

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Вінницький національний технічний університет

ВІСНИК МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

ТОМ 10, № 2, 2024

**ВІННИЦЯ
2024**

ISSN 2415-3486
e-ISSN 2413-4503

Засновник:

Вінницький національний технічний університет

Рік заснування: 2015

*Рекомендовано до друку та поширення
через мережу Інтернет Вченою радою
Вінницького національного технічного університету
(протокол № 7 від 26 грудня 2024 р.)*

Державна реєстрація:

Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1234 від 31.10.2023
Ідентифікатор медіа – R30-01953.

Журнал входить до переліку наукових фахових видань України

Категорія «Б». Спеціальності:

113 – Прикладна математика; 131 – Прикладна механіка; 132 – Матеріалознавство;
133 – Галузеве машинобудування; 142 – Енергетичне машинобудування;
274 – Автомобільний транспорт; 275 – Транспортні технології.
(наказ МОН № 409 від 17.03.2020 року)

**Журнал представлено у міжнародних наукометричних базах даних,
репозитаріях та пошукових системах:**

Google Scholar, Національна бібліотека ім. В. І. Вернадського, Dimensions,
Polska Bibliografia Naukowa, UCSB Library, OUCI (Open Ukrainian Citation Index)

Адреса редакції:

Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
E-mail: info@met-journal.com.ua
<https://met-journal.com.ua/uk>

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Vinnytsia National Technical University

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT

Scientific Journal

VOLUME 10, NO. 2, 2024

VINNYTSIA
2024

ISSN 2415-3486
e-ISSN 2413-4503

Founder:

Vinnytsia National Technical University

Year of foundation: 2015

*Recommended for printing and distribution
via the Internet by the Academic Council
of Vinnytsia National Technical University
(Minutes 7 of December 26, 2024)*

State registration:

Decision of the National Council of Television
and Radio Broadcasting of Ukraine No. 1234 of 31.10.2023

Media identifier – R30-01953

The journal is included in the list of Professional Scientific Publications of Ukraine

Category “B”. Branch of sciences – Technical.

Specialties: 0541 - Mathematics, 0715 - Mechanics and metal trades,

0613 - Software and applications development and analysis,

0716 - Motor vehicles, ships and aircraft, 1041 - Transport services.

(Order of the Ministry of Education and Science No. 409 of 17.03.2020)

**The journal is presented international scientometric databases, repositories
and scientific systems:**

Google Scholar, Vernadsky National Library of Ukraine, Dimensions, Polska Bibliografia Naukowa,
UCSB Library, OUCI (Open Ukrainian Citation Index)

Editors office address:

Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
E-mail: info@met-journal.com.ua
<https://met-journal.com.ua/en>

Редакційна колегія

Головний редактор:

Андрій Поляков

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Заступник головного редактора:

Віктор Біліченко

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Відповідальний секретар

Віталій Кашканов

Кандидит технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Національні члени редколегії:

Іграмотдін Алієв

Доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна

Геннадій Баглюк

Доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича, м. Київ, Україна

Володимир Волков

Доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

Орест Горбай

Доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Олександр Грушко

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Юрій Гутаревич

Доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

Андрій Кашканов

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Леонід Козлов

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Олександр Кравченко

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Любомир Крайник

Доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Володимир Макаров

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Володимир Михалевич

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Михайло Подригало

Доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

Леонід Поліщук

Доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Володимир Сахно

Доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

В'ячеслав Тітов

Доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Міжнародні члени редколегії:

Горст Бруннер

Доктор технічних наук, професор, Дрезденський технічний університет, м. Дрезден, Німеччина

Петрика Візуреану

Доктор технічних наук, професор, Ясський технічний університет імені Георга Асакі, м. Ясси, Румунія

Гюнтер Прокоп

Доктор технічних наук, професор, Дрезденський технічний університет, м. Дрезден, Німеччина

Editorial Board

Editor-in-Chief:

Andriy Polyakov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
------------------------	--

Deputy Editor-in-Chief:

Viktor Bilichenko	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
--------------------------	--

Executive Secretary

Vitaliy Kashkanov	PhD of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
--------------------------	---

National Members of the Editorial Board:

Igramotdin Aliyev	Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk, Ukraine
--------------------------	---

Hennadiy Bahlyuk	Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Materials Science Problems named after I.M. Frantsevich, Kyiv, Ukraine
-------------------------	--

Volodymyr Volkov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
-------------------------	---

Orest Gorbay	Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
---------------------	--

Oleksandr Hrushko	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
--------------------------	--

Yurii Gutarevych	Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Transport, Kyiv, Ukraine
-------------------------	--

Andriy Kashkanov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
-------------------------	--

Leonid Kozlov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
----------------------	--

Oleksandr Kravchenko	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
-----------------------------	--

Lubomyr Kraynyk	Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
------------------------	--

Volodymyr Makarov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
--------------------------	--

Volodymyr Mykhalevych	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
------------------------------	--

Mikhail Podrigalo	Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
--------------------------	---

Leonid Polishchuk	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
--------------------------	--

Volodymyr Sakhno	Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Transport, Kyiv, Ukraine
-------------------------	--

Viacheslav Titov	Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
-------------------------	--

International Members of the Editorial Board:

Horst Brunner	Doctor of Technical Sciences, Professor, Dresden University of Technology, Dresden, Germany
----------------------	---

Petryka Vizureanu	Doctor of Technical Sciences, Professor, Gheorghe Asaki Technical University of Iasi, Iasi, Romania
--------------------------	---

Guenther Prokop	Doctor of Technical Sciences, Professor, Dresden University of Technology, Dresden, Germany
------------------------	---

Зміст

В. Дорошенко, О. Янченко

Приклад ливарної технології виробництва широкої номенклатури металоконструкцій
для подальшого масштабування в процесі розбудови машинобудування 11

В. Волков, Т. Волкова, В. Кужель, В. Верхломчук, Н. Нікіфоров

Основи інтеграції системи технічної експлуатації автомобілів
в інтелектуальні транспортні системи..... 21

М. Грубель, М. Манзяк, О. Кузнєцов, Т. Крайник, Г. Худавердян

Спектральна оцінка вібронавантажень легкого військового автомобіля 31

О. Губарев, Є. Синицина

Мехатронна система керування вологістю мікроклімату теплиці 38

Р. Зінько, О. Крамський, Б. Мокряк, А. Поляков

Дослідження експлуатаційних характеристик пневматичного автомобільного двигуна 48

В. Кав'юк, А. Кашканов

Роль тактико-технічних характеристик засобів рухомості
в аеродромно-технічному забезпеченні польотів 54

А. Козлов, В. Стегній, О. Голик

Інтеграція оптико-електронної системи спостереження з артилерійською
радіолокаційною станцією для оптимізації самооборони кораблів при пошуку мін..... 63

А. Кашканов, М. Москалюк

Невизначеність та її вплив на формування запасів запасних частин
для забезпечення ефективності транспортних процесів 74

Д. Кльокта

Аеронавтологічний вплив на процес очищення злітно-посадкових смуг від забруднень 81

В. Михалевич, О. Грушко, Ю. Добранюк, О. Тютюнник

Напружений стан товстостінної труби під дією внутрішнього тиску та осової сили 92

М. Омелян

Методика скінченно-елементного моделювання параметрів
напружено-деформівного стану плоскої ферми з паралельними поясами..... 99

В. Павленко, В. Павленко, В. Мануйлов, В. Кужель, А. Буда

Хмарні рішення для інтеграції
та аналізу даних дистанційного моніторингу транспортних засобів..... 109

І. Рясний, А. Іваненко

Підвищення точності маневрування суден на мілководді:
роль навігаційного обладнання та дизайну корпусу 118

А. Слабкий С. Котик

Інноваційні технології у дослідженні механічних властивостей матеріалів 130

Л. Поліщук, Р. Сивак, Б. Резидент

Визначення поля тиску в газостатичній опорі високошвидкісного
шпіндельного вузла металорізального верстату 135

Є. Табачківський, М. Бушля

Інновації в обсерваційній техніці навігації для точного визначення місцезнаходження кораблів 142

Р. Мельник, С. Цимбал

Застосування технології Blockchain в логістиці та управлінні ланцюгами постачань 153

І. Вікович, О. Возняк, Є. Яковенко, О. Коцюмбас

Дослідження повітрообміну на робочому місці водія автобуса..... 161

О. Шмерего, С. Чуйко, С. Цимбал

Особливості проведення досліджень аварійних процесів в електрообладнанні
транспортних засобів на ділянці електричного кола: генератор – акумуляторна батарея 168

С. Цимбал, В. Глиняний

Аналіз сучасного стану перевезень пасажирів на приміських маршрутах..... 177

Contents

V. Doroshenko, O. Yanchenko

An example of foundry technology for the production of a wide range of metal structures
for further scaling in the process of developing mechanical engineering 11

V. Volkov, T. Volkova, V. Kuzhel, V. Verkhloshchuk, N. Nikiforov

Basics of integration of vehicle technical operation systems into intelligent transport systems..... 21

M. Hrubel, M. Manziak, O. Kuznyetsov, T. Kraynyk, H. Khudaverdian

Spectral evaluation of vibration loadslight military vehicle 31

O. Hubarev, Y. Synytsyna

Mechatronic system for controlling the humidity of the greenhouse microclimate..... 38

R. Zinko, O. Kramskyi, B. Mokriak, A. Polyakov

Research on the operational characteristics of a pneumatic automotive engine 48

V. Kaviuk, A. Kashkanov

The role of tactical and technical characteristics of vehicles in airfield technical support of flights 54

A. Kozlov, V. Stehni, O. Holyk

Integration of an optoelectronic surveillance system
with an artillery radar station to optimise ship self-defence in mine detection..... 63

A. Kashkanov, M. Moskaliuk

Uncertainty and its impact on the formation of spare parts inventories
to ensuring the efficiency of transport processes 74

D. Klokta

Aeronautical impact on the process of cleaning runways from contamination..... 81

V. Mykhalevych, O. Hrushko, Y. Dobraniuk, O. Tiutiunnyk

Stressed state of a thick-walled pipe under the action of internal pressure and axial force..... 92

M. Omelian

Method of finite element modelling of the stress-strain state parameters
of a flat truss with parallel belts 99

V. Pavlenko, V. Pavlenko, V. Manuylov, V. Kuzhel, A. Buda

Cloud solutions for data integration and analysis in remote vehicle monitoring..... 109

I. Riasnyi, A. Ivanenko

Improving ship manoeuvring accuracy in shallow water: The role of navigation equipment and hull design	118
--	-----

A. Slabkyi, S. Kotyk

Innovative technologies in the study of mechanical properties of materials	130
--	-----

L. Polishchuk, R. Syvak, B. Resident

Determination of the pressure field in the gasstatic support of a high-speed spindle assembly of a metal-cutting machine.....	135
---	-----

Y. Tabachkivskyi, M. Bushlia

Innovations in observational navigation techniques for precise ship positioning	142
---	-----

R. Melnyk, S. Tsymbal

Application of Blockchain technology in logistics and supply chain management	153
---	-----

I. Vikovych, O. Vozniak, Ye. Yakovenko, O. Kotsiumbas

Investigation of air exchange at the workplace of a bus driver	161
--	-----

O. Shmereg, S. Chuiko, S. Tsymbal

Particularities of conducting emergency processes in electrical transportation facilities at the electric stake dalliance: Generator – battery	168
--	-----

S. Tsymbal, V. Glynianyi

Analysis of the current state of passenger transportation on suburban routes.....	177
---	-----

Володимир Дорошенко*

Доктор технічних наук, провідний науковий співробітник
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України
03142, бульв. Вернадського, 34/1, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>

Олександр Янченко

Кандидат технічних наук, доцент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3888-3772>

Приклад ливарної технології виробництва широкої номенклатури металоконструкцій для подальшого масштабування в процесі розбудови машинобудування

Анотація. З огляду перспектив розбудови українського машинобудування розглянуто тип виробництва металопродукції і діючий приклад його реалізації, які рекомендуються для масштабування. Виробництво металовиробів широкої номенклатури і різної серійності показано на прикладі невеликого ливарного цеху, що працює за технологією лиття металу за газифікованими моделями (ЛГМ). Аналіз виробничої практики експлуатації цієї технології виконано з метою її масштабування і мотивування підприємств та інженерних установ до її активного впровадження, що сприятиме відродженню українського машинобудування, підвищенню рівня інноваційності в економіці та забезпеченню її конкурентоспроможності на міжнародному рівні. Показано зразки продукції ливарного цеху, проаналізовано особливості та переваги ЛГМ-технології, невисокі інвестиційні потреби організації такого цеху завдяки можливості виготовлення більшості обладнання та оснастки для нього українськими підприємствами. Міцність ливарної піщаної форми при ЛГМ зумовлена інноваційним застосуванням передусім законів фізики за рахунок унікального створення в стінках форми градієнта газового тиску від випаровування разової ливарної моделі з пінополімеру разом з вакуумуванням піску форми. Це дає змогу виготовляти ливарні форми з сухого кварцового піску при обтіканні ним модельних конструкцій різноманітної геометричної конфігурації за допомогою методу віброущільнення, забезпечуючи багаторазовий обіг цього піску. Відмічено перспективи цифровізації ЛГМ-процесу з акцентом на 3D-друк ливарних моделей що нерідко на порядок скорочує час від креслення конструкції до її виготовлення в металі. Послідовність операцій при ЛГМ зображено ескізною схемою. Структуру впливу основних технологічних параметрів ЛГМ на якість виливків показано за допомогою діаграми Ішікави, на якій окремі фактори позначено з урахуванням останніх досліджень та значного досвіду удосконалення ЛГМ-процесу науковцями ФТІМС НАН України. Виконане дослідження може стати основою для створення промислових осередків росту на етапі відновлення машинобудування, а також для розробки стратегій модернізації ливарних процесів, впровадження нових технологій і підвищення рівня автоматизації. У підсумку, це сприятиме підвищенню економічної стійкості та створенню нових можливостей для зростання промислового сектора країни

Ключові слова: дрібносерійне виробництво; ливарний цех; піщана форма; лиття за газифікованими моделями; розвиток машинобудування, номенклатура продукції

Suggested Citation:

Doroshenko, V., & Yanchenko, O. (2024). An example of foundry technology for the production of a wide range of metal structures for further scaling in the process of developing mechanical engineering. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 11-20. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.11.

*Corresponding author



Вступ

В умовах воєнних дій українське машинобудування стикається зі складними викликами: руйнація виробничих потужностей і транспортної інфраструктури призводить до знищення промислового потенціалу, що має негативні наслідки для стійкості та конкурентоспроможності країни. Зважаючи на військово-політичні ризики, триваючою у світі цифровізацію, екологічні та технологічні тренди, а також потребу в соціально відповідальних бізнес-моделях, модернізація українського машинобудування є невідкладною. Стратегічне значення для розвитку машинобудування в Україні в сучасних умовах має ливарне виробництво з випуску широкого асортименту металопродукції. Його розвиток є важливим як для забезпечення обороноздатності країни, так і для її повоєнного відновлення, оскільки ці процеси потребують великої кількості різноманітних металевих виробів. З огляду на це особливого значення набувають ливарні технології, здатні легко перелаштовуватися для випуску широкої номенклатури продукції і які можуть бути застосовані як на малих, так і на великих підприємствах, що дасть змогу швидко реагувати на зміни потреб оборони й економіки. Крім того, перспективним напрямом розвитку машинобудування є масштабування малих діючих виробництв, які вже використовують ресурсоефективні, відпрацьовані гнучкі технології. Менші, але стабільні підприємства з широким асортиментом продукції та оптимізованими процесами, можуть стати осередками їх поступового розширення до середніх і великих виробництв.

Машинобудівна промисловість в Україні є стратегічно важливою галуззю для підтримки обороноздатності країни, її технологічного та інноваційного розвитку, долучення до глобальних ланцюгів створення продукції (Sobkevich, 2024). З 2016 року триває зниження об'єму продукції українського машинобудування та металообробки (Ishchuk, 2022), які в сучасному світі невинно трансформуються, насичуючись інформаційними технологіями. В глобальному плані ці галузі відіграють ключову роль у розвитку економіки та технологічного прогресу для створення та подальшої реалізації інновацій товарних, технічних і технологічних категорій. В умовах воєнних дій українське машинобудування стикається з серйозними проблемами, які обмежують реалізацію його виробничого потенціалу. Руйнація виробничих потужностей і транспортної інфраструктури призводить до втрати значної частини промислового потенціалу, що перевищує 30 % (Kushnirenko & Gakhovich, 2023). Відновлення українського машинобудування в умовах післявоєнної невизначеності потребує комплексного підходу, що базується на європейських принципах (Bilopolskyi, *et al.*, 2024), інтеграції екологічно сталих технологій і цифрових рішень у всі етапи виробництва для підвищення його ефективності та стійкості. Для успішного відродження галузі необхідні

реконструктивні заходи, спрямовані на регіональну диверсифікацію (Feier *et al.*, 2023), що дозволить знизити залежність від окремих економічних центрів. Розширення середньо- і високотехнологічного виробництва сприятиме підвищенню конкурентоспроможності української промисловості та створенню сучасних промислових комплексів, орієнтованих на задоволення як внутрішніх, так і зовнішніх ринкових потреб. Модернізація повинна відповідати вимогам національної безпеки. Формування самодостатнього комплексу галузей стане важливим кроком до підвищення стійкості економіки, дозволяючи ефективніше реагувати на соціально-економічні та воєнно-політичні виклики, забезпечуючи надійну підтримку промислового потенціалу країни (Kushnirenko & Gakhovich, 2023). Українські інженерні школи (Unite engineering schools..., 2024) володіють ресурсоефективними технологіями, які залишаються недостатньо поширеними через брак інформації, експертних знань або інфраструктури для їх реалізації. Водночас відсутність обґрунтованих стратегічних ініціатив зі сприяння удосконалення та адаптації українського машинобудування до глобальних викликів майбутнього (військово-політичних, цифрових, фінансових, інвестиційних, екологічних, технологічних, соціальних тощо) нарощує розрив між Україною та розвинутими країнами світу й тільки посилює ефект деіндустріалізації економіки країни.

Метою цього дослідження був опис прикладу ливарного виробництва широкої номенклатури металовиробів на основі технології лиття металу за газифікованими моделями, розкриття потенційних напрямів відновлення машинобудування в країні шляхом застосування таких технологій і досвіду діючих українських підприємств та наукових установ.

Матеріали і методи

Дослідження проведено в 2023–24 рр. на базі діючого дослідно-експериментального ливарного цеху Фізико-технологічного інституту металів і сплавів НАН України (м. Київ), обладнаного українським устаткуванням модульного типу, що дозволяє з гнучкістю налаштовувати виробничі лінії та зберігати мобільність в умовах обмежених площ. Обладнання модульного типу складається з серійно чи нестандартно виготовлених одиниць чи установок невисоких капіталоемності та маси, що дозволяє переставляти його, комплектуючи з нього виробничі лінії у значній мірі довільної конфігурації. Цех виготовляє передусім ремонтні деталі та навісні органи сільськогосподарської ґрунтообробної, землерийної, будівельної та гірничодобувної техніки. Основне призначення цеху полягає в відпрацюванні виробничих процесів для подальшого поширення таких рішень у вітчизняному машинобудуванні.

В основі методології дослідження лежали методи огляду, систематизації та аналізу науково-технічної і

економічної інформації, що дало змогу отримати цілісне уявлення про стан та перспективи розвитку ливарних технологій. Була проведена систематизація інформації, підкріплена фотографіями моделей типових виливків і ключових операцій, що виконуються у цеху. Це допомогло структурувати знання про виробничі операції. Для виявлення ключових тенденцій і закономірностей ливарного процесу, що являє собою лиття металу за моделями, що газифікуються і має поширену аббревіатуру «ЛГМ», наведено схему послідовно виконуваних технологічних операцій виробництва металопродукції. Суть технології ЛГМ полягає в засипанні піском в контейнері пінополістирольної моделі виливка, заливанні розплавом металу цієї моделі, яка випаровується і заміщається металом, після твердіння якого утворюється виливок, що повторює конфігурацію моделі. Серед досліджуваних аспектів – гнучкість модульного обладнання, яке може розміщуватися в різних конфігураціях, зокрема поза межами цеху, що оптимізує виробничі лінії.

