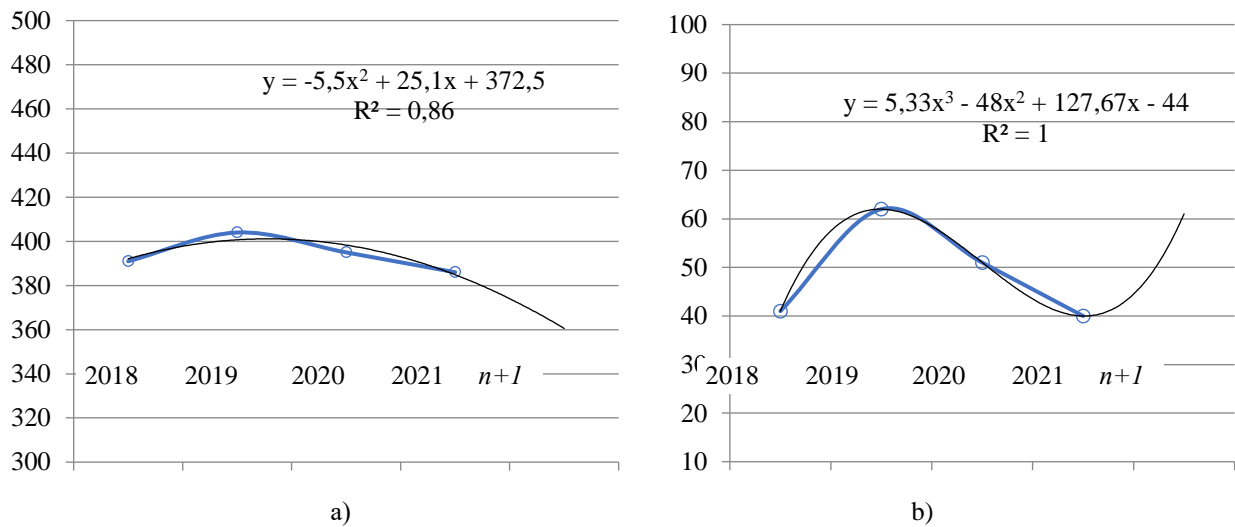


Рис. 3. Оцінка динаміки і прогнозування травматизму в галузі транспорту: а – кількість травмованих осіб; б – кількість травмованих осіб із летальними наслідками

Fig. 3. Assessment of the dynamics and prediction of injuries in the field of transport: a – the number of injured persons; b – the number of injured persons with fatal consequences.

Динаміка загального і важких (із летальними наслідками) випадків травматизму в галузі (див. рис. 3) показує стабільний стан, тобто рівень процесів формування травмонебезпечних ситуацій коливається в зазначених межах. Травматизм описано поліноміальними функціями із задовільною достовірністю апроксимації, лінія тренду з прогнозуванням на один період кількості травмованих осіб з летальними наслідками показує зростання, тому заходи з удосконалення управління умовами та безпекою праці у галузі транспорту є актуальними.

Щодо галузі машинобудування, яка деталізована в секції «Переробна промисловість» статистичного спостереження і містить такі підгалузі – металургійне виробництво, нафтопереробка, виробництво гумових і пластмасових виробів, виробництво електричного устаткування та електронної продукції, виробництво машин і устаткування, автотранспортних засобів, причепів, ремонт і монтаж машин і устаткування тощо, які характеризуються роботами підвищеної небезпеки, відповідно тут є значна кількість випадків травмування (у межах 813–1112). Дослі-

дження безпеки праці в галузі вказують на такі небезпечні і шкідливі виробничі чинники: фізичні: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, теплове випромінювання); неіонізуючі електромагнітні поля і випромінювання (електростатичні поля, постійні магнітні поля, електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, електромагнітні випромінювання оптичного діапазону (зокрема лазерне та ультрафіолетове); іонізуючі випромінювання; виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення – природне (відсутність або недостатність), штучне (недостатня освітленість, надмірна, пульсація освітленості); хімічні і біологічні – речовини хімічного походження, біологічної природи, отримані хімічним синтезом; фактори трудового процесу (важкість і напруженість праці) [5; 11; 21].

Динаміка загального і важких (з летальними наслідками) випадків травматизму (рис. 4) показує, що кількість травмованих за роками

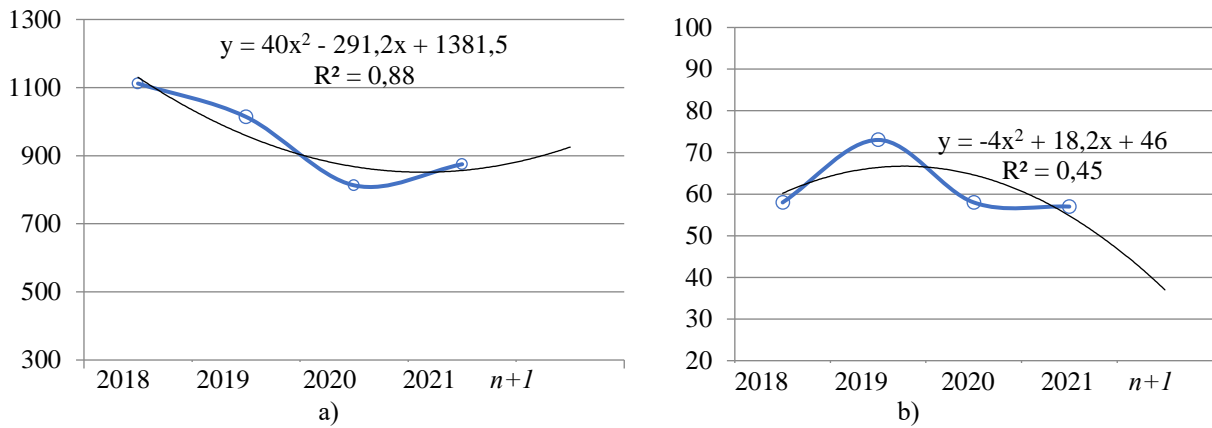


Рис. 4. Оцінка динаміки і прогнозування травматизму в машинобудуванні: а – кількість травмованих осіб; б – кількість травмованих осіб з летальними наслідками

Fig. 4. Assessment of the dynamics and prediction of injuries in the field of machine building industry: a – the number of injured persons; b – the number of injured persons with fatal consequences

знижується, але залишається однією з найвищих серед аналізованих галузей, також значний високий рівень важких травм, що призвів до летальних наслідків (57–73 особи). Травматизм описано поліноміальними функціями із задовільною достовірністю апроксимації, лінія тренду кількості травмованих осіб з летальними наслідками показує прогноз на один період у майбутньому.

Щодо останнього показника кількості потерпілих від нещасних випадків (гострих професійних захворювань (отруєнь), аварій (див. табл.), то за останні роки встановлено тенденцію до зростання від 4040 травмованих осіб до 12315 у 2021 р. Реальні виробничі показники зростали у 2018 та 2019 роках (+8,7 % загальний і +19 % летальні наслідки). Значне зростання у 2020–2021 рр. (у 1,5–3 рази) сталося внаслідок пандемії коронавірусу COVID-19, яка суттєво вплинула на життєдіяльність у всьому світі. Щодо професій, то найбільше за 2019 р. травмувалися водії автотранспортних засобів (238). Найвищий рівень виробничого травматизму був серед працівників віком від 50 до 59 років (1157 осіб, що складає 26,3 % від загальної кількості травмованих в Україні) [18; 20].