Для дослідження структури ливарного процесу стосовно впливу основних технологічних параметрів на якість продукції та для оцінки масиву такої інформації в його кількісному і якісному складі застосовано діаграму за методом Ішікави (Ishikawa, 1985). Цей графічний метод дослідження та визначення найбільш суттєвих причинно-наслідкових взаємозв'язків між факторами та наслідками у досліджуваній проблемі дозволяє систематично визначити і візуалізувати основні фактори, які впливають на якість продукції, та встановити контрольовані зв'язки між ними. Діаграма допомогла виявити критичні фактори, що потребують оптимізації, але й розробити цілеспрямовані стратегії для покращення якості та стабільності процесу виробництва. Послідовність складання діаграми йшла від операцій підготовки (рециклінгу) вихідних чи оборотних матеріалів та налаштування обладнання і оснастки до операцій регулювання факторів виготовлення ливарної форми, плавки, обробки в рідкому стані металу та заливання його в ливарну форму. Базуючись на працях О.У. Shinsky *et al.* (2018) і S. Kumar *et al.* (2007), діаграма Ішікави була розширена, щоб відобразити додаткові технологічні можливості процесу ЛГМ та забезпечити повну картину факторів впливу на кінцевий продукт.

Таким чином, методологія дослідження базувалася на аналізі й візуалізації технологічного процесу, що дозволило встановити контрольовані зв'язки між виробничими факторами та якістю продукції, а також сформулювати підхід до вдосконалення й оптимізації ливарного процесу в умовах сучасного машинобудування України.

Результати та обговорення

В цій статті розглянуто приклад ливарної технології для виробництва широкої номенклатури металопродукції

як одне з джерел відновлення українського машинобудування, яке відносять до однієї з найбільш трудомістких і наукомістких галузей промисловості. Ця технологія придатна для початкових та невеликих виробництв, а також успішно застосовується на великих заводах (зокрема, що поширені в Китаї), розвиток потужностей яких збільшить потенціал зростання всього виробничого комплексу країни. Можливість почати з дрібносерійного виробництва металопродукції в невеликому обсязі зменшує фінансові ризики та дає можливість випробувати нові ідеї, технологічні тонкощі та продукцію на ринку. Такий підхід сприятиме розростанню локального виробництва (зокрема ремонтних запчастин), місцевої економіки, створенню нових робочих місць, розвитку професійних навичок працівників. Крім того, цей підхід може допомогти залученню інвестицій, стимулюючи подальший розвиток машинобудування.

Зокрема, дрібносерійне виробництво малих і середніх підприємств широкого товарного асортименту дозволяє оперативно реагувати на потреби ринку, забезпечуючи достатню якість продукції при невеликих обсягах виробництва. Його перевагами є: гнучкість (можливість швидко змінювати асортимент продукції, адаптуючись до змін попиту); полегшене впровадження нових технологій та інновацій у виробничий процес; уважність до деталей, що підвищує якість продукції завдяки меншому обсягу виробництва; оптимізація витрат на виробництво шляхом використання наявного обладнання та меншої кількості матеріалів.

До ключових факторів сприяння успішності дрібносерійного виробництва належать:

- ♦ модульні виробничі системи, які можна швидко переналаштувати під різні продукти, та технології з можливістю рознесення створюваних напівпродуктів та оснащення по різних приміщеннях, виробничих дільницях і без короткого терміну використання;

- ♦ обладнання невисокої капіталоемності, плинні сировинні та технологічні матеріали, бажано з високим ступенем повторного циклічного використання (для екологічної стійкості і оптимальної ресурсомісткості) та невеликої густини;

- ♦ нескладність автоматизації виробництва, впровадження адитивних технологій (3D-друку) для швидкого створення прототипів (зі скороченням часу виходу на ринок) і невеликих серій металовиробів;

- ♦ сприятливість до інтеграції з цифровими технологіями для моделювання, проектування та оптимізації виробничих процесів.

Діюче, хоч і невелике виробництво більш привабливе для інвестицій з метою його розширення в процесі відбудови промисловості країни, ніж створюване з нуля. Таким чином, виробництво металопродукції з технологією, придатною до різної серійності і широкого спектру виробів як за їх геометрією, габаритами, так і за масою, може стати ефективним інструментом для

відродження машинобудування, забезпечуючи його конкурентоспроможність та сталий розвиток.

Огляд і структурування ливарної технології на прикладі діючого ливарного цеху

Ключову роль у машинобудуванні відіграє ливарне виробництво як його основна заготівельна база, оскільки не менше половини промислової металопродукції складається з деталей та вузлів, виготовлених саме ливарними методами. Ливарне виробництво постачає продукцію з різних металів та сплавів для машин і механізмів, транспортної індустрії, енергетики, ВПК тощо, виготовляючи складні за геометричною конфігурацією і конструкцією деталі, які було б складно або неможливо виготовити іншими способами.

Створення виробництва металевих виливків в дослідно-промисловому цеху ФТІМС НАН України продуктивністю до 40 т на місяць, як здебільшого дрібносерійного та ремонтного виготовлення литва, є прикладом диверсифікації випуску продукції як за масою виробу (від 0,2 до 1100 кг), металевими сплавами (чорні та кольорові), так і за серійністю продукції. Таку варіативність виробництва досягнуто завдяки впровадженню в цеху технології лиття газифікованих моделей (ЛГМ, Lost Foam Casting), яка відповідає практично всім наведеним вище показникам для успішного виробництва металовиробів значних діапазонів серійності і номенклатури (Shinsky *et al.*, 2018).

В жодній ливарній технології, крім ЛГМ, метал не заливається в ливарну форму, порожнина якої заповнена твердим матеріалом, що є унікальною особливістю ЛГМ. Якщо типова ливарна порожнинна піщана форма під час заливання металу є носієм функції утримання і перенесення на метал геометрії (конфігурації) майбутнього виливка, то при ЛГМ ці функції виконує разова ливарна модель. В першому випадку міцність стінки форми зумовлена адгезійно-когезійними силами (з огляду фізико-хімії) між зернами формувального піску зі зв'язувальним компонентом, а в другому – градієнтом газового тиску завдяки різниці тиску в вакуумованому пористому середовищі сухого формувального піску і тиску газів від термодеструкції моделі, яка служить рухомих джерелом газовиділення по мірі заміщення її розплавом металу. Це дало перевагу по екологічності: застосування меншої кількості хімічних речовин знижує негативний вплив на довкілля.

Застосування ливарних форм з сухого піску багаторазового обігу (без зв'язувальних компонентів) дозволяє без капіталоемного масивного обладнання (порівняно з типовими формувальними машинами пресування чи струшування) регулювати виробництво як за строками (з накопиченням разових моделей певних виливків протягом часу ажно місяця і більше), за металоемністю форми, розміщуючи від 1 до 20 модельних

кущів чи кластерів з окремими стояками в одній контейнерній піщаній формі, так і за локацією виробничих дільниць, з можливістю винесення модельної дільниці в прибудові до цеху на поверхні вище першого чи в окремій приміщенні легкої конструкції.

Циклічний обіг і охолодження формувального піску можливо проводити і поза цехом вздовж зовнішньої його стіни, що реалізовано обладнанням модульного типу в цеху ФТІМС НАН України. Одиниці обладнання виступають як модулі, що дозволяють їх оптимально комплектувати в технологічні лінії згідно виробничих чи транспортних потоків. Об'ємна комплектація ливарних моделей з пінополістиролу (ППС) у кластери чи кущі і застосування багатомісних ливарних форм (з окремими ливарними стояками для кожного куща моделей) суттєво економлять виробничі площі (на тонну продукції) для заливання і вистоявання форм в процесі охолодження виливків або скорочують ливарні конвеєри порівняно з литтям у більш поширені традиційні форми в парних опоках. Застосування сухого піску для ливарних форм полегшує циклічний обіг піску, для чого застосовують обладнання практично аналогічне до типового для заводу підготовки будматеріалів, і яке нескладно комплектувати з окремих установок-модулів і виготовити в більшості українських механічних цехів.

Останні розробки інституту ФТІМС НАН України щодо моделювання біонічних литих конструкцій з ППС, аналогічно описаним в роботі (Cheiliakh & Cheiliakh, 2020), регулювання швидкості охолодження литва у піщаній формі, включно з варіантами його термообробки (Doroshenko & Kalyuzhny, 2024) суттєво удосконалюють ЛГМ-процес. А застосування 3D-фрезерів та 3D-принтерів для виготовлення моделей, в тому числі з вентиляцією моделей і знешкодженням викидів газів (Doroshenko, 2021) відкриває можливості комп'ютеризації, автоматизації модельного виробництва і, загалом, поліпшення екологічної безпеки ЛГМ-процесу одночасно зі збільшенням перспективних варіантів виготовлення легкових тонкостінних виливків (Jordan *et al.*, 2021) складної геометрії.

Тривала виробнича практика показала вигідне застосування технології ЛГМ для ремонтного литва, зокрема для виробництва достатньо швидкозношуваних навісних робочих органів ґрунтообробного обладнання сільськогосподарського призначення, приклади яких показано на Рисунку 1. Виробництво таких деталей відноситься до важливого напрямку, яким є аграрне машинобудування. Послідовна реалізація аграрної реформи збільшуватиме попит на сільськогосподарські машини й устаткування – як у великих, так і у дрібних господарств, що, в свою чергу, стимулюватиме використання ними навісних робочих органів, що в екстремальних умовах контактують з ґрунтом, зношуються, після чого потребують регулярної заміни (Askerov, 2021).

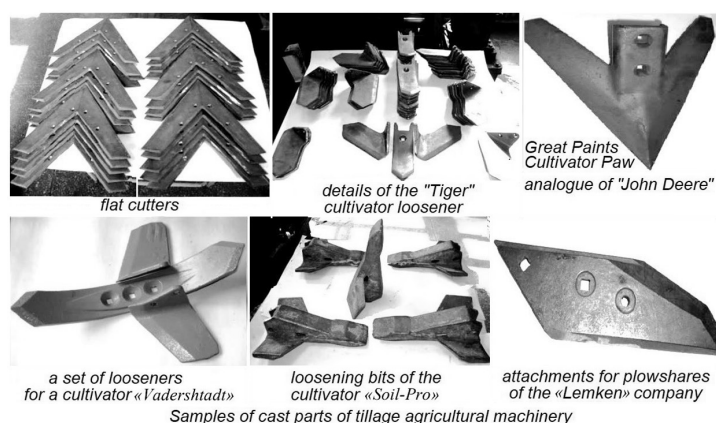


Рисунок 1. Зразки литих навісних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки

Джерело: фото M.G. Askerov (2021)

На Рисунок 2 показано структурну схему найбільш поширених технологічних операцій ЛГМ-процесу для виробництва дрібних і середніх виливків. Процес підготовки ППС та виготовлення з нього моделей, як легкокаких матеріалів і виробів не потребує масивного обладнання. Для транспортування гранул ППС доступний

пневмотранспорт по полімерних трубопроводах. А транспортування і складування моделей неважко виконувати вручну навіть у стопках чи в складі кластерів (позиція 4). На позиції 7 заливання металу і наступного тверднення виливка, як правило, застосовують вакуумування піску форми.

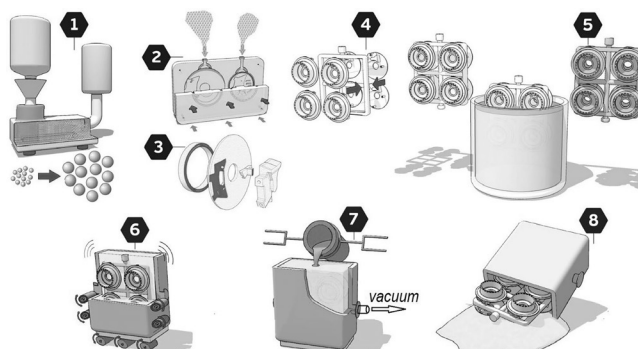


Рисунок 2. Типова схема ЛГМ-процесу

Примітки: 1 – підспіювання гранул ППС; 2 – отримання з цих гранул деталей моделі; 3 – склеювання деталей моделі; 4 – збирання модельних кластерів (кущів); 5 – фарбування кластерів зануренням; 6 – формування кластерів в контейнері з сухим піском і його вібрацією; 7 – заливання форми металом; 8 – охолодження виливка і висипання піску і виливка з контейнера

Джерело: Densen Group (2020)

Приклади підготовлених до заливання ливарних контейнерних форм різного розміру і металоемності, а також процес їх заливання металом в цеху ЛГМ ФТІМС НАН України показано на Рисунок 3. Піщані контейнерні форми встановлюють на горизонтально замкнутому рольганговому конвеєрі (3а), обладнаному з електроприводом, або на заливальному плаці (3б). Заливання форм металом (3с) в цеху ЛГМ практично не супроводжується газовиділенням в повітря цеху, хоч моделі в формах і газифікуються. Це зумовлено вакуумуванням піску форм вакуумними насосами, які створюють залишковий тиск газів близько 50 кПа

(розрідження близько 0,5 атм). Для порівняння, побутові пилососи створюють розрідження (зменшення тиску від атмосферного) повітря на 0,2–0,25 атм. У формі може бути як одна ливарна модель, так і кілька, які кріплять на ливниковому стояку, створюючи кластер моделей. На Рисунок (3b) показано форму, на поверхні якої встановлено 9 воронки, кожна з яких поєднана з окремим кластером. Це означає, що стільки ж виливків з металу кластерів буде отримано з цієї форми, а в кожному може бути по кілька чи навіть кільканадцять дрібних виливків, як видно на модельних кластерах, показаних на рисунках нижче.

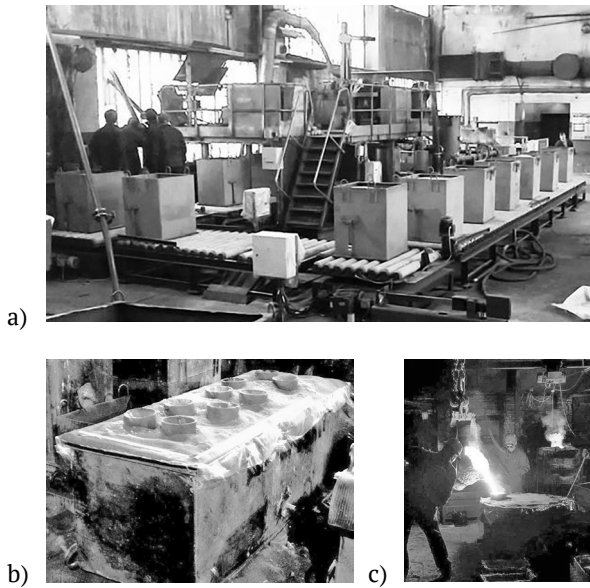


Рисунок 3. Ливарні форми різного розміру і металоємності та процес їх заливання металом

Примітки: а – піщані контейнерні форми на конвеєрі; б – піщані контейнерні форми на заливальному плацу; с – заливання форм металом в цеху ЛГМ

Джерело: фото автора

Крім того, на Рисунках 4 і 5 показано приклади моделей та виливків, які виготовляють дрібними серіями в цеху ЛГМ ФТІМС НАН України. Це робочі органи ґрунтообробного та землерийного обладнання, ланки конвеєрів (зокрема для утилізації твердих відходів, елеваторних комплексів тощо) та інші деталі рухомих чи стаціонарних механізмів (5а). Робочі органи ґрунтообробного та землерийного обладнання охоплюють різні типи лемішів, лопат, долот, дисків, розпушувачів, ножів та культиваторів, які використовуються для підготовки та обробки ґрунту в сільськогосподарських процесах. До землерийних органів належать зуби, коронки, адаптери ковшів екскаваторів, лопат бульдозерів, ковші техніки, як обладнання для землерийних робіт, дорожнього будівництва, цивільного чи подвійного будівництва, зносу будівель, розробки кар'єрів, будівництва шляхів, садівництва та ландшафтного дизайну тощо. На Рисунку 5b показано вилиті зуби і коронки на землерийних машинах та трак для гусеничної землерийної та подібної до неї техніки. Ланки конвеєрів, що представлено на рисунках, використовуються в комплексах для утилізації твердих відходів, де вони транспортують матеріали різного походження, а також в елеваторних системах для переміщення зерна та інших сипких матеріалів. Окрім того, у цеху виготовляються деталі для рухомих механізмів, зокрема шестерні, вали, корпуси підшипників та інші компоненти, що забезпечують надійну роботу машин, а також деталі для стаціонарних механізмів, таких як насоси, компресори, гідравлічні системи, які використовуються в промисловості та будівництві.



Рисунок 4. Приклади ливарних моделей металовиробів навісного ґрунтообробного та землерийного обладнання

Джерело: фото автора

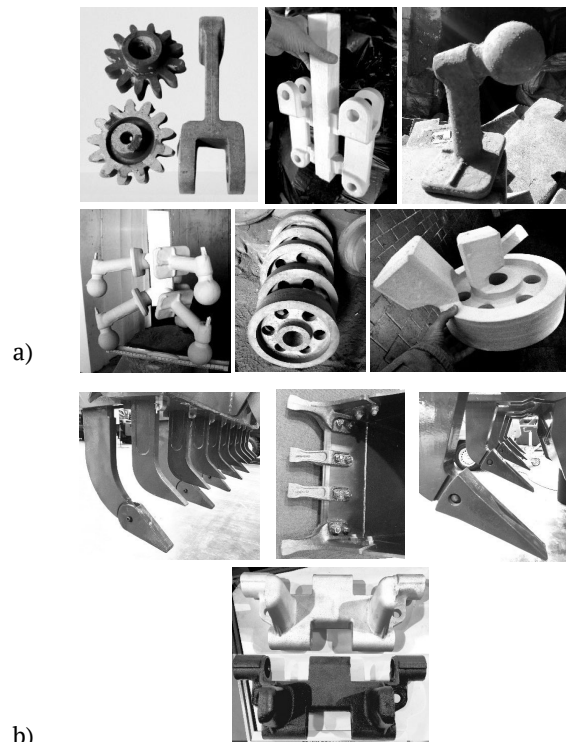


Рисунок 5. Виливки та моделі ланок конвеєра та інших деталей механізмів (а), вилиті зуби і коронки на землерийних машинах та трак для гусеничної техніки (б)

Джерело: фото автора

Як у теперішній час, так і у повоєнний період довгий час існуватиме значна потреба у виготовленні (за схожими способами до виливання землерийних зносостійких органів) тріщиностійких контактних (витратних/змінних) органів протимінних тралів (Modular mine trawl..., 2018) (коткових, ножових чи бойкових), оскільки потреба розмінування вимагатиме спеціальної техніки – машин для розмінування, для перевезення вибухонебезпечних предметів, міношукачів, іншої спецтехніки. Протягом багатьох років будуть актуальними потреби в ремонті цієї техніки й постачанні запчастин для неї.

Придатність ЛГМ-процесу до рентабельного дрібносерійного виробництва різноманітної номенклатури виливків особливо вигідна з огляду на обставини, що склалися протягом останніх десятиліть, коли боротьба за конкурентну перевагу у виробництві продукції на основі збільшення продуктивності процесу призвела до того, що в деяких галузях майже досягнуто її максимум, а запити потенційного споживача інноваційної продукції змінилися у бік підвищення ступеня індивідуалізації зі збереженням доступного рівня цін (Baykasoglu *et al.*, 2004). У багатьох сферах економіки почалася масова кастомізація продукції, за якої замовник бере активну участь у процесі проектування необхідного йому товару, зокрема через NFC-систему (бездротової передачі даних та платежів). Така трансформація виробництва сприяє скороченню часу виходу товару на ринок, зменшенню обсягів складських запасів, часу їх

зберігання та кількості одиниць продукції, а загальна цифровізація технологічних процесів змушує компанії впроваджувати передові методи виробництва, щоб залишатися конкурентоспроможними (Natsir, 2022).

У відповідь на вищезазначені потреби, обладдйливі перспективи для дрібносерійного ЛГМ-процесу відкриває 3D-друк ливарних моделей, при якому без модельної оснастки з цифрового креслення на екрані монітора за допомогою принтера друкується модель протягом 5-10 годин (в ідеалі), а протягом наступних 1-2 днів за цією моделлю методом ЛГМ можливе виготовлення виливка. Така «матеріалізація» ливарної моделі з цифрового файлу в концепції «Індустрія 4.0» називається «цифро-фізичним перетворенням», що значно скорочує процес від креслення до металопродукції та відповідає одному з перспективних кроків цифрової трансформації ливарної галузі як з огляду швидкої зміни асортименту продукції у відповідь на зміну потреб ринку, так і наближення до концепції «виробництво як послуга».