За даним Фонду соціального страхування, щодо причин страхових нещасних випадків, то тут переважає група організаційних – 66,8 % (2933) нещасних випадків; через психофізіологічні причини сталося 18,4 % (810) нещасних випадків, через технічні причини – 11,9 % (525) нещасних випадків. Окремо виділяють техногенні, природні, екологічні та соціальні причини – 0,7 % (29) нещасних випадків та інші причини (не належать до жодної із зазначених груп) – 2,2 % (97) нещасних випадків. Протягом 2019 року порівняно з 2018 роком питома вага кількості страхових нещасних випадків з організаційних причин залишилась без змін (66,8 %), з психофізіологічних причин – зменшилась на 2,5 % відсоткового пункта (з 20,9 % до 18,4 %), з

технічних причин – зменшилась на 0,4 % відсоткового пункта (з 12,3 % до 11,9 %). Питома вага кількості страхових нещасних випадків зі смертельним наслідком з організаційних причин збільшилась на 3,4 % відсоткового пункта (з 70 % до 73,4 %), з психофізіологічних причин – зменшилась на 3,2 % відсоткового пункта (з 14,9 % до 11,7 %), з технічних причин – зменшилась на 2,7 % відсоткового пункта (з 15,1 % до 12,4 %) [18].

Для деталізації причини варто зазначити, що найпоширенішими організаційними були: невиконання вимог інструкцій з безпеки праці – 36,9 % від загальної кількості травмованих осіб в Україні (1621 особа); невиконання посадових обов'язків – 8,1 % (355 травмованих осіб); порушення вимог безпеки під час експлуатації транспорту загального користування (автомобільного, залізничного та ін.) – 7,9 % (345 осіб); порушення технологічного процесу – 3,3 % (144 особи); порушення вимог безпеки під час експлуатації машин, механізмів, обладнання тощо – 2,5 % (112 травмованих осіб); інші організаційні причини – 1,4 % (60 травмованих осіб).

Найпоширенішими психофізіологічними причинами були: особиста необережність потерпілого – 11,6 % від загальної кількості травмованих осіб в Україні (511 травмованих осіб); травмування внаслідок протиправних дій інших осіб – 5,6 % (245 осіб); незадовільний стан здоров'я – 0,5 % (24 травмовані особи).

Найпоширенішими технічними причинами стали: незадовільний технічний стан виробничих об'єктів, споруд, інженерних комунікацій, території – 4,1 % від загальної кількості травмованих осіб в Україні (178 травмованих осіб); незадовільний технічний стан засобів виробництва – 1,7 % (75 осіб); інші технічні причини – 1,6 % (69 травмованих осіб); недосконалість технологічного процесу, його невідповідність вимогам безпеки – 1,3 % (59 травмованих); конс

труктивні недоліки, недосконалість, недостатня надійність засобів виробництва – 1,2 % (54 травмовані особи).

Важливе значення, поряд з причинами, мають події, які призвели до страхових нещасних випадків. Такими травмонебезпечними подіями були: падіння потерпілого під час пересування – 21,2 % (930 травмованих осіб від загальної кількості травмованих в Україні); дія рухомих, обертових деталей обладнання, машин і механізмів – 12,1 % (533 особи); падіння потерпілого з висоти – 8,4 % (369 осіб); дорожньо-транспортна пригода на дорогах (шляхах) загального користування – 7,8 % (343 особи); навмисна травма, заподіяна іншою особою, – 5,2 % (228 осіб); падіння устаткування (обладнання) або його конструктивних елементів – 4,1 % (182 особи).

Для сільськогосподарського виробництва важливим є вплив біологічних небезпек. Порівняно з 2018 роком за 2019 рік кількість страхових нещасних випадків через ушкодження внаслідок контакту з тваринами, комахами та іншими представниками флори і фауни збільшилася на 18,8 % (з 69 до 82).

Для всіх аналізованих галузей важливим є показник безпеки експлуатації машин, механізмів та обладнання (за 2019 р. було 1045 випадків, зокрема 143 – смертельно, що становить 23,8 % від загальної кількості травмованих в Україні). Традиційно до устаткування, використання якого найчастіше призводить до нещасних випадків, пов'язаних з виробництвом, належать автомобілі

– 4,8 % від загальної кількості травмованих в Україні (209 травмованих осіб); автомобілі спеціалізовані, автопоїзди, автомобілі-тягачі, кузови-фургони, причепа, автотранспортувачі, мотоцикли, велосипеди – 2,9 % (129 осіб).

Варто зазначити, що, незважаючи на заходи інформування та популяризації, було травмовано на виробництві у стані алкогольного сп'яніння 120 осіб (2,7 % від загальної кількості травмованих в Україні), при цьому 46 осіб отримали важкі травми.

Управління процесами формування травмонебезпечних подій повинно ґрунтуватися на постійному моніторингу стану справ безпеки виробництва на етапах від ініціалізації проєкту до його завершення. Аналіз причин виробничого травматизму вказує на недостатню роботу в цьому напрямі, очевидні і приховані недоліки, які призводять до зростання за останні роки пов'язаних з виробництвом травмувань працівників.

У разі настання нещасних випадків та/або гострих професійних захворювань (отруєнь), аварій роботодавець зобов'язаний проаналізувати причини і небезпечні події за підсумками кварталу, півріччя, року і розробити та виконати план заходів щодо запобігання в майбутньому поді

бним нещасним випадкам та/або гострим професійним захворюванням (отруєнням), аваріям, а також згідно із законодавством притягнути до відповідальності працівників за порушення вимог законодавства про охорону праці. Також Державна служба України з питань праці та Пенсійний фонд України з їх територіальними органами, профспілками перевіряють відповідно до компетенції ефективність роботи з профілактики нещасних випадків та/або гострих професійних захворювань (отруєнь), аварій і вживають заходів до усунення виявлених порушень вимог нормативних актів згідно із законодавством.

Окремо варто наголосити про роль роботодавця в управлінні процесами формування травмонебезпечних подій. Отже, роботодавець згідно з вимогами законодавства у сфері цивільного захисту та охорони праці повинен затвердити: план заходів щодо запобігання аваріям із зазначенням відомостей про можливі аварії, інші надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру, прогнозуванням наслідків, діяльності підрозділів та засобів для їх ліквідації, а також окреслення строків таких заходів. У підприємстві повинен бути план локалізації та ліквідації аварій, де зазначають відомості про всі можливі аварії та інші надзвичайні ситуації, дії посадових осіб і працівників підприємства (установи, організації) в разі їх виникнення, обов'язки особового складу аварійно-рятувальних служб або працівників інших підприємств (установ, організації), яких залучають до ліквідації наслідків аварій (надзвичайних ситуацій). У разі, коли аварія сталася через проєктні помилки або конструктивні недоліки устаткування, роботодавець зобов'язаний надіслати підприємству (установі, організації) – розробникові та виробникові такого устаткування обґрунтовані рекламації, їх копії – органам управління підприємством (установою, організацією), у разі їх відсутності відповідному органу місцевої держадміністрації. Поряд з функцією планування, також важливе значення мають інші функції – організація та координація робіт, мотивація діяльності, контроль за виконанням організаційних і технічних заходів.

Висновки. Охарактеризовано проблему нещасних випадків і значного травматизму на виробництві в Україні та світі. Наголошено про зростання загальної кількості травмованих: 4040 – у 2018 р., 4394 – у 2019 р., 6646 – у 2020 р. і 12315 – у 2021 р., а також кількості важких травмувань з летальними наслідками: 275 у 2018 р., 410 у 2019 р., 393 у 2020 р. і 537 у 2021 р. У світі лідерів кількості нещасних випадків/травматизму на 100 тис. працівників є Коста Ріка (9421), Швеція (8005), Нідерланди (5200), Нікарагуа (4891); за кількістю виробничих травм з летальними