З метою пояснення структури процесу ЛГМ стосовно впливу основних технологічних параметрів на якість виливків, а також для оцінки масиву такої інформації в його кількісному (згідно з числом чинників впливу) і якісному складі (за організаційно-технологічною сутністю впливу) застосували діаграму за методом Ішікави. Оскільки основна задача ливарного виробництва – отримання виливка з конкурентоздатним відношенням його якості до собівартості, то цей показник вказали на діаграмі в якості кінцевого продукту (Рис. 6).

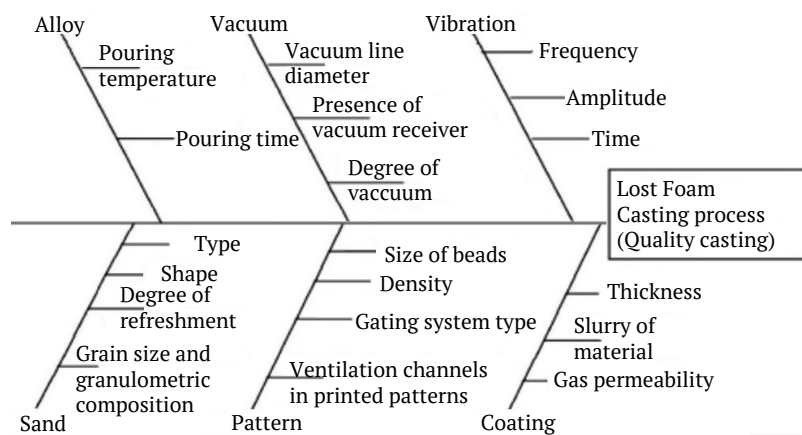


Рисунок 6. Діаграма Ішікави для ЛГМ-процесу

Джерело: розроблено автором на основі роботи Kumar *et al.* (2007)

Основні гілки, які визначають якісні та експлуатаційні характеристики литого виробу позначено таким чином: сплав (виливка), вакуум (в ливарній формі), вібрація (форми при ущільненні піску), пісок (наповнювач ливарної форми), модель (її якісні характеристики), покриття (моделі) (Kumar *et al.*, 2007). Для кожної з таких гілок встановлено визначальні чинники другого порядку. Крім того, на діаграмі до вказаних у названій роботі додано доповнення до чинників другого порядку,

застосувавши системний підхід з роботи O.Y. Shinsky *et al.* (2018). Гілку діаграми щодо формувального піску до трьох відомих показників доповнено новим – «ступінь освіження піску». В багаторазовому обороті формувального піску при ЛГМ регулярне додавання має становити не менше 5 % свіжого або регенованого кварцового піску в кожному циклі формовки сприяє підтриманню належної газопроникності наповнювача ливарної форми без надмірного накопичення в ньому

забруднень, що зменшує газотвірність піску і вірогідність попадання газів із ливарної форми в повітря цеху. Це підтверджує і дослідження R. Michaels (2005), який відзначає, що нерегулярне освіження піску може призводити до надмірного його забруднення і місцевого обсіпання форми та контакту металу з продуктами газифікації, не повністю видаленими з порожнини форми, та спричиняє зниження якості виливків.

В гільці «Модель» на якість виливка, крім пористості матеріалу моделі і його густини, може впливати тип ливникової системи, приклад комп'ютерного моделювання якої для ЛГМ описано в роботі S. Jordan & M. Debruin (2017). За традиційним, описаним в технічній літературі ЛГМ-процесом перевагу віддають сифонним ливниковим системам (Shulyak, 2007). Також вказано фактор вентилявання друкованих чи комбінованих (з друкованими вставками, аналогічно роботі S. Jordan *et al.*, (2021) ливарних моделей, густина яких може бути вищою, ніж у типових пінополістирольних. Останнє допомагає вивести надмірну кількість газів за межі форми через верхню частину її поверхні, або у вакуумований пісок форми по вентканалах, як показано в роботі V.S. Doroshenko (2021).

Для гілки «покриття» додано показник – «газопроникність», як важливу характеристику, яка підбирається складом (рецептурою) рідкої фарби, що утворює покриття на поверхні моделі. Газопроникність покриття – один з чинників (наряду з величиною вакууму), які регулюють протитиск газів на розплав металу і впливають на його формозаповнюваність. Подвійне нанесення фарби зменшує газопроникність її покриття.

До гілки «вакуум» внесли чинники «діаметр вакуумпроводу» та «наявність вакуум-ресивера» в цеховій системі вакуумування, що впливають на стабільність режиму вакуумування форми, оскільки її вакуум може знижуватись під час заливання цієї форми рідким металом, який може частково розгерметизовувати пісок форми (місцево пропалювати покривну синтетичну плівку на формі), особливо при заливанні багатомісних форм та кількох форм підряд. Наявність ресивера (газового акумулятора) з вакуумпроводом діаметром не нижче ДУ 50 «згладжує» можливі піки газовиділень і зниження рівня вакууму в порах піску при заливанні форм. Чинники гілок «сплав» і «вібрація» залишили на діаграмі без доповнень.

Підсумовуючи розглянуті сутність ЛГМ-процесу і його різноплановість щодо різносерійності та широкого діапазону за вагою виливків, а також вплив переліку факторів на якість виливків, що представлено на поопераційній схемі та діаграмі Ішікави, додатково зазначимо, що розвиток ливарного виробництва тісно пов'язаний з урізноманітненням продукції машинобудування (Lehmhus, 2022). Зокрема, значне поширення технології ЛГМ, що розглянута в статті, відбулося останніми десятиліттями в Китаї, який за цей час став провідною ливарно-металургійною державою, виробляючи близько половини тоннажу виливків світу.

Як зазначає у своїй роботі V.A. Gnatush (2024), хоча розповсюджений ваговий діапазон виливків для ЛГМ-процесу складає від 0,2 до 5000 кг, у Китаї швидкому нарощенню випуску литва, наряду з іншими чинниками, сприяла поява цехів ЛГМ для виробництва великих і середніх виливків з типовими для Китаю автоматизованими конвеєрними лініями рядного руху контейнерів з габаритами нерідко понад 2 м. При русі ливарного контейнера на таких конвеєрах в нього з першого (з початку формовки) бункера в засипають піщану «постіль», потім на неї встановлюють модельні кластери, з двох наступних бункерів засипають піском кластери з віброущільненням піску. Для вакуумування піску форми контейнери виконані з коробчастими каналами і сітчастими фільтрами, розташованими газопроникною сітчастою поверхнею на стінках з боку порожнини контейнера і при засипанні в контейнер піску контактують з ним. Нерідко в контейнерній формі поміщають 12-16 кластерів моделей і кожний заливають металом крізь окрему воронку, досягаючи високої металосмності форми, недоступної для форм у парних опоках для традиційних видів лиття. Досвід Китаю, як провідної ливарної держави, зумовлює значні досягнення його в машинобудуванні, що може служити прикладом для України на шляху відновлення і інноваційної трансформації власного машинобудування.

Крім того, саме 3D-технології є характерною рисою цифрових інновацій, що дозволяють «матеріалізувати» з цифрових креслень пінополімерні ливарні моделі для ЛГМ шляхом «перетворення» цифрових даних в фізичні об'єкти, що в термінах концепції «Індустрія 4.0» (Industry 4.0., 2015) називається цифро-фізичним перетворенням (digital-to-physical conversion). Ці технології у майбутньому можуть забезпечити навіть цілодобове виробництво без застосування будь-якої модельної оснастки. При цьому нескладна зміна конструкції металопродукції на її цифровому кресленні, що швидко відображається на друкованій моделі і виливкові, буде відповідати бізнес-моделі «виробництво як послуга», або виробництво на вимогу, замість інвестування у великі виробничі потужності і оснастку, як це було до появи 3D-друку в ливарному виробництві.

Висновки

Проведений аналіз ливарного виробництва широкої номенклатури металовиробів на основі технології ЛГМ служить одним з прикладів розкриття потенційних напрямів відновлення машинобудування в країні шляхом застосування таких технологій і досвіду діючих українських підприємств та наукових установ. Технологія виготовлення широкої номенклатури металопродукції, що в нинішніх непростих українських умовах застосовується передусім для дрібносерійного (ремонтного) виробництва, зберігає значні можливості сприяння відновленню галузі машинобудування, особливо на початкових етапах, шляхом розвитку невеликих підприємств. Серед переваг дрібносерійного виробництва малих підприємств

описано такі: можливість невеликих початкових інвестицій, гнучкість виробництва зі швидкою адаптацією до ринкових змін зміною асортименту продукції, її індивідуалізація за специфічними потребами замовників, інноваційний потенціал зі спрощенням впровадження нових технологій, включно з цифровізацією.

Перспективне виробництво широкої номенклатури металопродукції в ливарному цеху з процесом лиття за моделями, що газифікуються, як і показані зразки його продукції, демонструють особливість та гнучкість технології, невисокі інвестиційні потреби організації такого виробництва завдяки можливості виготовлення більшості обладнання та оснастки українськими підприємствами. У роботі також описано шляхи цифровізації з акцентом на 3D-друк ливарних моделей з засобами їх вентиляції з метою підвищення екологічності

виробництва. Візуалізація структури процесу ЛГМ за методом діаграми Ішікави з урахуванням останніх досліджень та значного досвіду удосконалення цього ливарного процесу у ФТІМС НАН України показала вплив основних технологічних параметрів на остаточну якість виливків.

Перспективні напрямки досліджень у сфері сучасних технологій ливарного виробництва зосереджуються на впровадженні новітніх матеріалів, автоматизації процесів, а також екологічно чистих технологій, які знижують енергоспоживання та викиди. Серед найбільш актуальних напрямів – розвиток адитивного лиття (Additive Casting) та застосування 3D-друку для створення форм і моделей, що дозволяє скоротити витрати часу та матеріалів на прототипування і підвищити точність виготовлення виробів.

Список використаної літератури

- [1] Askerov, M.G. (2021). New materials for the production of interchangeable parts of tillage agricultural machinery. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 2(8), 3-8. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.01.
- [2] Baykasoglu, A., Büyükoçkan, G. & Dereli, T. (2004). Technology oriented new product development in a rapidly changing world. In *Proceedings of the conference IMS-2004, 4th international symposium on intelligent manufacturing systems* (pp. 1040-1048). Sakarya: Turkey.
- [3] Bilopolskyi, M., Merkulov, M., Tsimoshynska, O., Palii, S., & Mazur, Y. (2024). Modern trends in the development of the market economy of Ukraine in the vector of the globalized innovation and investment space. *Bulletin of the East European University Economics and Management*, 1(31), 16-29. doi: 10.58253/2078-1628-2024-1(31)-002.
- [4] Cheiliakh, O.P., & Cheiliakh, Ya.O. (2020). Implementation of physical effects in the operation of smart materials to form their properties. *Progress in Physics of Metals*, 21(3), 363-463. doi: 10.15407/ufm.21.03.363.
- [5] Densen Group. (2020). *The process sequence of Lost Foam casting process*. Retrieved from <https://surl.li/dieezh>.
- [6] Doroshenko, V.C., & Kalyuzhny, P.B. (2024). Isothermal hardening of iron-carbon alloys combined with their casting. *The Scientific Technical Journal Metal Science and Treatment of Metals*, 30(1), 47-59. doi: 10.15407/mom2024.01.047.
- [7] Doroshenko, V.S. (2021). Neutralization of gases during metal casting by gasifying models and prerequisites for using 3D-printed models for this. *Casting Processes*, 145(3), 32-43. doi: 10.15407/plit2021.03.032.
- [8] Feier, A., Dankanych, V., & Niagovskyi, I. (2023). Diversification of regional economy: Key to sustainable development. *International Scientific Journal "Education and Science"*, 1(34), 238-246.
- [9] Gnatush, V.A. (2024). Metal castings market 2020-2022: World, Europe, Ukraine. *Casting Processes*, 2(156), 64-74. doi: 10.15407/plit2023.02.056.
- [10] Ishchuk, S.O. (2022). *Development of mechanical engineering in Ukraine: Problems and ways to solve them*. Lviv: State University Institute of Regional Studies named after M. I. Dolishny NAS of Ukraine.
- [11] Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The Japanese way*. London: Prentice Hall.
- [12] Jordan, S., & DeBruin, M. (2017). Additive manufacturing evaporative casting. In *Contributed papers from materials science and technology 2017 (MS&T17)* (pp. 281-288). Pittsburgh: David L. Lawrence Convention Center. doi: 10.7449/2017/MST_2017_281_288.
- [13] Jordan, S., Debruin, M., Cililic, E., & Luo, A. (2021). Thin-walled ductile iron with lost foam and nobake casting. *Modern Casting*, 111(9), 40-45.
- [14] Kumar, S., Kumar, P., & Shan, H.S. (2007). Effect of process parameters on the solidification time of Al-7%Si alloy castings produced by VAEP process. *Materials and Manufacturing Processes*, 22(7-8), 879-886. doi: 10.1080/10426910701448941.
- [15] Kushnirenko, O., & Gakhovich, N. (2023). Strategic directions of post-war recovery of mechanical engineering in Ukraine. *Economic Bulletin of the University*, (56), 5-15. doi: 10.31470/2306-546X-2023-56-05-15.
- [16] Lehmhus, D. (2022). Advances in metal casting technology: A review of state of the art, challenges and trends - Part I: Changing markets, changing products. *Metals*, 12(11), article number 1959. doi: 10.3390/met12111959.
- [17] Michaels, R. (2005). *Final technical report quantification and standardization of pattern properties for the control of the lost foam casting process*. Seymour: Industrial Analytics Corporation. doi: 10.2172/850341.
- [18] Modular mine trawl with improved characteristics. (2018). Retrieved from <https://surl.gd/gmnoop>.
- [19] Natsir, Ch. (2022). *What is advanced manufacturing and its benefits for your company?* Retrieved from <https://www.hashmicro.com/blog/what-is-advanced-manufacturing/>.

- [20] Shinsky, O.Y., Shalevska, I.A., Shinsky, V.O., Kalyuzhny, P.B., Shevchuk, T.V., Lysenko, T.V., Slyusarev, V.A., Pogrebach, E.V., & Kolomiitsev, S.V. (2018). Principles of construction and identification of a multi-level system for controlling parameters of the technological cycle of production of cast structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/1, 25-32.
- [21] Shulyak, V.S. (2007). *Casting according to gasified models*. St. Petersburg: Professional.
- [22] Sobkevich, O.V. (2024). *Directions of the development of mechanical engineering in Ukraine as a driver of economic development during the war and in the post-war period*. Retrieved from <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/napryamy-rozbudovy-mashynobuduvannya-v-ukrayini-yak-drayvera-ekonomichnoho>.
- [23] Unite engineering schools for the reconstruction of Ukraine. (2024). Retrieved from <https://kpi.ua/node/20803>.

Volodymyr Doroshenko

Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher
Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the NASU
03142, 34/1 Vernadsky Blvd., Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0070-5663>

Oleksandr Yanchenko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3888-3772>

An example of foundry technology for the production of a wide range of metal structures for further scaling in the process of developing mechanical engineering

Abstract. In view of the prospects for the development of domestic mechanical engineering, the type of production of metal products and an active example of its implementation, which are recommended for scaling, are considered. The production of a wide range of metal products in different series, characteristic of the Lost Foam Casting (LFC) technology, can contribute to the creation and strengthening of industrial growth centres at the stage of mechanical engineering restoration. This type of production allows for a quick response to market needs, requires a small initial investment, and has significant potential for scaling up. The flexibility of such production lies in the rapid adjustment of the product range, its customisation to customer requirements, and its innovative potential, which is associated with the simplified introduction of new technologies, including their digitalisation. This article describes a foundry using the LFC process. Samples of its products, features, and advantages of LFC technology are presented, along with the low investment requirements for establishing such a workshop due to the possibility of manufacturing most of the necessary equipment and accessories domestically. The strength of the foundry sand mould in LFC is ensured by the application of physical principles, specifically the unique use of the gas pressure gradient in the mould walls resulting from the evaporation of a disposable foundry pattern made of foam polymer. This enables the creation of a foundry mould from dry quartz sand, which flows around pattern structures of various geometric configurations during formation with vibration compaction, as well as the multiple circulation of this sand. The prospects for the digitalisation of the LFC process, with an emphasis on 3D printing of foundry patterns, are highlighted. The influence of the main technological parameters of LFC on the quality of castings is illustrated using an Ishikawa diagram, where individual factors are marked based on the latest research and significant experience in improving the LFC process by scientists from PTIMA of the National Academy of Sciences of Ukraine

Keywords: small-scale production; foundry; sand mould; Lost Foam Casting; development of mechanical engineering; product nomenclature

Володимир Волков*

Доктор технічних наук, професор
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-2202-3441>

Тетяна Волкова

Кандидат технічних наук, доцент
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8546-4119>

Володимир Кужель

Кандидат технічних наук, доцент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5646-0274>

Віталій Верхломчук

Аспірант
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0009-0003-7725-5271>

Назар Нікіфоров

Магістрант
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-7901-9108>

Основи інтеграції системи технічної експлуатації автомобілів в інтелектуальні транспортні системи

Анотація. Метою дослідження була побудова основ інформаційних технологій для управління роботоздатністю автомобілів з використанням Intelligent transportation system (ITS). Виконано аналіз загального стану автомобільного транспорту загального користування і його системні проблеми на сучасному етапі. Побудоване віртуальне підприємство автомобільного транспорту (ПАТ) «ХНАДУ – ТЕСА», призначене для вирішення виробничих завдань автомобільного транспорту загального користування щодо оптимізації (покращення показників) роботи парку рухомого складу (РС) і є комплексним рішенням з моніторингу і управління життєвим циклом етапу його експлуатації в невеликих підприємствах автомобільного транспорту. Воно має усі підрозділи що й типове ПАТ і може забезпечувати безперервний моніторинг (контроль) параметрів рухомого складу при незначних експлуатаційних витратах завдяки використанню як новітніх технологій мобільного бездротового зв'язку так і професійного навігаційного (зв'язного) обладнання. У склад віртуального підприємства входять такі розроблені

Suggested Citation:

Volkov, V., Volkova, T., Kuzhel, V., Verkhloenchuk, V., & Nikiforov, N. (2024). Basics of integration of vehicle technical operation system into intelligent transport systems. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 21-30. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.21.

*Corresponding author



інформаційно-програмні комплекси (ІПК) «Virtual mechanic «HADI–12», «Service Fuel Eco «NTU-HADI–12», «MonDiaFor «HADI–15», «IdenMonDiaOperCon «HNADU–16», які передбачають системну взаємодію таких основних компонентів моніторингу: роботоздатний стан автомобіля, враховуючи можливості водія і бортового інформаційного комплексу, умови експлуатації автомобіля (транспортні умови, дорожні умови, умови навколишнього природного середовища і культура праці), транспортна інфраструктура й інфраструктура автомобільних доріг. Результати, що отримано за допомогою ІПК, дають змогу отримати значення саме середніх швидкостей руху автомобіля з урахуванням геозон руху, витрати палива і відносний коефіцієнт зміни швидкості руху, який використовують з метою корегування існуючої системи ТО і Р в ПАТ, враховуючи умови експлуатації автомобіля. Результати дослідження з допомогою ІПК дозволили отримати значення середніх швидкостей руху транспортних засобів з урахуванням геозон руху, витрати палива і коефіцієнту зміни швидкості руху (відносний), який виступає основним орієнтиром під час визначення умов експлуатації кожного конкретного автомобіля

Ключові слова: автомобіль; автомобільний транспорт загального користування; технічна експлуатація автомобілів; віртуальне підприємство автомобільного транспорту; інформаційні програмні комплекси; інтелектуальні транспортні системи

Вступ

Автомобільний транспорт (АТ), згідно зі статистичними даними, відіграє роль найважливішого сектора української економіки так, як обслуговує майже всі галузі господарювання країни і всі верстви населення, покращує зростання мобільності/якості життя населення. Сучасний автомобільний парк України складається з понад 14 млн одиниць автомобілів, які можна розподілити так [1]: вантажні автомобілі – 15,5 %, автобуси – 2,6 %, легкові автомобілі – 81,9 %. Виключно шляхом ліцензування автотранспортної діяльності забезпечується державне регулювання ринку транспортних послуг в Україні. Для прикладу кількість ліцензій, які отримані юридичними і фізичними особами в Україні становить орієнтовно 140 тис. одиниць, а кількість транспортних засобів (ТЗ), які вони використовують, – до 400 тис. одиниць [1]. Згідно зі зведеними даними Головної держінспекції на АТ, частка перевізників, які експлуатують тільки один ТЗ складає 61 %, до трьох ТЗ – 22,4 %, а до п'яти ТЗ – 7 %, а також до десяти ТЗ – 5,4 %, при умові, коли більше 10 ТЗ – 4,3 %.

Виділимо такі основні системні проблеми АТ [1]:

- ◆ втрата важелів керування АТ (саме адміністративних) як цілого приватизованого сектору;
- ◆ значний спад обсягів транспортної роботи;
- ◆ часткова збитковість діяльності навіть пасажирського транспорту на різноманітних автобусних маршрутах загального користування;
- ◆ тотальне старіння рухомого складу (РС), не повністю відпрацьовані механізми його заміни;
- ◆ невідповідність структури як вантажного так і пасажирського парку наявному попиту на ці послуги з перевезень;
- ◆ низький рівень безпеки при виконанні автомобільних перевезень і з іншої сторони – значне економічне і інше навантаження на навколишнє природне середовище.

За останні 40 років в системі автомобільного транспорту загального користування (АТЗК) України пройшли суттєві зміни, які торкнулися практично всіх аспектів функціонування транспортної структури міст.

На Рисунку 1 зображені історичні етапи розвитку та формування сучасного ринку України з пасажирських перевезень [2].

Однією з найважливіших підсистем АТ є технічна експлуатація автомобілів (ТЕА), яка за визначенням [3], являє підсистему транспорту саме в структурі достатньо складної транспортно-комунікаційної програми України. Основою ТЕА є система ТО і Р, – яка являє собою комплекс заходів, спрямованих на забезпечення працездатності (рівня надійності) ТЗ в процесі експлуатації при найменших сумарних трудових і матеріальних витратах і втратах часу на основі підтримки працездатності (впливи ТО) та відновлення працездатності (впливи Р) [4].

В сфері АТЗК цей дієвий механізм управління рівнем експлуатаційної надійності парку ТЗ через гнучку систему ТО і Р було втрачено [5]. Таким чином, перед державними структурами і, насамперед, на АТЗК встає питання про необхідність відновлення регулювання та контролю за дотриманням підприємствами автомобільного транспорту (ПАТ) вимог системи ТО і Р з метою недопущення виникнення відмов ТЗ і як наслідок дорожньо-транспортних пригод з вини низької технічної надійності ТЗ. Але сучасна, сформована протягом багатьох років на АТ середньостатистична система ТО і Р вже зовсім не відповідає існуючим вимогам експлуатації. Основною перевагою даної системи є лише її можливість прогнозувати технічний стан ТЗ при відсутності систем діагностування на ПАТ. Головний недолік існуючої системи – прийняття рішення стосовно проведення робіт саме на підставі інформації лише щодо пробігу автомобіля в певних (конкретних) умовах експлуатації.

Тому під час впровадження такої системи ТО і Р не враховується реальний стан агрегатів і систем ТЗ, в результаті чого відбувається перевитрата запасних частин, і, як наслідок, підвищені витрат грошових коштів на підтримання ТЗ у справному стані [6]. Усунути зазначені недоліки існуючої середньостатистичної системи ТО і Р можливо лише за рахунок переходу на систему обслуговування і ремонту ТЗ за реальним технічним станом (Рис. 2).

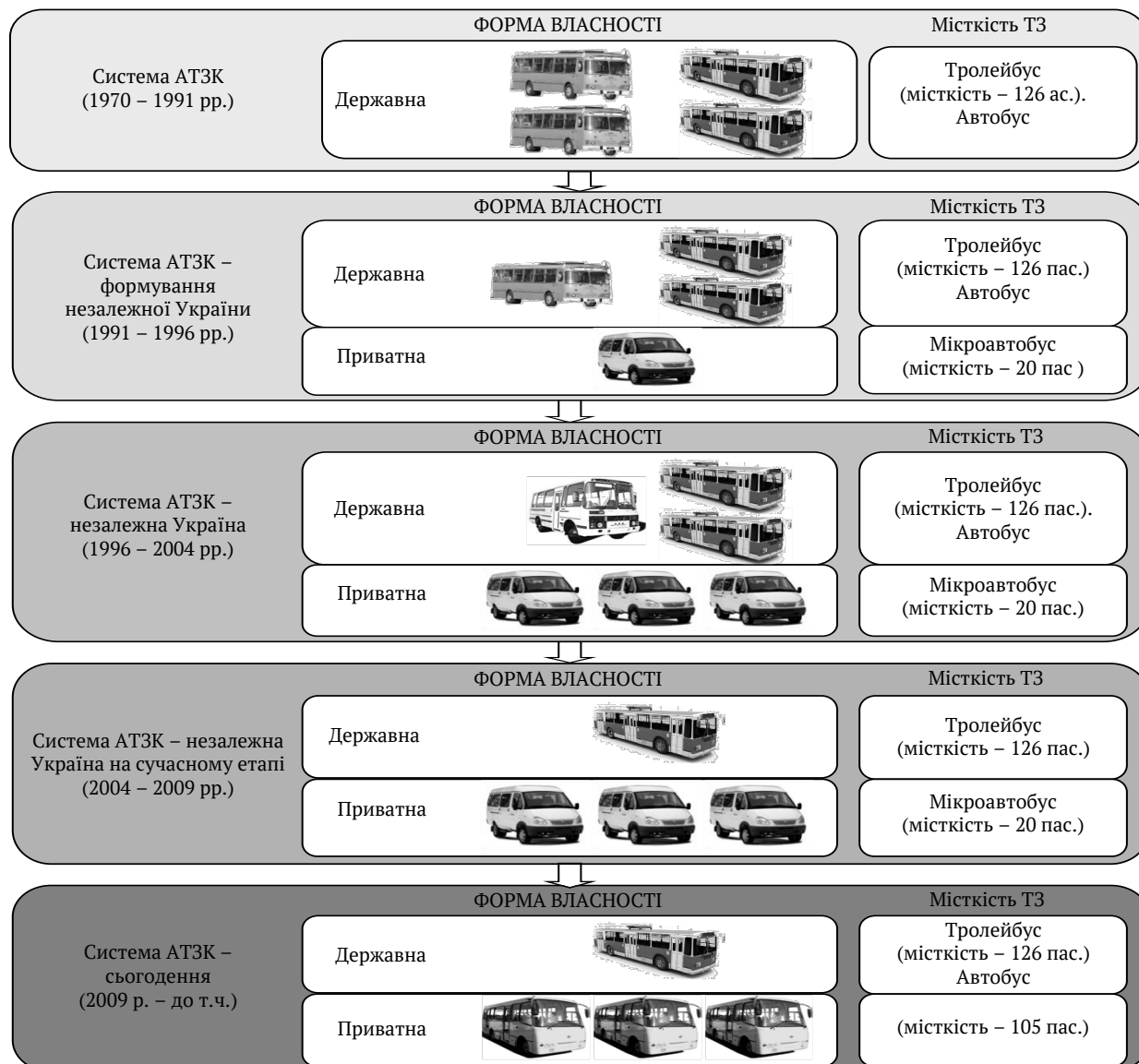


Рисунок 1. Етапи формування сучасного ринку пасажирських перевезень в Україні

Джерело: розроблено авторами

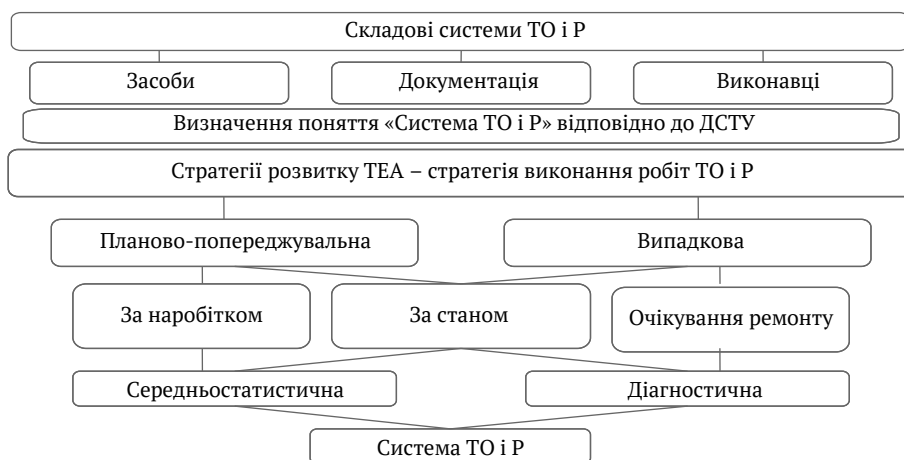


Рисунок 2. Стратегії розвитку ТЕА на АТЗК

Джерело: розроблено авторами

Вирішення такого завдання в сучасних умовах АТ можливе за рахунок впровадження на АТ телематичних систем контролю технічного стану та експлуатаційних показників ТЗ в режимі реального часу.

Телематична система – це система, що поєднує в єдиний як технічний так і технологічний комплекси вже підсистеми організації та забезпечення безпеки (перевезень, дорожнього руху), а також забезпечення інформаційного чи іншого сервісу як для учасників дорожнього руху так і інших суб'єктів транспортного процесу. У стратегічних, політичних і програмно-цілевих документах розвинених країн телематична система одержала назву інтелектуальна транспортна система (ITS) [7].

ITS у світовій практиці визнана як загальнотранспортна ідеологія, мета якої – інтеграція досягнень саме телематики в різноманітні види діяльності (транспортної в тому числі) з метою вирішення проблем як соціального так і економічного характеру, тобто значне скорочення аварійності, зростання ефективності громадського транспорту і виконання вантажних перевезень, забезпечення високого рівня транспортної безпеки країни, покращення існуючих екологічних показників [7].

Аналіз рівня розвитку інформаційних технологій, показує, що вже сьогодні на АТ можливо забезпечити контроль всього рухомого парку ТЗ, і зокрема його технічного стану, а також організувати дієву роботу технічної служби (ТС) ПАТ в автоматизованому режимі. Реальне впровадження подібних систем контролю і управління технічним станом ТЗ стало можливим за рахунок бурхливого розвитку мікропроцесорної пристроїв універсального та спеціалізованого призначення, телематичних систем, включаючи засоби зв'язку ближньої і дальньої дії, а також супутникових навігаційних систем тощо [7].

Функціональна архітектура ITS [7, 8] представляє модульну структуру ITS, в якій присутні цільові напрями її розгортання (безпеку руху, організація дорожнього руху, моніторинг параметрів ТЗ при русі і ін.), а також самоцільові групи завдань, згідно з якими формуються комплекси підсистем ITS (ТЗ, електронні карти, дорожню інфраструктуру, інтегровані підсистеми і ін.).

На АТЗК ефективне здійснення технічного контролю і управління його діяльністю потребує використання відповідних автоматизованих систем збору і аналізу даних, які доцільно використовувати для оцінки не тільки поточних значень параметрів стану ТЗ, що надходять із бортового блоку оцінки певних показників, але і для статистичної обробки накопичених даних на протязі всього процесу експлуатації. В результаті впровадження саме таких систем, на АТЗГ створюються передумови для досягнення: попередження раптових відмов; скорочення часу простою в ремонті; підвищення загальної безпеки і надійності ТЗ; забезпечення зручності виконання транспортного процесу. Крім того, в ТЕА виникає можливість оперативного планування технологічного процесу ТО і Р ТЗ і з'являється можливість визначення оптимальної структури виробничої бази ТС [4].

Слід зазначити, що сучасна структура АТЗК складається з сукупності окремих перевізників і невеликих підприємств автотранспортних підприємств (НПАТ, до 10 одиниць ТЗ – 4,3%), які грають роль нових утворень галузі, де можуть діяти три різних групи реалізації ТЕА [8].

Перша група – ТЕА, де ТО і Р здійснюється виключно власними силами підприємства. З метою організації окремого структурного підрозділу для ТЗ, що буде займатися виключно ТЕА слід вкласти значні початкові кошти (сформувати штат кваліфікованих фахівців і закупити певний перелік обладнання, а також створити ефективну роботу складів. Для великої кількості сучасних НПАТ, які існують в Україні (90 %), такі витрати нерациональні і непродуктивні. Друга група – ТЕА виконується з залученням підрядних підприємств чи організацій. Ці підприємства чи організації мають вже власний штат висококваліфікованих фахівців і забезпечені власною виробничою технічною базою.

Третя група реалізації виконання ТЕА, які реалізовані саме у вигляді обслуговувань сервісних як гарантійних так і післягарантійних. У цьому випадку договірні відносини з цими сервісами (спеціалізованими) формуються ще на етапі купівлі нового ТЗ, або після початку його експлуатації саме в гарантійний період. Особливість фірмового сервісу в тому, що при його реалізації найбільш яскраво виражаються плюси ІПБ/CALS/PLM-технологій, так як стан рухомого складу в цілому знаходиться під пильним контролем фахівців починаючи від складального конвеєра на підприємстві-виробнику і аж до місця експлуатації, а обов'язковою дією є підключення РС до мережі «Інтернет», з метою контролю і збереження всієї діагностичної інформації.

Через застосування на автомобілях як сучасних одночасно складних (проте високоєфективних) систем керування (електронних) так і вбудованих систем бортової діагностики, стрімкого розвитку систем навігації (супутникових) й сучасних засобів зв'язку (мобільного), інших сучасних технологій передачі даних з'явилася можливість не лише визначати в кожний момент часу географічне положення РС (GPS координати) і мати цілодобовий зв'язок з диспетчером – механіком НПАТ, але й контролювати постійно технічний стан автомобіля, що дозволяє реалізувати широке коло завдань з виявлення, діагностування та прогнозування на певний пробіг безвідмовності автомобіля.

Створення нових підходів до інтеграції системи технічної експлуатації автомобілів в інтелектуальні транспортні системи може бути здійснено у вигляді віртуальних підприємств в структурі АТЗК. Метою дослідження є побудова основ інформаційних технологій для управління роботою автомобілів в умовах ITS.

Результати

Створення віртуального підприємства і ППК для управління роботою автомобілів в ITS. Віртуальне підприємство – може бути реалізоване як метод співпраці суб'єктів ринку для реалізації конкретного

проекту, коли взаємодія між віддаленими учасниками здійснюється за допомогою саме розподіленого інформаційного середовища із застосуванням сучасних електронних засобів комутації [9]. Призначення побудованого авторами віртуального ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА»

це розв'язок cfvт виробничих завдань АТЗК стосовно оптимізації чи покращення ефективності роботи парку РС і являється комплексним підходом моніторингу/управління життєвого циклу (ЖЦ) чи окремого етапу/періоду експлуатації РС в НПАТ (Рис. 3) [10].

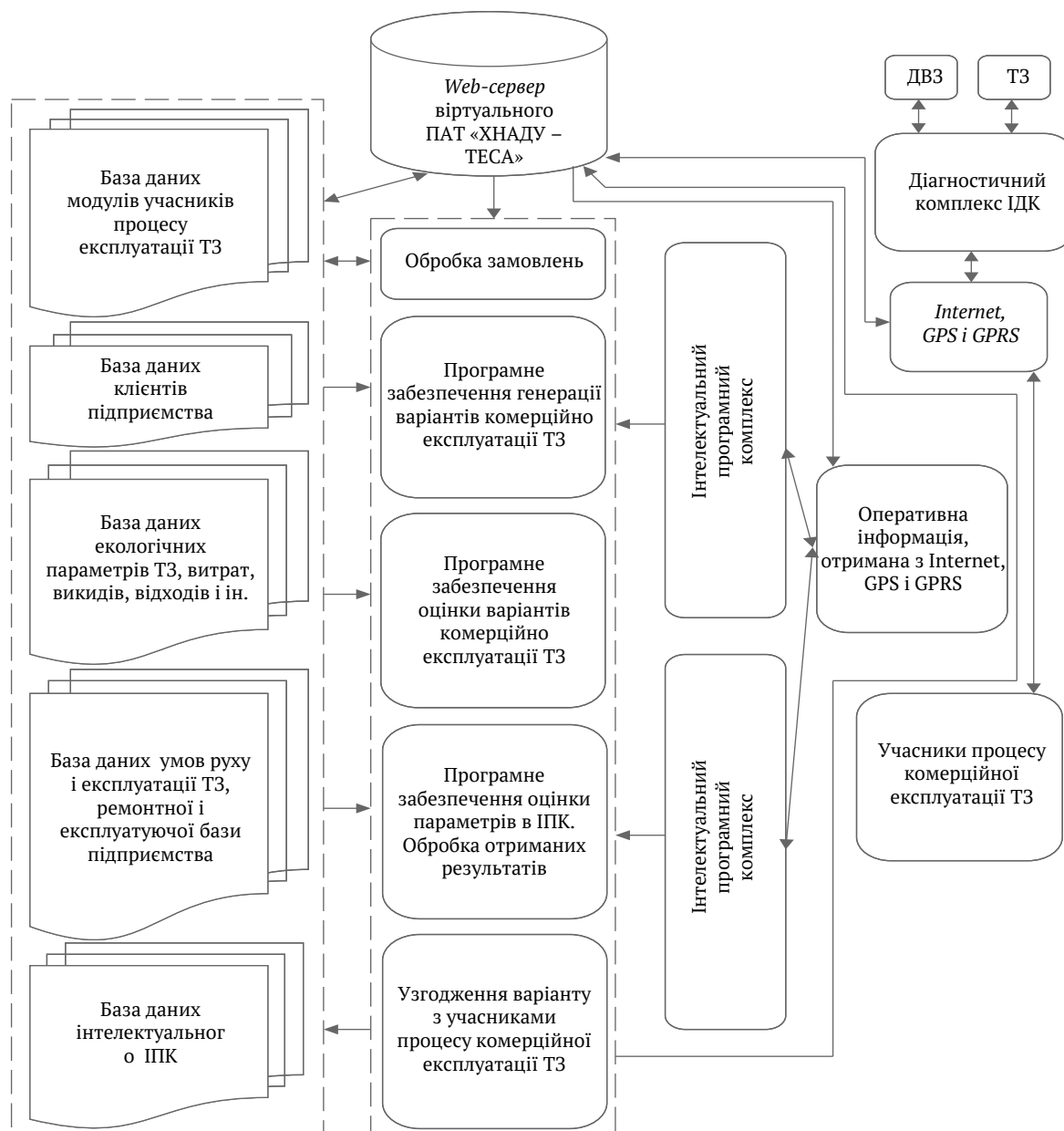


Рисунок 3. Функціональна структура взаємодії ІПК з елементами віртуального ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА»

Джерело: розроблено авторами на основі [10]

Віртуальне підприємство має майже усі підрозділи, що і типові ПАТ і може забезпечувати безперервний моніторинг (контроль) параметрів РС при незначних експлуатаційних витратах шляхом використання сучасних технологій саме бездротового зв'язку (мобільного) і якісного навігаційно-зв'язного обладнання. Впровадження такої системи стане якісно новим рівнем керування як окремими АТЗ, так і всім парком АТЗК.

Перевагою системи моніторингу віртуального підприємства «ХНАДУ – ТЕСА» є:

- ♦ автоматичний (безперервний) контроль над процесом руху РС з моніторингом і оцінкою умов експлуатації в режимі реального часу, контроль часу проходження маршрутів і відповідності графіків роботи, постійне відображення маршрутів РС з точним місцезнаходженням РС в он-лайн картах (електронних);

- ♦ автоматичний (безперервний) контроль таких параметрів: технічного стану РС, виконання режиму проведення необхідних дій при ТО і Р з дослідженням рівня надійності РС і ефективності ТЕА;

- ♦ швидкість доставки повідомлень і подальше їх архівування і зберігання;

- ♦ повна конфіденційність даних, які обробляються системою, і відомостей, що отримуються і формуються в системі;

- ♦ можливість повної інтеграції з сучасними системами (інформаційними) НПІАТ;

- ♦ можливість підключення додакових (виконаних згідно з побажанням і замовленням клієнтів) так званих спеціальних модулів ІПК для вирішення різних поточних завдань;

- ♦ відносно низька собівартість обладнання;

- ♦ низькі витрати на тривале використання системи.

Віртуальне ПАТ «ХНАДУ- ТЕСА» – це ІПК (телематична платформа), яка побудована на технології «клієнт-сервер» із застосуванням *Web-технологій*, а її складовими являються: геоінформаційна система (ГІС) телематичного сервера, сам власне телематичний сервер, базове ПЗ «Virtual mechanic «HADI-12»» – робочого місця диспетчера-механіка, ПЗ телематичного сервера BN-Complex™, ІПК «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12»»; абонентські термінали (навігатори-приймачі РС) та ін.

Основні функції/можливості системи віртуального ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА» можна умовно поділити на такі функції: моніторингу, як управління так і зберігання інформації з можливістю з'єднатися із зовнішніми інформаційними системами (ІС).