наслідками – Куба (показник 25), Бурунді (13,8), Єгипет (10,7), Коста Ріка (9,7), Філіппіни (9,6). Проаналізовано стан досліджень виробничого травматизму в окремих галузях наглядку: сільське господарство, машинобудування, енергетика, автомобільний транспорт. Охарактеризовано особливості термінології травматизму в нормативних актах та формах документів Держстату. Наголошено на особливостях небезпечних і шкідливих виробничих чинників аналізованих галузей і їх ролі у формуванні травмонебезпечних ситуацій. Показано динаміку виробничого травматизму за останні роки за галузями: постачання електроенергії 143 – у 2018 р., 162 – у 2019 р., 150 – у 2020 р., 149 – у 2021 р.; сільське і лісове господарство відповідно 272, 337, 243, 250; транспорт, складське господарство – 391, 404, 395, 386, переробна промисловість – 1112, 1014, 813, 875. Усього за роками було відповідно 4040, 4394, 6646 і 12315 випадків. Також виконано оцінку динаміки і прогнозування травматизму на один період у майбутньому – графічні і аналітичні залежності показують динаміку в галузях енергетики, сільського і лісового господарства, машинобудування та транспорту. Причинами страхових нещасних випадків були відповідно: організаційні – 66,8% нещасних випадків; психофізіологічні – 18,4 %, технічні – 11,9 % нещасних випадків; окремо виділено техногенні, природні, екологічні та соціальні причини – 0,7 %; інші (не належать до жодної із зазначених груп) – 2,2 %. Наголошено на ролі роботодавця в управлінні

процесами формування травмонебезпечних подій, удосконаленні функцій управління цивільною безпекою: планування, організація, мотивація, контроль заходів щодо запобігання небезпечним ситуаціям, аваріям, нещасним випадкам. У разі настання нещасних випадків та/або гострих професійних захворювань (отруень), аварій роботодавець зобов'язаний проаналізувати причини і небезпечні події за підсумками кварталу, півріччя, року і розробити та виконати план заходів щодо запобігання у майбутньому подібним нещасним випадкам та/або гострим професійним захворюванням (отруєнням), аваріям, а також згідно із законодавством притягнути до відповідальності працівників за порушення вимог законодавства про охорону праці.

Бібліографічний список

1. Аналіз динаміки причин дорожньо-транспортних пригод і прогнозування небезпечних подій / І. Городецький, В. Тимочко, І. Мазур, І. Городецький, А. Березовецький. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Агроінженерні дослідження*. 2021. № 25. С. 182–188. doi: 10.31734/agroengineering2021.25.182.
2. 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: 10.31649/1997-9266-2021-156-3-18-23.
3. Визначення ризику травмування під час тракторних робіт на основі дефектоскопічного контролю / О. Войналович, В. Тимочко, О. Гнатюк, І. Городецький. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2019. № 23. С. 131-136. doi: [10.31734/agroengineering2019.23.131](https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.131).
4. Використання методів менеджменту безпеки процесів в аграрному виробництві / І. М. Городецький, І. Б. Мазур, Н. Г. Городецька, Ю. О. Ковальчук. *Вісник Львівського національного аграрного університету. Агроінженерні дослідження*. 2013. № 17. С. 35-39.
5. Гунченко О. М., Касьянова К. М. Дослідження проблеми вибору рішень в системі управління охороною праці (СУОП) машинобудівного підприємства. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2008. № 6 (124), ч. 2. С. 161-165.
6. ДСТУ 2293:2014. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. URL: http://web.kpi.kharkov.ua/safetyofliving/wp-content/uploads/sites/171/2017/10/dstu_2293_2014.pdf (дата звернення: 21.04.2023).
7. Інформаційно-аналітична довідка Держпраці про підвищення ефективності здійснення державного нагляду за станом охорони праці на підприємствах сільського господарства. Київ: Держ. служба України з питань праці, 2016. 60 с.
8. Інформація про травматизм на підприємствах паливно-енергетичного комплексу. URL: <https://mev.gov.ua/storinka/informatsiya-pro-travmatyzm-na-pidpryemstvakh-palyvno-enerhetychnoho-kompleksu> (дата звернення: 28.04.2023).
9. Коваленко Л. О. Основні причини скоєння дорожньо-транспортних пригод та їх наслідки. *Вісник ХНАДУ*. 2019. Вип. 86, т. 2. С. 94-98. doi: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.86.2.94.
10. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення: 21.04.2023).
11. Левченко О. Г., Ільчук О. С. Аналіз та оцінка стану виробничого травматизму в галузі машинобудування. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Гірництво*. 2016. Вип. 30. С. 171-176.
12. Малихін О. В., Таїрова Т. М. Звіт про науково-дослідну роботу. Визначення впливу кількісних та якісних показників наглядкової діяльності на рівень виробничого травматизму залежно від специфіки галузей виробництва. Київ: ДУ «ННДІПБОП», 2014. 135 с.
13. Охорона праці, професійні захворювання та травматизм у сільському господарстві / І. Москалюк, М. Сакун, О. Безалтична, А. Москалюк, В. Пуріч. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2022. Вип. 102-103. С. 33-39. doi: 10.37000/abbsl.2022.102.07.
14. Оцінка професійного ризику працівників хімічного захисту рослин обприскуванням / В.