Розрізняють такі функції моніторингу системи віртуального ПАТ «ХНАДУ -ТЕСА»:

- ♦ визначення параметрів (автоматичне) стану агрегатів, систем і механізмів РС, які є у вільному доступі в бортовій системі діагностування (OBD);

- ♦ визначення (автоматичне) навігаційних параметрів РС (азимут, GPS координати, швидкість руху, і ін.);

- ♦ визначення (автоматичне) параметрів стану РС саме за показниками контрольних приладів навігаторів/приймачів (телематичних). Приклад реалізації – наявність і «якість» живлення в системі керування циками двигуна і ін.);

- ♦ стан замків (відкриті/закриті) дверей кабіни чи пасажирського салону; ввімкнення системи як звукової так і світлової сигналізації;

- ♦ датчики положення в просторі кузова самоскида;

- ♦ відповідність роботи устаткування як навісного так і додаткового, контроль температурних режимів, фіксація перевищення дозволеної швидкості руху;

- ♦ рівень рідин в бачках (радіатор, бачок, цистерна);

- ♦ передача (автоматична) в НПІАТ навігаційної і іншої потрібної інформації стосовно стану чи показників роботи РС через наперед заданий час (з періодичністю від 20 і більше секунд);

- ♦ передача (автоматична) в НПІАТ позачергових повідомлень стосовно зміни параметрів стану чи

показників роботи РС через спрацювання контрольних пристроїв або датчиків (коли водій натиснув тривожну кнопку, контроль і налаштування роботи додаткового устаткування, довгий простій об'єкту, входження показників об'єкту контролю в певну зону або вихід за її межі);

- ♦ занесення (автоматичне) різної інформації: навігаційної, щодо стану РС в окрему незалежний запам'ятовуючий пристрій, який збереже інформацію у випадку втрати доступу до каналів зовнішнього зв'язку, з наступною відправкою записаних даних в НПІАТ(автоматичною або за запитом);

- ♦ відслідковування (автоматичне) за тим як РС слідує маршруту або графіком руху з можливістю подачі при відхиленнях значень попереджувального повідомлення;

- ♦ можливість детальнішого вибору окремих складових одиниць, вузлів, агрегатів РС для збору та аналізу даних по ним в режимі реального часу;

- ♦ відображення в зручній формі (наприклад в графічній) розташування і параметрів РС;

- ♦ зберігання даних щодо місцеположення і стану РС в текстовій формі, краще у вигляді таблиць;

- ♦ відображення в НПІАТ саме позачергових повідомлень про необхідну заміну стану РС у вигляді наприклад «тривожних вікон» з подачею відповідного сигналу.

Сформуємо основні функції управління системою віртуального ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА»:

- ♦ можливість формування на картах місцевості (електронних), наприклад Google maps, контрольних зон і точок для контролю переміщення РС (Рис. 4);

- ♦ забезпечення контролю і аналізу фактичного пробігу РС через певний пробіг;

- ♦ можливість передачі команд диспетчера – механіка саме на виконавчі пристрої РС (результатом може бути – наприклад при несанкціонованому доступі – блокування системи пуску, вимкнення двигуна, ввімкнення аварійних сигналів, виклик водія, управління додатковим обладнанням);

- ♦ здійснення голосового зв'язку диспетчера НПІАТ з водіями РС;

- ♦ реалізація автоматичного запису в журналі подій, де реєструються всі дії проведені диспетчером НПІАТ.

Основні функції системи «ХНАДУ – ТЕСА» стосовно збереження інформації і можливості інтеграції з зовнішніми ІС:

- ♦ можливість зберігання інформації в єдиній базі даних (БД) (*MS SQL* або *Interbase*);

- ♦ забезпечення процесу перетворення інформації у зручний формат, що сумісний з призначеними форматами саме для користувача ІС;

- ♦ забезпечення обміну даними;

- ♦ можливість створення БД у зручному для користувача форматі, для створення архівів.

За принципом побудови система віртуального ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА» містить три основні частини:

- ♦ «РС» – об'єкти моніторингу;

- ♦ «мережі передачі інформації» – *GSM/GPRS, Internet*;

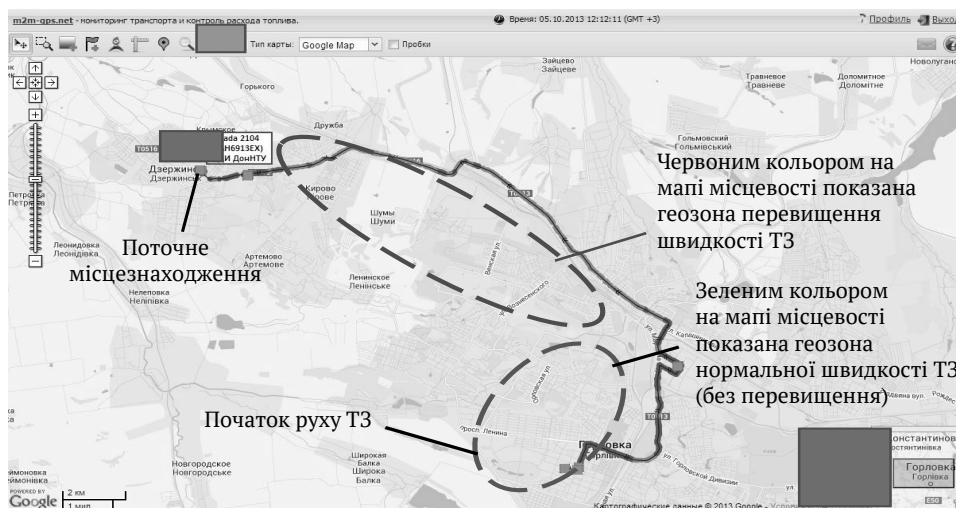


Рисунок 4. Інтерфейс програми обробки і виводу інформації про місцезнаходження ТЗ в режимі «on-line»

Джерело: розроблено авторами

◆ «Система обробки і зберігання інформації» – так званий «телематичний сервер».

РС на підприємствах, які користуються послугами віртуального ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА», має бути обладнаний навігаційно-зв'язними і приймально-передаючими пристроями, які дають змогу проводити цілодобовий контроль навігаційних і технічних параметри РС різноманітних категорій. Весь наявний об'єм як навігаційної, так і іншої інформації (частіше технічної), яку отримують від РС, що досліджується, далі вже поступає на телематичний сервер і зберігається в базі даних (MS SQL або Interbase), потім стає доступним користувачам, здобувачам і дослідникам в науково-диспетчерському центрі ХНАДУ, де піддається подальшій обробці і аналізу за допомогою спеціально розроблених ІПК «Virtual mechanic HADI-12», «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12», «MonDiaFor «HAD-15», «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16» [10] та ін.

Наступний етап – інформація в «режимі блогу» з сайту khnadu.com, відкривається в доступі клієнтам – тобто власникам як окремих одиниць РС, так і всього парку РС, тобто будь-якому фахівцю, який бере участь в координації роботи свого НПІАТ.

ІПК «Virtual mechanic «HADI-12» призначений для підвищення ефективності діяльності ПАТ шляхом вирішення завдань з організації і управління, контролю, розрахунку і аналізу показників роботи системи ТО і Р НПІАТ.

ІПК «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12» має вже повнофункціональний набір можливостей ІПК «Віртуальний механік «HADI-12» [9], а також ще додаткові можливості, які згруповані в окремому блоці ІПП «Екологічні показники». В основу цих блоків лягли дослідження [11], які призначені для поліпшення показників паливної економічності та екологічної безпеки ТЗ.

Наступний ІПК «MonDiaFor «HADI-15» (monitoring, diagnosis, forecasting technical condition of the vehicle under ITS) призначено для ідентифікації ТЗ і оцінки поточного стану його двигуна, моніторингу необхідних параметрів, діагностування, прогнозування, аналіз параметрів технічного стану ТЗ в умовах ITS. Повний алгоритм роботи ІПК приведено в дослідженнях [12–15], а на Рисунок 5 показано приклад роботи програмного модуля M2M lab в режимі обробки і виводу інформації про місцезнаходження ТЗ в режимі on-line з виділенням геозон.

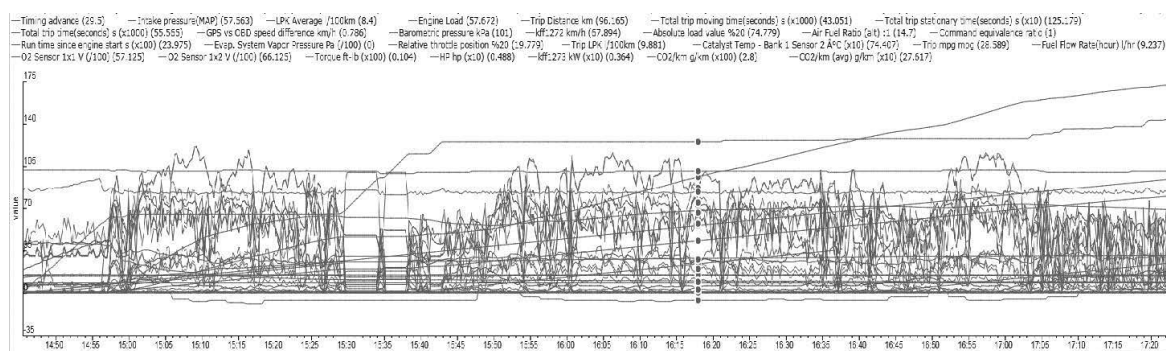


Рисунок 5. Робоче вікно Torque з результатами моніторингу запропонованих параметрів технічного стану ТЗ

Джерело: розроблено авторами

Крім цього, при використанні програмного модуля моніторингу M2M Lab в ІПК ІПК «MonDiaFor «HADI-15» віртуального ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА» замовникам можуть бути надані такі сервіси:

1. Керування дорожнім рухом: 1.1. Підтримка транспортного планування; 1.2. Керування в надзвичайних транспортних ситуаціях; 1.3. Керування вимогами щодо транспортування; 1.4. Керування технічною експлуатацією інфраструктури.

2. Інформація для мандрівників: 2.1. Інформація перед поїздом; 2.2. Інформація під час руху для водіїв; 2.3. Інформація під час руху для громадського транспорту; 2.4. Індивідуальні інформаційні послуги; 2.5. Дорожні вказівки й навігація.

3. Комерційні транспортні засоби: 3.1. Керування парком комерційних транспортних засобів.

4. Суспільний транспорт: 4.1. Керування суспільним транспортом; 4.2. Керування транспортом на вимогу.

5. Керування в надзвичайних ситуаціях: 5.1. Сигналізація про небезпечну ситуацію й особиста безпека; 5.2. Керування аварійно-рятувальним транспортом; 5.2. Небезпечні вантажі й попередження інцидентів.

6. Електронні платежі: 6.1. Електронні фінансові перерахунки.

7. Безпека, тощо.

Для оперативного контролю процесів експлуатації і забезпечення взаємодії ТЗ з транспортною інфраструктурою і інфраструктурою автомобільних доріг, а також оцінки умов експлуатації ІПК «MonDiaFor «HADI-15» було удосконалено в ІПК «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16» [13]. Він отримав можливості працювати з програмними і інформаційними модулями Carlife, Torque (Рис. 5), Meteosco, Google.Пробки та ін.

Для коригування ТО і Р РС ТС ПАТ використовується відносний коефіцієнт зміни швидкості руху (ВКЗШР) ТЗ, який визначається середньою технічною швидкістю руху ТЗ і який прийнято в якості основного критерію при визначенні групи умов експлуатації. Визначення швидкості ТЗ в умовах експлуатації здійснювалось за допомогою ІПК «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16», звіт якого використовувався для оцінки зміни ВКЗШР (Рис. 6). ВКЗШР на дослідному шляху руху ТЗ змінювався в межах 0,69–1,25, що належить до першої групи умов експлуатації.

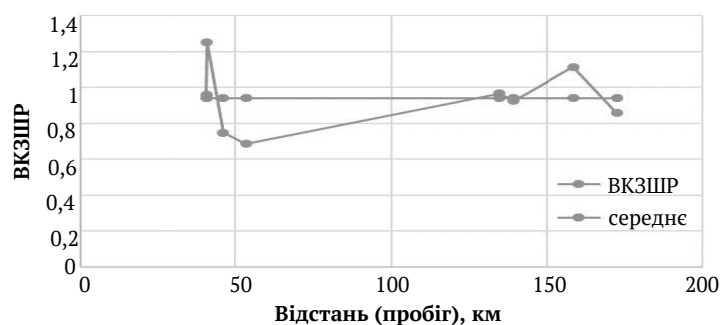


Рисунок 6. Результати дослідження відносного коефіцієнту зміни швидкості руху (ВКЗШР) на дослідній ділянці
Джерело: розроблено авторами

Висновки

Розроблено авторами віртуальне ПАТ «ХНАДУ – ТЕСА» має такі ж типові підрозділи, як і звичайне (реальне) підприємство автомобільного транспорту. Впровадження віртуального ж підприємства – якісно новий рівень управління парком АТЗК, призначення якого полягає в вирішенні виробничих завдань щодо оптимізації роботи всього парку РС і є вже комплексним рішенням щодо моніторингу і управління ЖЦ чи окремим етапом експлуатації РС в невеликих підприємствах автомобільного транспорту.

Отже, віртуальне ПАТ включає в себе наступні інформаційні програмні комплекси «Virtual mechanic «HADI-12», «Service Fuel Eco «NTU-HADI-12», «MonDiaFor

«HADI-15», «IdenMonDiaOperCon «HNADU-16», які дозволяють отримувати інформацію про технічний стан ТЗ, поєднувати інформацію стосовно дорожніх, транспортних і атмосферно-кліматичних умов експлуатації ТЗ. Результати, що отримано з допомогою ІПК, дозволяють отримати значення шуканих середніх швидкостей руху ТЗ з урахуванням геозон руху, витрати палива і відносний коефіцієнт, який характеризує зміну швидкості руху і є основним орієнтиром при врахуванні умов експлуатації ТЗ. В роботі авторами показано напрям основ інтеграції системи технічної експлуатації автомобілів в інтелектуальні транспортні системи і втілення адаптивної системи технічного обслуговування і ремонту ТЗ.

Список використаної літератури

- [1] Redzyuk, A.M. (Ed.). (2005). *Road transport of Ukraine: Status, problems, development prospects*. Kyiv: State Enterprise "Derzhavtotrans NDIproekt".
- [2] Taran, I.O., Grishchenko, Ya.V., & Kucheryava, M.A. (2010). Status and prospects of passenger transportation services for the city of Dnipropetrovsk. *Scientific Bulletin of NGU*, 7-8, 135-137.

- [3] Dembitsky, V.M., Pavlyuk, V.I., & Prydyuk, V.M. (2018). *Technical operation of vehicles*. Lutsk: LNTU.
- [4] Andrusenko, S.I., & Bugaychuk, O.S. (2017). *Technology for increasing the efficiency of the production and technical base of road transport enterprises*. Kyiv: NTU.
- [5] Volkov, V.P., Volkova, T.V., Volkov, Y.V., & Hrytsuk, I.V. (2019). *Current state of road transport and prospects for the development of technical operation of vehicles*. *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, 16, 77-87.
- [6] Gritsuk, I.V., Volkov, V., Mateichyk, V., & Grytsuk, Y. (2018). Information model of V2I system of the vehicle technical condition remote monitoring and control in operation conditions. *SAE Technical Paper*, 2018-01-0024. doi: 10.4271/2018-01-0024.
- [7] Volkov, V.P., Mateychik, V.P., Komov, P.B., Komov, O.B., & Hrytsuk, I.V. (2013). *Organization of technical operation of vehicles in the conditions of formation of intelligent transport systems*. *Bulletin of NTU "KhPI". Collection of scientific papers. Series: Automobile and Tractor Manufacturing*, 64(970), 36-42.
- [8] Hrytsuk, I.V., Volkov, V.P., Khudyakov, I.V., Volkova, T.V., & Kuzhel, V.P. (2022). *Operational control of the technical condition of vehicles*. Kharkiv-Kherson-Vinnytsia: "Edelweiss and K".
- [9] Krasnokutska, Z.I., Volkov, V.P., Komov, P.B., Komov, O.B., Hrytsuk, I.V., Makedonska, L.O., Komov, A.P., & Komov, Y.O. (2013). *Technical regulations of the software product "Virtual mechanic 'NADI-12'" when registering a new vehicle in it*. (Patent of Ukraine No. 47233). State Intellectual Property Service of Ukraine.
- [10] Volkov, V.P., Mateychik, V.P., Komov, P.B., Komov, O.B., & Hrytsuk, I.V. (2013). *Organization of technical operation of cars in the conditions of formation of intelligent transport systems*. *Bulletin of NTU "KhPI". Collection of scientific papers. Series: Automobile and Tractor Manufacturing*, 29(1002), 138-144.
- [11] Volkov, V.P. et al. (2014). *Technical regulations of the software product "Service Fuel Eco 'NTU-HADI-12'" during normal operation (Work of scientific and practical nature)*. (Patent of Ukraine No. 53292). State Intellectual Property Service of Ukraine.
- [12] Volkov, V.P., Hrytsuk, I.V., Hrytsuk, Yu.V., & Volkov, Yu.V. (2018). *Formation and analysis of information structural elements of the model of the system for monitoring the parameters of the technical condition of a vehicle*. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, 1(18), 136-148.
- [13] Volkov, V.P. et al. (2017). *Technical regulations and results of the information software complex (product) "IdenMonDiaOperCon 'HNADU-16'" when identifying, monitoring the parameters of the technical condition, diagnosing, identifying the operating conditions of a vehicle in the conditions of intelligent transport systems (Work of scientific and practical nature)*. (Patent of Ukraine No. 75506). State Intellectual Property Service of Ukraine.
- [14] Volkov, V.P., Hrytsuk I.V., Kuzhel V.P., Volkova T.V., & Plekhova G.A. (2022). *Status and implementation of innovative technologies in the technical operation of vehicles*. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 8(1), 23-33.
- [15] Volkov, V., Gritsuk, I., Taran, I., Volkova, T., Kuzhel, V., Semenov, A., & Voznyak, O. (2024). Information systems for vehicles technical condition monitoring. In A. Semenov, I. Yepifanova & J. Kajanová (Eds.), *Data-centric business and applications. Lecture notes on data engineering and communications technologies* (Vol. 195, pp. 61-96). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-031-54012-7_4.

Volodymyr Volkov

Doctor of Technical Sciences, Professor
Kharkiv National Automobile and Highway University
61002, 25 Yaroslav Mudryi Str., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-2202-3441>

Tetiana Volkova

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kharkiv National Automobile and Highway University
61002, 25 Yaroslav Mudryi Str., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8546-4119>

Volodymyr Kuzhel

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5646-0274>

Vitaliy Verkhloenchuk

Postgraduate Student
Kharkiv National Automobile and Highway University
61002, 25 Khmelnytske Shose Str., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-7725-5271>

Nazar Nikiforov

Student
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-7901-9108>

Basics of integration of vehicle technical operation system into intelligent transport systems

Abstract. The purpose of this study was to establish foundational information technologies for managing the operational efficiency of vehicles through an Intelligent Transportation System (ITS). The study included an analysis of the current state of public road transport and the systemic challenges it faces. A virtual road transport enterprise, PJSC “KhNADU – TESA”, has been created to address production tasks in public road transport. This enterprise aims to optimize the operation of the rolling stock fleet (RS) and provides a comprehensive solution for monitoring and managing the lifecycle of operations at small road transport enterprises. It incorporates all the divisions typical of a public joint-stock company (PJSC) and offers continuous monitoring of rolling stock parameters at low operating costs. This is achieved through modern mobile wireless communication technologies and professional navigation and communication equipment. The virtual enterprise consists of several developed information and software complexes (IPC), including “Virtual Mechanic ‘HADI-12’”, “Service Fuel Eco ‘NTU-HADI-12’”, “MonDiaFor ‘HADI-15’” and “IdenMonDiaOperCon ‘HNADU-16’”. These complexes facilitate the interaction of various monitoring components, such as the operational condition of the vehicle and the driver, the on-board information system, vehicle operating conditions (including road, transport, atmospheric, and climatic conditions), and the transport and highway infrastructure. The results obtained through the IPC enable the calculation of average vehicle speeds while considering geozones, fuel consumption, and the relative coefficient of speed change. This data serves as a key guideline for determining vehicle operating conditions and adjusting the existing management and analysis systems in PJSC. Future plans include obtaining results using the IPC to provide insights into average vehicle speeds, fuel consumption, and relative speed change coefficients, which will further aid in assessing the operating conditions of specific vehicles

Keywords: car; public road transport; technical operation of cars; virtual road transport enterprise; information software complexes; intelligent transport systems

Михайло Грубель*

Доктор технічних наук, професор
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
79026, вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4820-6935>

Михайло Манзяк

Ад'юнкт штатний
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
79026, вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5634-9231>

Олексій Кузнєцов

Кандидат технічних наук, доцент
Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
79026, вул. Героїв Майдану, 32, м. Львів, Україна
Національний університет "Львівська політехніка"
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0516-5109>

Тарас Крайник

Аспірант
Львівський національний університет природокористування
80831, вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Україна
<https://orcid.org/0009-0003-7530-6194>

Георгій Худавердян

Аспірант
Львівський національний університет природокористування
80831, вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5257-4581>

Спектральна оцінка вібронавантажень легкого військового автомобіля

Анотація. Проведено аналіз умов застосування легких військових автомобілів під час ведення бойових дій. Враховуючи інтенсивність використання військових автомобілів на фронті, зокрема збільшення експлуатаційних швидкостей та роботу зразків на межі їх технічних можливостей в умовах бездоріжжя та з метою зменшення вібраційних навантажень на водія, екіпаж, елементи конструкції військового автомобіля та вантажі, запропоновано як варіант виходу із ситуації на сучасних зразках використовувати довгоходові підвіски. За аналізом попередньо проведених досліджень встановлено частотні межі чутливості організму людини у вертикальному та горизонтальному напрямках. Для проведення оцінки плавності руху легкого військового автомобіля «Мамай» та спектральної оцінки вібронавантажень на водія й екіпаж розроблено імітаційну модель роботи підвіски в

Suggested Citation:

Hrubel, M., Manziak, M., Kuznyetsov, O., Kraynyk, T., & Khudaverdian, H. (2024). Spectral evaluation of vibration loads of light military vehicle. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 31-37. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.31.