Тимочко, І. Городецький, А. Березовецький, В. Войналович, О. Вісин. Вісник Львівського національного університету природокористування. Агроінженерні дослідження. 2022. № 26. С. 185–194. doi: 10.31734/agroengineering2022.26.185.

15. 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: 21.04.2023).

16. Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0011-98#Text> (дата звернення: 28.04.2023).

17. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14#n344> (дата звернення: 21.04.2023).

18. Профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань. URL: <http://www.fssu.gov.ua/fse/control/main/uk/publish/article/968023> (дата звернення: 22.04.2021).

19. Радіонов М. О., Козловська Т. Ф. Підвищення ефективності здійснення державного нагляду за станом охорони праці на підприємствах сільського господарства. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Екологічна безпека. 2018. Вип. 1/2018 (108). С.136-146. doi: 10.30929/1995-0519.2018.1.136-146.

20. Статистичні дані виробничого

травматизму за галузями у 2018–2021 рр. URL: <http://dsp.gov.ua/статистичні-дані-виробничого-травма-2/> (дата звернення: 22.04.2023).

21. 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. 187-195. doi: 10.31734/agroengineering2018.01.187.

22. News release. Bureau of Labor Statistics US Department of Labor. URL: <https://www.bls.gov/news.release/pdf/cfoi.pdf> (дата звернення: 21.04.2023).

23. Occupational safety and health indicators. URL: <https://ilostat.ilo.org/topics/safety-and-health-at-work/> (дата звернення: 21.04.2023).

24. Sicińska K. Age of a Passenger Car and Its Influence on Accidents With Fatalities in Poland. Transport Problems. 2019. Vol. 14, iss. 1. P. 105-113. doi: 10.21307/tp.2019.14.1.10.

25. The configurations coordination of the projects products of development of the community fire extinguishing systems with the project environment / [A.](#) Tryhuba, [R.](#) Ratushny, [I.](#) Horodetskyy, [Y.](#) Molchak, [V.](#) Grabovets. CEUR Workshop Proceedings. 2021. № 2851. P. 238–248.

26. Zielińska E. Bezpieczeństwo ruchu drogowego w Polsce. Вісник Національного транспортного університету. Серія “Технічні науки”. 2016. Вип. 2 (35). С. 245-251.

Стаття надійшла 08.05.2023

ДЛЯ ПОДАТК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

Агроінженерні дослідження

№ 27

Редактор: Д. Б. Дончак
Коректори: Н. В. Скосарьова, М. Б. Опир
Технічний редактор: О. Є. Проць

Перелік наукових фахових видань України, категорія «Б» (технічні науки)
Накази МОН України № 409 від 17.03.2020 р., № 886 від 02.07.2020 р.
і № 1166 від 23.12.2022 р.

Наукове видання індексується в наукометричних базах даних:
Google Scholar; Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського; Crossref

Видавець:
Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни
Львівського р-ну Львівської обл., 80381,
Свідоцтво ДК № 6177 від 11.05.2018 р.

Підписано до друку 29.12.2023. 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.