*Corresponding author



умовах бездоріжжя. У подальшому визначено вібронавантаження на водія та після порівняння їх із результатами проведеного експериментального дослідження оцінено відповідність результатів і адекватність імітаційної моделі. Різниця в амплітудах вертикальних прискорень на робочому місці водія під час експерименту та комп'ютерного моделювання не перевищувала 12–15 %. Для співставлення експериментальних даних та даних, отриманих шляхом імітаційного моделювання із регламентованими стандартами санітарними нормами і величинами, засобами математичного процесора Matlab проведено безпосереднє визначення середньоквадратичних значень віброприскорень в октавних смугах, для чого розроблено відповідну програму, оскільки вбудована функція *roctave* середовища Matlab не дозволяє провести аналіз для частот нижче 3 Гц

Ключові слова: віброколивні навантаження; легкий військовий автомобіль; підресорена маса; плавність ходу; середньоквадратичне віброприскорення; система підресорення; спектральний аналіз

Вступ

Виконання легкими військовими автомобілями (ЛВА) завдань під час ведення бойових дій пов'язано з вимогою одночасного забезпечення високої швидкості, прохідності та надійної їх експлуатації у важких дорожніх умовах. Це призводить до частих поломок як окремих елементів конструкції, так і змонтовано на їх базі обладнання, підвищеної втомленості екіпажів і, як наслідок, зниження ефективності виконання завдань [1]. У зв'язку з вимушеним зростанням середніх експлуатаційних швидкостей необхідність максимального підвищення плавності ходу ЛВА та безпеки його руху за умов активного використання дорогами та бездоріжжям під час ведення бойових дій висуває питання раціональної конструкції підвіски як одну із найважливіших проблем сучасного автомобілебудування. Вирішення цієї проблеми ведеться як у напрямку пошуку нових схем підвісок, так і шляхом створення пружних елементів нових типів і підвищення їх довговічності. Важливо також забезпечити обмеження вібронавантаженості на водія, екіпаж, вантажі, компоненти шасі та кузова в діапазоні швидкостей на рівні, який не призведе до неприємних відчуттів і швидкої стомленості людей, пошкодження вантажів і елементів конструкції. Вібронавантаженість впливає на багато експлуатаційних характеристик автомобіля, включаючи середню швидкість, витрату палива, безпеку руху, довговічність і працездатність. Це включає відчуття водія та пасажирів, збереженість вантажів і конструктивні елементи.

Сучасні міжнародні зразки ЛВА поступово переходять на довгоходові незалежні підвіски [2]. Це дає змогу значно зменшити невідповідності маси та, відповідно, вібронавантаженість екіпажу та кузова. У роботі [3] розглянуто формування вимог до автомобілів та бойових броньованих машин. Серед них визначено, що система підресорення повинна забезпечувати мінімальну втомлюваність водія при русі ґрунтовими дорогами та бездоріжжям протягом не менше 3-х годин.

Метою роботи є розроблення методики спектрального аналізу вібронавантажень військового автомобіля під час руху бездоріжжям та проведення порівняльної спектральної оцінки вібронавантаженості водія ЛВА «Мамай».

Результати

Під час руху автомобіля дорогами та бездоріжжям виникають лінійні коливання центру мас у напрямках осей власної системи координат та кутові коливання його корпусу. Останні зумовлені наступними чинниками: нерівністю опорної поверхні (ОП), нестабільністю реактивних моментів, що діють на автомобіль при зміні опору руху або швидкісного режиму, незбалансованістю мас коліс при зміні опору руху або швидкісного режиму, незбалансованістю мас коліс, неминучими коливаннями елементів трансмісії та рушія [4]. Для дорожнього автомобіля головним чинником коливань є нерівність ОП, для позадорожнього важливі й інші чинники, оскільки умови руху спричиняють великі навантаження моментами коліс і трансмісії. Коливання мають значний вплив на організм людини, яка за фізіологічними властивостями пристосована до частоти ходи матері. Тому вважається, що у легкових автомобілів частоти коливань щодо нормалі ОП повинні обмежуватися значеннями 50–70 циклів/хв. або 0,8–1,3 Гц.

Водій та екіпаж суб'єктивно оцінюють плавність руху. Втома та прискорення коливань пов'язані з відчуттями людей. Найпростішим способом вимірювання плавності ходу є частота власних коливань кузова. Експерименти показали, що сукупність величин власних частот коливань разом із середньою частотою кроків людини (60–90 за хв.), яка відповідає 1–1,5 Гц, є умовою плавності ходу [5]. Тому при проектуванні нових автомобілів із визначеними умовами руху, а також модернізації існуючих під ті чи інші умови експлуатації, чи використання під час ведення бойових дій, особлива увага приділяється розробленню та дослідженню підвіски. Це важливо з огляду на те, що підвіска автомобіля є сукупністю пристроїв, що сполучають міст чи колеса з рамою (кузовом) автомобіля, призначені для зменшення динамічних навантажень під час руху нерівностями дороги і які забезпечують передачу всіх сил і моментів, що діють між колесами і рамою (кузовом) [6, 7].

Важливо відзначити, що плавність руху автомобіля, як його експлуатаційна властивість повинна забезпечувати можливість тривалої їздки різноманітними дорогами без втоми або тяжких відчуттів у водія та екіпажу, а також високі швидкості руху та цілісність перевезених вантажів. Плавність ходу автомобіля – це

сукупність різних характеристик, які забезпечують обмеження в межах встановлених норм віброколивних навантажень водія, екіпажу, вантажів, елементів шасі та кузова. Норми вібронавантаження встановлюються таким чином, щоб вібрація автомобіля в діапазоні експлуатаційних швидкостей не викликала неприємних відчуттів і швидкої стомленості водія та пасажирів, а вібрація елементів шасі та кузова не завдала шкоди вантажам [5]. Крім того, для перевезення пасажирів плавність ходу є однією з найважливіших експлуатаційних характеристик. Він є більш важливим, ніж інші фактори комфортності руху, такі як мікроклімат у салоні, легкість керування, ергономіка та розміщення сидінь, шумність руху тощо.

Отже, оцінкові параметри плавності руху автомобіля повинні характеризувати вплив коливань на водія, екіпаж та вантажі, що перевозяться. Допустимий рівень коливань для організму людини є обмеженим, а це означає, що при відсутності спеціальних обмежень за допустимою інтенсивністю коливань для перевозимого вантажу, то оцінкові критерії повинні бути адаптовані до сприйняття коливань людиною. Дослідження показали, що частота, інтенсивність, напрям і тривалість вібрації впливають на чутливість людини до вібрації. Людина найбільш чутлива до вібрації на частотах 4–8 Гц у вертикальному напрямку та 1–2 Гц у горизонтальному напрямку. Це пов'язано з тим, що коливання у вертикальному напрямку із зазначеною частотою негативно впливають на вестибулярний апарат, порушують серце

та викликають резонансні коливання внутрішніх органів. Розроблені стандарти та дозволені рівні вібронавантаженості для людей, щоб оцінити вплив частоти власних коливань підресорених мас на функціональну діяльність організму. При розробленні норм враховувалося, що реакція організму людини залежить від частоти впливів, частотний склад яких прийнято ділити на октави. Октавою є смуга частот, у якій кінцева гранична частота є в 2 рази вищою від початкової. Допустимий рівень вібрацій, що діють на водія та екіпаж, визначений відповідним ще радянським стандартом [8], який втратив свою чинність. Але чинним є стандарт 2631 міжнародної організації по стандартизації (ISO) [9], який прийнято Україною у 2004 році. Відповідно до зазначеного документа нормованими параметрами є середньоквадратичні значення вертикальних віброприскорень в октавних смугах, що діють на людину безперервно протягом 8 годин. Відповідно до зазначеного стандарту плавність ходу автомобіля оцінюється величиною середньоквадратичних віброприскорень підресорених масу діапазоні частот 0,7–22,4 Гц. Зверніть увагу, що середні квадратичні значення віброприскорень/віброшвидкостей або їхні логарифмічні еквіваленти в октавах або 1/3 октавних смугах частот, є показниками навантаження при спектральному аналізі коливань і вібрації, який домінує в дослідженнях, що стосуються параметричної оптимізації підвіски автомобіля. Частотні характеристики, розподіл частот/октав коливань згідно норм ISO наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1. Розподіл частотних параметрів смуг октав [9]

№ октави	Середньо-геометрична частота, Гц	Частотні смуги, Гц	
		Октава	1/3 октави
I	1,0	0,7–1,4	0,7–0,89
			0,89–1,12
			1,12–1,4
II	2,0	1,4–2,8	1,4–1,78
			1,78–2,24
			2,24–2,8
III	4,0	2,8–5,6	2,8–3,5
			3,5–4,4
			4,4–5,6
IV	8,0	5,6–11,2	5,6–7,1
			7,1–8,9
			8,9–11,2
V	16,0	11,2–22,4	11,2–14,1
			14,1–17,8
			17,8–22,4
VI	31,5	22,4–44,7	22,4–28,2
			28,2–35,5
			35,5–44,7
VII	69	44,7–89,7	44,7–56,2
			56,2–70,8
			70,8–89,7

Джерело: створено авторами

Крім того, у [9] містить загальноприйняті чисельні значення вагових коефіцієнтів для найбільш значущих у умовах плавності ходу низькочастотного діапазону.

У зв'язку з очевидною потребою великої кількості ЛВА різного призначення для фронту, на теренах України активно розробляються такі зразки як державними автомобільними підприємствами корпорації АТ «Українська оборонна промисловість» у серійних масштабах, так і приватними виробниками. Особливістю такої роботи є виготовлення ЛВА у відповідності до можливостей і технологічних спроможностей самого підприємства, а також їх удосконалення за вимогами до ведення сучасних бойових дій та «фідбеку» з військових частин, де такі зразки активно використовуються. Для оцінки ефективності підвіски використано ЛВА «Мамай», розроблений для підрозділів сил оборони.

На першому етапі у програмному середовищі MATLAB Simulink розроблено імітаційну модель роботи підвіски ЛВА за умов руху бездоріжжям. Вказана

Simulink-модель дала можливість визначати максимальну швидкість руху зразка з одночасною оцінкою амплітуди пружно-демпфувальних характеристик та ходів підвіски, а також оцінювати віброколивні навантаження на водія й екіпаж ЛВА. При цьому необхідно внести параметри технічного вигляду військового автомобіля, зокрема основні вагові параметри ЛВА та його підвіски з розподілом за осями, параметри рельєфу ОП, штучних перешкод [10].

На другому етапі проведено експериментальне дослідження ЛВА «Мамай» для визначення та перевірки основних технічних характеристик, зокрема його максимально можливої швидкості руху бездоріжжям та оцінки плавності його ходу [11,12].

У подальшому проведено порівняльний аналіз результатів імітаційного моделювання з результатами проведених експериментальних досліджень. Адекватність розробленої імітаційної моделі динаміки руху ЛВА бездоріжжям підтверджена достатнім збігом теоретичних і експериментальних результатів (Рис. 1).

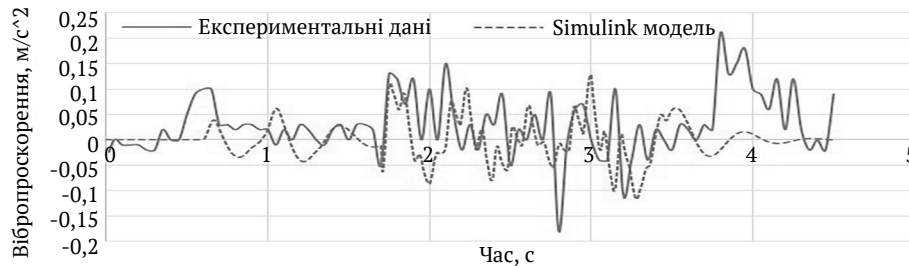


Рисунок 1. Співставлення результатів комп'ютерного моделювання легкого військового автомобіля ЛВА «Мамай» з експериментальними даними

Джерело: розроблено авторами за даними [12]

Графіки показують, що частота віброприскорень і відповідні числові значення знаходяться в одному діапазоні, що свідчить про те, що результати математичного моделювання роботи підвіски ЛВА «Мамай» є достатніми. Це, у свою чергу, дозволяє проводити порівняльний аналіз різних конструктивних варіантів виконання підвіски ще на етапі конструювання, щоб вибрати варіант, який буде задовольняти певним умовам експлуатації. За результатами проведеного аналізу також можна стверджувати, що різниця в амплітудах вертикальних прискорень на робочому місці водія під час експерименту та комп'ютерного моделювання не перевищувала 12–15 %, характер коливань у часі є близьким. Поряд із тим необхідно взяти до уваги і задання абсолютно рівної поверхні до ділянки у комп'ютеризованій програмі (перші 0,5–1,0 с заїзду, див. Рис. 1) та реалій дорожнього покриття, зрештою як і похибок реалій профілю штучних перешкод руху з бетонної бруківки та закладених у модель теоретичних форм. Відчутна різниця амплітуд коливань на 4-й секунді запису (Рис. 1) обумовлена різким гальмуванням після проходження випробувальної ділянки під час експерименту та залишенням стабільної швидкості руху при моделюванні.

Для того, щоб повністю оцінити реальну збіжність результатів експериментальних випробувань і моделювання, необхідно продовжити обробку отриманих даних і знайти середньоквадратичні значення віброприскорень у відповідних частотних смугах. На основі відомих теоретичних і практичних принципів оцінки вібронавантажень можна стверджувати, що результати моделювання, представлені на графіку, надають достатньо інформації для порівняльної оцінки вібронавантаженості водія та екіпажу ЛВА, але вони не є достатньо ефективними для визначення безпосереднього рівня вібронавантажень. Для октавних і 1/3 октавних діапазонів частот віброколивань останні використовуються як узагальнені середньоквадратичні значення. Таким чином, існує необхідність додаткового опрацювання потоку вихідного сигналу, який подається на виході імітаційної моделі у вигляді часової функції амплітудних значень віброприскорень сидіння водія ЛВА «Мамай». Загалом, алгоритм опрацювання даних визначає рівень вихідного сигналу для кожного діапазону частот октавних смуг з середньгеометричними частотами 2, 4, 8, 16 і 31,5 Гц. Цей алгоритм використовує залежність прискорення від часу після перетворення Фур'є, щоб

отримати спектральну густину вихідного сигналу. Цей метод не відображає абсолютних середньоквадратичних значень віброприскорень.

Визначення середньоквадратичних значень віброприскорень в октавних смугах є наступним об'єктивно необхідним завданням, яке безпосередньо передусе безпосередньому порівнянню експериментальних даних з даними, отриманими шляхом імітаційного моделювання, з теоретичними основами, статистичними значеннями та регламентованими стандартами та нормами величин. Математичний процесор Matlab найкраще підходить для реалізації алгоритму цього опрацювання результатів моделювання. Аналіз отриманих часових залежностей, отриманих експериментально і отриманих шляхом імітаційного моделювання у середовищі Simulink проведено із використанням засобів Matlab 2019b. При цьому було використано

наступні команди: спершу за допомогою пари команд `fft` і `fftshift` отримано спектри отриманих сигналів віброприскорень. Оскільки вбудована функція `roctave` середовища Matlab не дозволяє провести аналіз для частот нижче 3 Гц, що неприйнятно для нашої мети, аналіз розподілу спектрів за октавами було здійснено за допомогою спеціально розробленої функції. Так, для кожної октави було вибрано ті частоти, які відповідають межах діапазону кожної з октав і для даних спектрів, які відповідають цим частотам, визначено середні геометричні значення. Для аналізу за діапазоном 1/3 октави межі кожного діапазону було відповідно звужено, а алгоритм опрацювання даних було використано той самий. Результати аналізу наведено графічно на Рисунку 2–3 разом із допустимою межею віброприскорень для часу роботи 1 та 8 годин відповідно до стандарту [9].

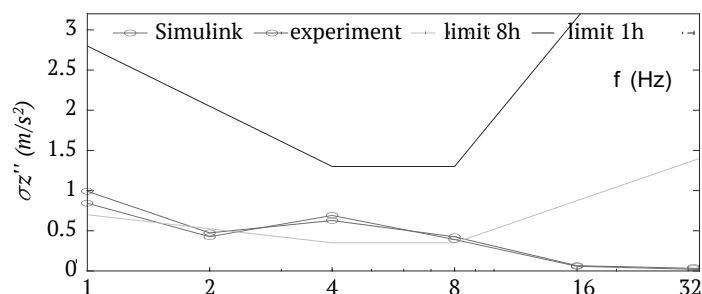


Рисунок 2. Результати спектральної оцінки віброколивних навантажень ЛВА «Мамай» в октавній смузі частот коливань

Джерело: розроблено авторами

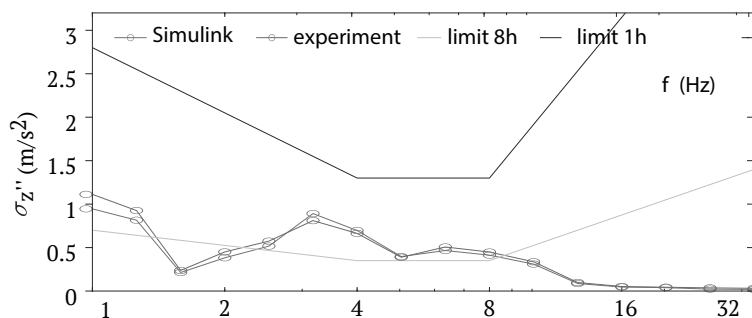


Рисунок 3. Результати спектральної оцінки віброколивних навантажень ЛВА «Мамай» в 1/3 октавній смузі частот коливань

Джерело: розроблено авторами

За аналізом середньоквадратичних прискорень фактично отримано два збільшені рівні вібраційних навантажень у характерних діапазонах. Перший із них знаходиться у діапазоні 1–1,6 Гц, а другий у діапазоні 3–8 Гц. Це свідчить про те, що підвіска досліджуваного автомобіля в цілому задовольняє вимогам наведених стандартів. Поряд із тим необхідно констатувати, що вказані збільшені рівні зменшують час роботи водія без втомлюваності протягом 8 годин. Проте це відповідає вимогам щодо системи підресорення, яка повинна

забезпечувати мінімальну втомлюваність водія при русі у важких дорожніх умовах (грунтова дорога, буліжне покриття) протягом не менше 3–4-х годин [3].

Висновки

Проведене дослідження підвіски легкого військового автомобіля дозволяє констатувати, що створена модель у достатній мірі задовольняє питанням щодо визначення та оцінки параметрів підвіски легкового військового автомобіля, що підтверджується відповідною

збіжністю результатів моделювання та експериментальних даних на прикладі ЛВА «Мамай».

Вхідні дані були представлені як часова функція віброприскорень місця водія після моделювання та експерименту. Хоча отримані дані дають достатньо інформації для порівняльної оцінки вібронавантаженості водія, вони не достатньо для визначення безпосереднього рівня вібронавантажень. У результаті безпосередні рівні вібронавантажень зазвичай визначаються

узагальненими середньоквадратичними значеннями для октавних і третинно-октавних діапазонів частот віброколивань і співставляються зі стандартом [9].

За результатами проведення оброблення даних імітаційного моделювання та експериментальних даних отримані амплітудно-частотні характеристики, які дозволяють стверджувати про правильність вибору параметрів підвіски прототипу ЛВА «Мамай» вже на етапі його проектування.

Список використаної літератури

- [1] Hrubel, M.G., Kraynyk, L.V., & Andrienko, A.M. (2020). Fundamentals of the formation of a national regulatory framework for the cross-country ability of wheeled military automotive equipment. *Systems of Arms and Military Equipment*, 2(62), 10-21. doi: 10.30748/soivt.2020.62.01.
- [2] Manzyak, M.O., Kraynyk, L.V., & Hrubel, M.G. (2021). Trends in the development of suspension structures of military vehicles. *Systems of Arms and Military Equipment*, 1(65), 27-35. doi: 10.30748/soivt.2021.65.04.
- [3] Duschenko, V.V., & Naniivskyi, R.A. (2024). Development of suspension systems and their potential in improving the tactical and technical characteristics of combat armored vehicles. *Military-Technical Collection*, 31, 8-20. doi: 10.33577/2312-4458.31.2024.8-20.
- [4] Kosharny, M.F. (1992). *Fundamentals of mechanics and power engineering of a vehicle*. Kyiv: Higher School.
- [5] Bilichenko, V.V., Dobrovolsky, O.L., Smirnov, E.V., & Ognev, V.O. (2017). *Cars. Work processes and calculation principles. Design of a car suspension*. Vinnytsia: VNTU.
- [6] DSTU 2947-94. (1996). *Motor vehicles. Car suspensions. Terms and definitions*. Retrieved from https://nationalstandards_ukr.academic.ru/19651/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_2947-94.
- [7] Raimpel, V., Stoll, H., & Betzler, J. (1983). *The automotive chassis: Engineering principles*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [8] Buryan, M.V. (2020). *Smoothness of bus movement in relation to the characteristics of the suspension and seats: dissertation*. (Doctoral dissertation, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine).
- [9] DSTU - ISO 2631-1:2004. (2004). *Mechanical vibration and shock. Assessment of the impact of general vibration on humans*. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=53306.
- [10] Manziak, M., Khoma, B., Hrubel, M., Krainyk, L., & Salo, Y. (2024). Evaluation of the off-road suspension efficiency for all-wheel-drive vehicles. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, 27, 96-100. doi: 10.31734/agroengineering2023.27.096.
- [11] Manzyak, M.O. et al. (2024). *Experimental study of the evaluation of the effectiveness of automobile suspensions in off-road conditions and the mobility of vehicles moving off-road under the condition of achieving maximum permissible vibration loads on the crew*. Lviv: NASV.
- [12] Manzyak, M.O., & Kraynyk, T.L. (2024). Assessment of the adequacy of modeling the operation of suspensions of samples of wheeled military automotive equipment in comparison with experimental test data. *Collection of Scientific Papers of the DNDI VS AVT*, 4(22), 90-98. doi: 10.37701/dndivsovt.22.2024.11.

Mykhailo Hrubel

Doctor of Technical Sciences, Professor
Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy
79026, 32 Heroiv Maidanu Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4820-6935>

Mykhailo Manziak

Adjunct
Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy
79026, 32 Heroiv Maidanu Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5634-9231>

Oleksiy Kuznyetsov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy
79026, 32 Heroiv Maidanu Str., Lviv, Ukraine
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0516-5109>

Taras Kraynyk

Postgraduate Student
Lviv National Environmental University,
80831, 1 Volodymyr Velykyi Str., Dubliany, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-7530-6194>

Heorhii Khudaverdian

Postgraduate Student
Lviv National Environmental University,
80831, 1 Volodymyr Velykyi Str., Dubliany, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5257-4581>

Spectral evaluation of vibration loadslight military vehicle

Abstract. An analysis of the conditions for the use of light military vehicles during hostilities was carried out. Taking into account the intensity of use of military vehicles at the front, in particular the increase in operating speeds and the operation of samples at the limit of their technical capabilities in off-road conditions and with the aim of reducing vibration loads on the driver, crew, structural elements of the military vehicle and cargo, it is proposed as an option to get out of the situation on modern samples use long-travel suspensions. Based on the analysis of previously conducted studies, the frequency limits of the sensitivity of the human body in the vertical and horizontal directions have been established. A simulation model of suspension operation in off-road conditions was developed to evaluate the smoothness of movement of the “Mamai” light military vehicle and the spectral evaluation of vibration loads on the driver and crew. In the future, the vibration load on the driver was determined, and after comparing them with the results of the conducted experimental study, the comparability of the results and the adequacy of the simulation model were assessed. The difference in the amplitudes of vertical accelerations at the driver’s workplace during the experiment and computer simulation did not exceed 12-15%. To compare experimental data and data obtained through simulation modelling with regulated standards, sanitary norms and values. with the means of the Matlab mathematical processor, the rms values of the vibration accelerations in the octave bands were directly determined, for which a corresponding program was developed, since the built-in poctave function of the Matlab environment does not allow the analysis for frequencies below 3 Hz

Keywords: vibro-oscillating loads; light military vehicle; sprung mass; running smoothness; rms vibration acceleration; suspension system; spectral analysis

Олександр Губарев

Доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

03056, пр-т Берестейський, 37, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-0924-4103>

Єлизавета Синицина*

Аспірант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

03056, пр-т Берестейський, 37, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0009-0005-7361-0031>

Мехатронна система керування вологістю мікроклімату теплиці

Анотація. Проаналізовано вплив загальних параметрів температури і вологості на мікроклімат малих теплиць. Визначено основні властивості, що забезпечують найбільш сприятливі умови для росту і розвитку рослин, серед яких значну роль відіграє вологість повітря. Для забезпечення стабільного режиму повітря всередині тепличного приміщення необхідно підтримувати баланс вологості. Метою роботи є створення мехатронної системи керування вологістю повітря в тепличному господарстві. Особливістю підходу є зміщений алгоритм керування розпилювачами на основі щоденного прогнозу погоди. Обґрунтовано та розроблено комп'ютерну модель тепличного комплексу, яка враховує додаткову компенсацію водяної пари, конвекцію та вимушений рух повітряних мас у теплиці. За результатами досліджень розроблено математичну модель зміни витрати водяної пари в теплиці відповідно до зміни вологості зовнішнього повітря протягом доби в програмному середовищі SOLIDWORKS. Проведено моделювання зміни параметрів повітря в теплиці протягом однієї доби для прогнозу погоди в Херсонській області (17 травня 2023 року). В основу моделювання було покладено проектні параметри теплиці, початкову температуру в теплиці 20 °C, температуру навколишнього середовища в діапазоні від 13,9 °C до 26,2 °C згідно з прогнозом погоди та початкову вологість повітря 70 %. Встановлено, що отримані характеристики дозволяють оцінити загальний коефіцієнт насичення повітря водяною парою, що послужило основою для визначення необхідної продуктивності компенсуючих інжекторів і розробки циклограми керування системою стабілізації вологості повітря в теплиці. Для забезпечення стабільної вологості в теплиці розроблена мехатронна гідравлічна система туманоутворення. За результатами модельного експерименту визначено координати розташування інжекторів та розроблено режим їх роботи, а саме алгоритм керування. Результати дослідження та розроблений алгоритм керування придатні для використання в мехатронних системах керування мікрокліматом з урахуванням добових змін параметрів навколишнього середовища. В алгоритмі передбачено вмикання системи туманоутворення, оновлення поточних значень змінних, опитування датчиків та оновлення комплексу команд керування. Логіка процесу керування базується на визначенні і відпрацюванні режимів в трьох діапазонах вологості: 70–65 %; 65–60 %; 60–50 %

Ключові слова: мехатронна система; гідравлічна система; система керування; мікроклімат; вологість; розпилення; теплиця

Suggested Citation:

Hubarev, O., & Synytsyna, Ye. (2024). Mechatronic system for controlling the humidity of the greenhouse microclimate. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 38-47. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.38.

*Corresponding author



Вступ

Зміна характеру клімату навколишнього середовища викликає суттєву зміну параметрів мікроклімату теплиці впродовж всього експлуатаційного часу [9, 12]. Вологість повітря можна регулювати за допомогою температури повітря та системи туманоутворення [2, 5]. Зміна кількості водяної пари в 1 м^3 об'єму відбувається за рахунок масообміну повітря з навколишнім середовищем тепличного об'єкту. У теплий період року стабільність рівня вологості повітря підтримують за допомогою провітрювання та системи туманоутворення, а в холодний період року підтримка рівня вологості повітря відбувається за рахунок системи рециркуляції [10, 11].

Система керування мікрокліматом тепличного об'єкта має відслідковувати зміни параметрів мікроклімату зовнішнього середовища та, відповідно до цих змін, реагувати та змінювати налаштовані параметри внутрішнього середовища теплиці, підтримуючи сталу температуру та вологість повітря в замкненому об'ємі тепличного об'єкту [1]. Мехатронна система керування мікрокліматом теплиці має враховувати чотири основні чинники, які забезпечують термодинамічний обмін: конструктив теплиці, повітря в замкненому об'ємі теплиці, ґрунт та рослини. Кожен чинник відповідає за наступне: конструкція тепличного об'єкту втримує тепло; повітря всередині теплиці регулює температуру та вологість (тепло-масообмін); ґрунт поглинає вологу та теплове випромінювання; рослини додають фотосинтез та викривлення потоків повітря [2]. Для забезпечення сталої роботи системи необхідний постійний контроль параметрів фізичного середовища теплиці, оскільки надмірна вологість повітря може спричинити захворювання рослин, а недостатня вологість може викликати гідралічний стрес, що у будь-якому випадку знижує рівень продуктивності тепличного об'єкту [2, 4].

У даній роботі запропонована мехатронна система керування вологістю на основі конструкції тепличного об'єкту та термодинамічних процесів всередині замкнутого об'єму, з врахуванням параметрів оточуючого середовища і початкової вологості повітря в середині теплиці.

При аналізі літературних даних було виявлено, що більшість досліджень зосереджені на застосуванні технології, спрямованих на створення мікроклімату в одній теплиці з певним тестовим середовищем [3]. В іншому прикладі використовують різну структуру та управління тепличного об'єкту [4]. К. Кітас та Т. Барцанас [5] виявили, що дані CFD моделювання вказують на різні розподіли швидкості повітря та вологості в тепличному об'єкті. В дослідженні системи сонячного опалення та кліматизації теплиць [6] автори використовували лише дані про температуру та відносну вологість без врахування ситуації з відкриванням вікон провітрювання. У роботі С.-К. Ванегас-Аяла, Х. Баронь-Веландія та Д.-Д. Леаль-Лара [11] розглянуто прогнозування вологості в тепличному об'єкті,

визначено базову структуру середовища (Рис. 1а). Дана схема враховує зовнішні погодні параметри та умови і механізми управління, які впливають на внутрішній клімат тепличного об'єкту. У роботі зазначено, що в моделі, яка розроблена для контролю та прогнозування вологості, використовуються система нечіткого виведення (Рис. 1б). Ця модель базується на зовнішніх погодних умовах, таких як зовнішня температура, зовнішня вологість, глобальна радіація та швидкість вітру, та механізмах керування (вентиляція, опалення, затінення, штучне освітлення, CO_2 та туманоутворення), їх взаємодія визначається нечіткими правилами, а на виході нечіткої системи отримується значення внутрішньої вологості.

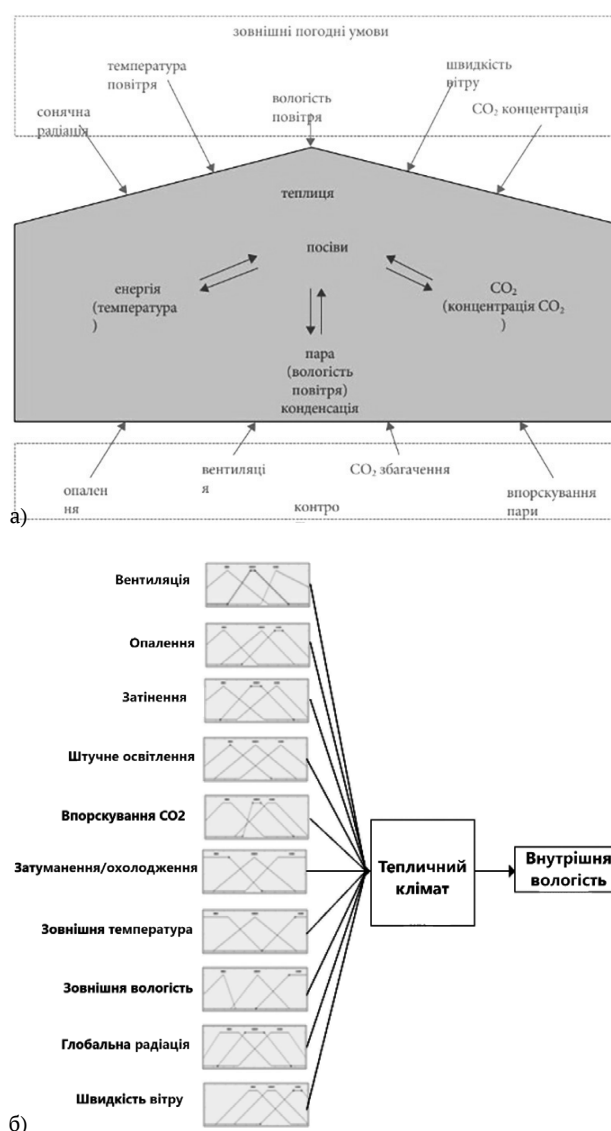


Рисунок 1. Прогнозування та контроль вологості в теплиці

Примітки: а – схема моделі парникового клімату; б – блок-схема системи нечіткого виведення

Джерело: [11]

Проаналізовані дослідження вказують на нестабільність термодинамічних процесів та неможливість відслідковування змін втрати водяної пари у тепличному об'єкті. В більшості наведених прикладів не враховано забезпечення балансу вологості повітря.

За результатами аналізу відомих технічних рішень [3–6] та результатів досліджень встановлено, що для забезпечення сталого режиму вологості повітря в середині тепличного об'єкту необхідно передбачити мехатронну систему керування вологістю. Таким чином в системі забезпечуватиметься вологість, що є невід'ємною частиною системи мікроклімату. Для забезпечення рівномірного розподілу вологості та необхідної її кількості потрібно зберігати баланс вологості в середині теплиці. Для реалізації вказаного підходу необхідно розробити систему туманоутворення.

Метою цієї роботи є створення мехатронної системи керування вологістю повітря тепличного об'єкту. Для цього необхідно провести аналіз добової вологості повітря навколишнього середовища та її вплив на тепличний об'єкт з заданими сталими параметрами мікроклімату. Наступним етапом буде розробка моделі теплиці та моделювання зміни вологості повітря впродовж однієї доби [7]. За отриманими результатами необхідно визначити кількість водяної пари для підтримки балансу вологості повітря в середині теплиці, розробити гідравлічну схему системи туманоутворення, підібрати форсунки та розробити алгоритм керування форсунками.

Матеріали та методи

Система керування форсунками системи туманоутворення, приводами вікон провітрювання та зашторювання, приводами заслінок каналів, вентиляторів та нагрівачами повинна підтримувати сталу температуру та вологість повітря в середині теплиці незалежно від впливу зовнішніх факторів. Для створення мехатронної системи керування вологістю необхідно врахувати залежності змін витрати водяної пари для підтримки балансу вологості теплиці у часі під впливом прогнозованих змін параметрів оточуючого середовища. Це дозволить визначити кількість водяної пари, яка має бути додана або вилучена, для компенсації у разі відхилення рівня вологості повітря в теплиці. Отримання вказаних залежностей може бути здійснено за допомогою моделювання функціонування теплиці на протязі доби. На першому етапі, для створення моделі, було розглянуто процеси, що відбуваються в об'єкті керування, їх математичні описи і межі застосування, параметри та коефіцієнти, необхідні для розрахунків.

Зміна вологості повітря в теплиці в основному спричинена вентиляцією та транспірацією рослин. Величина зміни вологості повітря повинна відповідати наступному рівнянню:

$$\Delta H = \Delta H_{air} - \Delta H_{plant}, \quad (1)$$

де ΔH – зміна пари всередині теплиці, ΔH_{air} – зміна

пари, спричинена вентиляцією, а ΔH_{plant} – зміна вологості за рахунок транспірації рослин, випаровування ґрунтової води та інших джерел вологості.

Розрахунок відносної вологості повітря за допомогою мікро-метеорологічної моделі забезпечено рівнянням (2) [8]:

$$RH = \frac{e_a}{e_w}, \quad (2)$$

де RH – відносна вологість, e_a – тиск пари, e_w – тиск насиченої пари при тій самій температурі.

Визначення абсолютної вологості наведено у рівнянні (3), при цьому значення e_a може бути представлено у вигляді рівняння (4):

$$\rho_v = \frac{e_a}{R_v T}, \quad (3)$$

$$e_a = \rho_v \cdot R_v \cdot T, \quad (4)$$

де ρ_v – маса пари на кубічний метр повітря (кг/м³), R_v – питома газова стала для водяної пари, що дорівнює 461,5, T – температура (°C).

Таким чином, узагальнений процес переносу водяної пари повітрям, може бути описаний за допомогою рівнянь (2)-(4), і матиме вигляд:

$$H = \frac{RH e_w}{R_v T - Q}, \quad (5)$$

де H – маса водяної пари, що переноситься повітрям, Q – об'єм повітря в теплиці.

Отже, у процесі вентиляції теплиці зміна вмісту водяної пари, спричинена масообміном внутрішнього та зовнішнього повітря, залежить від температури, відносної вологості та вентиляційного об'єму внутрішнього та зовнішнього повітря:

$$\Delta H_{air} = Q_{in} \times (AH_{outside} - AH_{inside}) = ((e_w Q_{in} RH_{outside}) / R_v T_{outside} - (RH_{inside} / R_v T_{inside})), \quad (6)$$

де $AH_{outside}$ – абсолютна вологість припливного повітря, AH_{inside} – абсолютна вологість припливного повітря в теплиці, $RH_{outside}$ – відносна вологість припливного повітря, RH_{inside} – відносна вологість повітря в теплиці, $T_{outside}$ – температура зовнішнього повітря, а T_{inside} – температура повітря в теплиці.

Для забезпечення балансу вологості в тепличному об'єкті малого об'єму необхідно врахувати вологість повітря, яка знаходиться всередині теплиці та вологість повітря, яке подається в тепличний об'єкт. Для цього запропоновано рівняння балансу водяної пари в середині замкненого об'єму:

$$Q_\phi \cdot T1 \cdot \Delta t1 = 60 \cdot v \cdot S \cdot T2 \cdot \varphi \cdot \Delta t2 = \varphi T, \quad (7)$$

де Q_ϕ – продуктивність форсунок, л/год; $T1$ – температура водяної пари, °C; $\Delta t1$ – час роботи форсунок, год; 60 – кратність повітрообміну для тепличного об'єкту; v – швидкість потоку припливного повітря; S – площа поперечного перерізу припливного повітропроводу, м²; $T2$ – температура припливного повітря, °C; φ –

вологість припливного повітря, %; Δt_2 – час роботи вентилятора, год; φ – задане початкове стале значення вологості в середині тепличного об'єкту (для даного дослідження φ прийнято 70 %).

Результати

Дослідження функціонування теплиці

Для визначення функцій тепло-масообміну з оточуючим середовищем в процесі функціонування теплиці було побудовано математичну модель в середовищі SOLIDWORKS [9]. Краєві умови. Прийнято, що модельне дослідження охоплює одну добу. Середовище тепличного об'єкту має початкову температуру 20°C, вологість – 70 %. З урахуванням зміни вологості повітря навколишнього середовища побудовано модель зміни витрати водяної пари теплиці впродовж доби. Для модельного дослідження вирішено прийняти вхідною змінною вологість повітря зовнішнього середовища. Процес дослідження мікроклімату тепличного об'єкту відбувається в безперервному часі. В моделі тепличного об'єкту забезпечується регулювання різниці водяної пари за допомогою форсунок (Рис. 2).

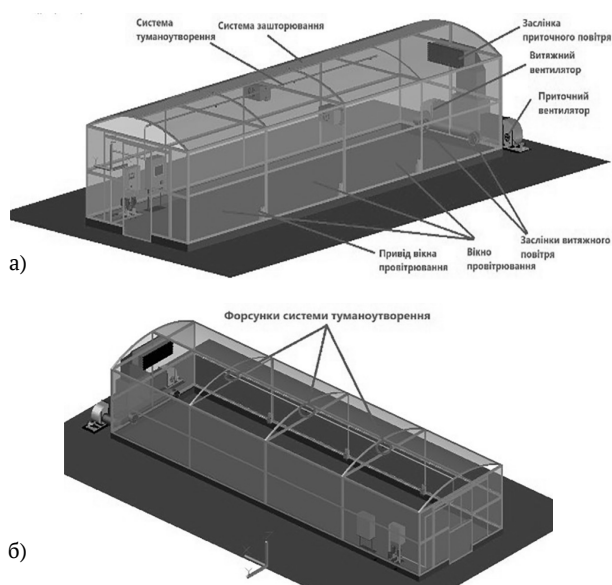


Рисунок 2. Зовнішній вигляд моделі тепличного об'єкта з мережею зволоження (а, б)

Джерело: створено авторами на основі [9, 12]

Для проведення тестового випробування моделі було сформовано масив даних відповідно до задачі та основних параметрів об'єкта дослідження. Введено наступні початкові дані [9]:

- 1 – початкове значення температури повітря всередині замкнутого об'єму теплиці 20°C;
- 2 – початкове значення вологості повітря всередині замкнутого об'єму теплиці 70 %;
- 3 – термін очікування стабілізації теплообмінних процесів від 20 хвилин до 3 годин.

В середовищі SOLIDWORKS генерується модель зміни параметрів мікроклімату (зміна температури та відносної вологості повітря, яке подається в тепличний об'єкт). Оскільки мехатронна система керування мікроклімату має забезпечувати постійне значення вологості повітря у всьому об'ємі теплиці, необхідно спрогнозувати очікувані зміни вологості повітря при зміні температури зовнішнього середовища. Для цього встановлено систему туманоутворення, яка буде підтримувати вологість повітря на необхідному рівні (Рис. 2). Тобто, на функції дослідження припадає задача визначення необхідної тривалості, кількості та продуктивності форсунок. Для цього, шляхом моделювання, визначено зміна вологості повітря в теплиці впродовж доби. Наступним кроком було проведено інтегрування площі продуктивності форсунок до середнього значення необхідної кількості водяної пари в замкнутому об'ємі теплиці. Це дозволило розрахувати втрати водяної пари впродовж доби. Оскільки об'єм теплиці становить 1 400 м³, а початкова температура в середині теплиці 20 °C і вологість 70 %, то за годину необхідна кількість водяної пари становитиме 18,16 л/год. Дана кількість водяної пари обумовлена підтримкою балансу вологості в теплиці. Водяна пара може надходити до тепличного об'єкту шляхом надходження повітряних мас через заслінку приточного повітря (Рис. 2а), або через розпилення форсунок (Рис. 2б). Керування приточним повітрям відбувається разом з керуванням температурою і має бути враховано в роботі форсунок [9, 12]. Надання вологи через форсунки передбачає необхідну витрату вологи та її розподіл по теплиці. В цьому випадку, окрім загальної витрати вологи, постає задача визначення кількості форсунок для розпилення та визначення їх розташування.

Визначення кількості форсунок базується на співвідношенні площі зволоження теплиці і діаметрі розпилення форсунки [10]:

$$D = 2Htg\frac{\alpha}{2}, \quad (8)$$

де H – висота розпилення; α – кут розпилення.

Відстань між форсунками, що забезпечує достатньо рівномірне зволоження, визначається з діаметра розпилення [5]:

$$E = \frac{\sqrt{2}}{2} D. \quad (9)$$

Провівши розрахунки для даного типу теплиці з урахуванням кута розпилення (наприклад, 68° з характеристик форсунки) визначено, що діаметр розпилення однієї форсунки може складати 2,5 м [13]. Тобто для зволоження теплиці з площею зволоження 7х4 м для повного покриття поверхні достатньо 6 форсунок. Щоб забезпечити рівномірне розподілення водяної пари в замкнутому об'ємі запропоновано використовувати меншу кількість форсунок разом з примусовою рециркуляцією повітря. Для розглянутої теплиці достатньо

3 форсунки з продуктивністю 2,0 л/год., які працюватимуть в залежності від необхідної кількості компенсуючої водяної пари (Рис. 2б). Рівномірність розподілення водяної пари, в такому випадку, забезпечується циркуляцією повітря в середині теплиці.

Для забезпечення стабільної вологості в теплиці запропонована мехатронна гідравлічна система туманоутворення (Рис. 3а). Необхідну продуктивність і тиск води в системі зволоження забезпечує насосний агрегат з акумулятором, в якому передбачено фільтр для очищення води і клапани тиску, для запобігання перенавантаження і налаштування робочого тиску.

Для наповнення мережі зволоження водою або зливу води, за необхідності, в системі застосовано клапан Р1. Для керування вмиканням і вимиканням форсунок встановлені клапани Р2, Р3 і Р4, які оздоблені зворотними клапанами для запобігання утворення повітряних пробок. Враховуючі різні відстані від насосного агрегату до форсунок в системі передбачено один або декілька балансних дроселів, за допомогою яких буде вирівняно тиск на вході форсунок. Реле тиску РТ, контролює рівень робочого тиску рідини в системі та подає сигнал для вмикання насосного агрегату у випадку недостатнього рівня тиску.

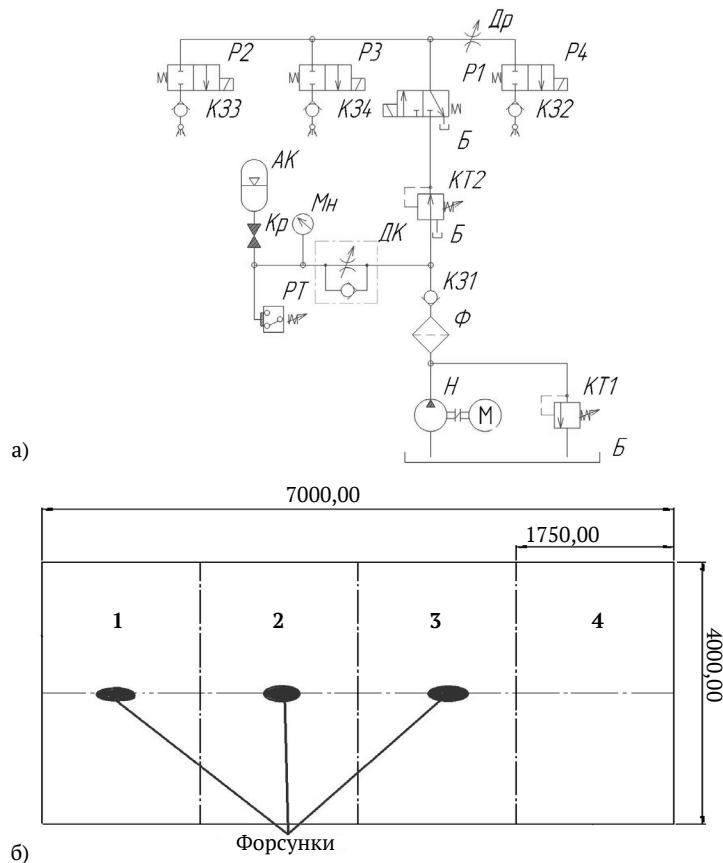


Рисунок 3. Мехатронна гідравлічна система туманоутворення

Примітки: а – гідравлічна схема системи туманоутворення; б – схема розміщення форсунок в тепличному об'єкті

Джерело: створено авторами

Згідно з розрахунком балансу вмісту вологи достатньо задіяти три форсунки з продуктивністю 2 л/год. та тиском 3 бар, наприклад UM50M. Для визначення координат розміщення форсунок розділимо теплицю на чотири зони. До першої зони, найближчої до перерізу нагнітання повітря, відноситься форсунка F1. Приблизно 1/2 продуктивності F1 залишається в зоні 1, а решта продуктивності F1 розподіляється по інших зонах теплиці (Зона 1 = 1/2 F1). У другій зоні працює форсунка F2. Зона 2 отримує вологу від перших двох форсунок: $0,5F2 + 0,25F1$. Решта продуктивності F2 розподіляється по зонах 3 і 4. У третій зоні працює форсунка F3. Зона 3

отримує 0,5 від F3, 0,25 від F2 і 0,125 від F1. Решта продуктивності F3 розподіляється по залишковому об'єму теплиці. До четвертої зони надходить 0,5 від F3, 0,25 від F2 і залишок від F1. За гіпотетичною схемою розраховано таке розміщення форсунок в тепличному об'єкті, яке забезпечує рівномірне постачання вологи на одиницю довжини теплиці (Рис. 3б).

Мета наступного етапу модельного дослідження полягає у визначенні кількості водяної пари, яку втрачає теплиця під час охолодження. Саме ця кількість має бути забезпечена системою туманоутворення і є вихідним показником для розрахунку термінів

вмикання форсунок і підтримання сталої вологості в середині теплиці. Дослідження виконані в SOLIDWORKS Simulation [12]. Задачею комп'ютерного моделювання є визначення параметрів роботи форсунок задля компенсації зовнішнього впливу на основі врахування зміни теплової потужності теплиці при її охолодженні.

Алгоритм керування підсистемою зволоження, в залежності від змін температури внутрішнього середовища теплиці і змін вологості, і температури доданого повітря, має компенсувати додану або від'ємну кількість водяної пари. Значення компенсуючої витрати водяної пари та час її додавання, для забезпечення необхідного рівня вологості, визначають режими роботи форсунок. Для визначення цих параметрів виконано моделювання зміни поля температури та вологості повітря в об'ємі теплиці на протязі доби і отримані залежності додаткової витрати водяної пари в часі.

Результати тестового експерименту

Для експерименту встановлено наступні початкові дані: повітрообмін тепличного об'єкту – 1 400 м³/год.; початкове значення температури повітря в середині теплиці 20 °С; початкове значення вологості повітря в середині теплиці 70 %; температура потоку повітря, що обтікає теплицю, становить від 13,9 °С до 26,2 °С

відповідно до прогнозу [7]. Вказані початкові значення температури і вологості дорівнюють стабілізованим значенням цих параметрів.

За результатами експерименту отримано епюри розподілу водяної пари в об'ємі теплиці під впливом зміни температури припливного повітря впродовж доби від +13,9 °С до +26,2 °С. Розрахована початкова щільність водяної пари в об'єкті дослідження становить 12,11 г/м³, початкова температура в середині теплиці +20 °С. Припущено, що у тепличному об'єкті попереднім зволоженням встановлено 70 % вологості повітря, після чого систему туманоутворення було вимкнено. Далі була змодельована зміна розподілу водяної пари теплиці під діє переносу повітряних мас в середині об'єму теплиці із різними значеннями температури припливного повітря. Кожні три години відбувалось сканування епюр розподілення вологи і проводився аналіз характерних змін (Рис. 4).

Початковий стан розподілу водяної пари о 00.00: вологість 68 % при температурі вхідного повітря 15,6 °С засвідчує майже однакову щільність водяної пари в об'ємі теплиці (Рис. 4а). Спостерігається накопичення водяної пари біля вікна провітрювання (зона 1), що свідчить про утворення точки роси через зниження температури на стінках теплиці (Рис. 4а).

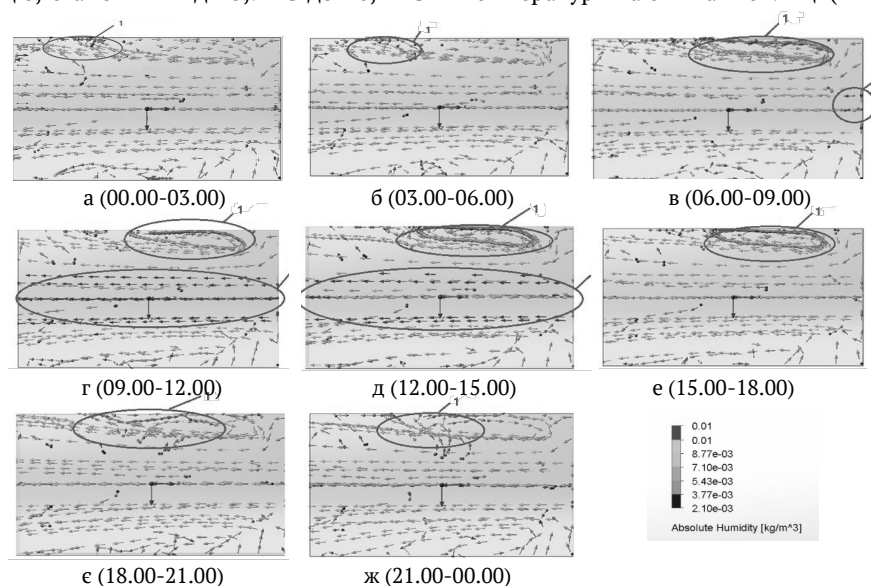


Рисунок 4. Епюра змін розподілу вологості повітря в перерізі теплиці впродовж доби

Примітки: а – 68 % при температурі вхідного повітря 15,6 °С; б – 72 % при температурі вхідного повітря 15,7 °С; в – 82 % при температурі вхідного повітря 13,9 °С; г – 62 % при температурі вхідного повітря 20,7 °С; д – 42 % при температурі вхідного повітря 25,4 °С; е – 41 % при температурі вхідного повітря 26,2 °С; є – 45 % при температурі вхідного повітря 23,9 °С; ж – 67 % при температурі вхідного повітря 16,1 °С; з – індикація кількості водяної пари в 1 м³

Джерело: створено авторами

Стан розподілу водяної пари о 03.00: вологість повітря 72 % при температурі вхідного повітря 15,7 °С вказує на незначне збільшення кількості вологи на вході в теплицю та накопичення водяної пари біля вікна провітрювання (Рис. 4б, зона 1). Площа зони накопичення водяної пари майже не змінилась за 3 години.

Стан розподілу водяної пари о 06.00: в середньому маємо 82 % вологості при температурі вхідного повітря 13,9 °С. Епюра вказує на суттєве збільшення кількості вологи на вході в теплицю, що засвідчує виникнення зони 2. Також продовжується накопичення водяної пари біля вікна провітрювання і зростання площі

зони 1 майже в 3 рази (Рис. 4в). Таким чином, якщо за перші 3 години відбулося підвищення вологості на 4 %, то додавання ще 3 годин збільшило вологість на 10 %. Можна припустити, що зміна вологості у часі має накопичувальний зміст і відповідна залежність матиме суттєво нелінійний характер. Хоча у порівнянні з двома першими інтервалами відбулось зниження температури вхідного повітря майже на 2 градуси, що також додає збільшення вологості.

Стан розподілу водяної пари о 09.00: усереднена вологість 62 % при суттєвому підвищенні температури вхідного повітря 20,7 °С. Епюра розподілу зберігає максимальну концентрацію водяної пари у верхній частині теплиці при частковому розширенні зони 1 (приблизно на 20 %). При цьому центральна зона (зона 2) збільшилася в декілька разів і досягла протилежної стінки теплиці (Рис. 4г).

Стан розподілу водяної пари о 12.00: в середньому маємо 42 % вологості при підвищенні температури вхідного повітря до 25,4 °С. Розподіл вказує на суттєве (більше за 20 %) зниження концентрації водяної пари у верхній частині тепличного об'єкту та біля вікна провітрювання у порівнянні з попереднім дослідженням (Рис. 4д). Можна припустити, що різке зниження показника викликано як температурним фактором, так і пониженням доданої вологості вхідним потоком зовнішнього повітря. Згідно з прогнозом погоди, вологість зовнішнього повітря 42 % при підвищенні, по відношенню до теплиці, температурі.

Стан розподілу водяної пари о 15.00: в середньому маємо 41 % вологості при майже незмінній температурі вхідного повітря до 26,2 °С. Оскільки середнє значення вологості майже незмінне, а площа зон підвищеної вологості 1 і 2 суттєво зменшена то можна припустити, що теплообмінні процеси в теплиці мали стабілізаційний характер, а час стабілізації є співрозмірним з інтервалом досліджень, тобто з 3 год. (Рис. 4е).

Стан розподілу водяної пари о 18.00: в середньому маємо підвищення вологості до 45 %, що можна вважати наслідком зниження температури доданого повітря майже на 2,5 град. Зона 2, як і в попередньому дослідженні, відсутня, а зона 1 вказує на дещо меншу концентрацію біля вікон провітрювання.

Стан розподілу водяної пари о 21.00: в середньому маємо подальше підвищення вологості до 67 %, що можна вважати наслідком зниження температури припливного потоку до 16,1 град. Зона 2, як і в попередньому дослідженні, відсутня, а зона 1 наближується до вигляду, який вона мала на початковому стані експерименту (Рис. 4а).

Отже, проаналізувавши отримані результати дослідження можна зробити висновок, що максимальна концентрація водяної пари досягається при поданні припливного повітря в тепличний об'єкт з температурою 20,7 °С та вологістю 62 %. За отриманими результатами дослідження було розраховано необхідну кількість водяної пари для компенсації балансу вологості теплиці.

Отримані значення середньої витрати дозволило розрахувати втрату водяної пари теплиці на основі чого побудовано залежність для компенсації вологості повітря впродовж доби (Рис. 5а). Також було зроблено висновок, інтервал змін режиму зволоження має не перевищувати 3 годин зранку і ввечері, і може мати більше значення вдень і вночі.

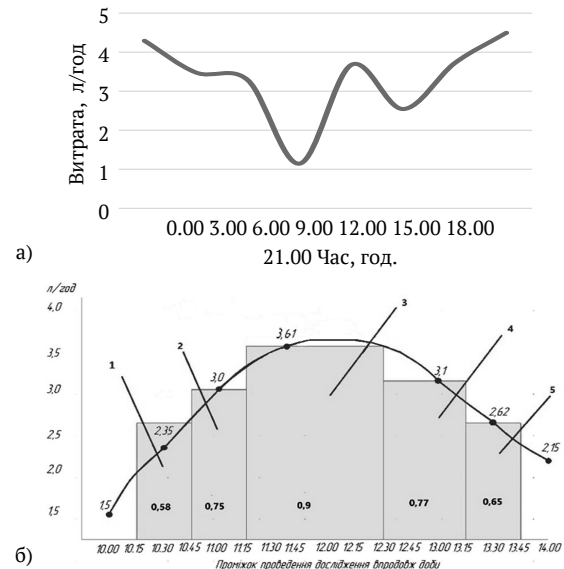


Рисунок 1. Втрати водяної пари теплиці

Примітки: а – залежність компенсації втраченої водяної пари в теплиці впродовж доби; б – прогнозована зміна втрати вологості повітря з циклограмою включення та вимкнення компенсуючих форсунок

Джерело: створено авторами

Для визначення режимів вмикання/вимикання форсунок було виконано розрахунок доданої витрати вологості на прикладі зміни параметрів повітря відповідно до добового прогнозу погоди [7]. За результатами розрахунку, для компенсації втрати вологості в тепличному об'ємі, запропоновано використати три форсунок продуктивністю 2 л/год. Місця встановлення форсунок обрано за характеристикою сталої осередненої витрати по площі зволоження (Рис. 3б).

Наступний крок – визначення термінів та черговості вмикання форсунок системи туманоутворення. Визначення терміну вмикання форсунок регламентується накопиченим дефіцитом водяної пари:

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} K_d(t)dt = Q_N * \Delta t, \quad (8)$$

де t_0 – поточний час, K_d – функція добових витрат вологості відповідно результатів моделювання (Рис. 5б), Q_N – продуктивність форсунок, Δt – тривалість поточного вмикання форсунок.

В залежності від поточного і прогнозованого значення втраченої вологості повітря обираємо вмикання одної, двох або трьох форсунок (Рис. 5б). З побудованої циклограми видно, що для забезпечення компенсації втрат водяної пари необхідно вмикати дві форсунок

продуктивністю 2 л/год. Розподіл терміну вмикання між трьома форсунками має забезпечувати рівномірне зволоження теплиці. Відповідно до залежності прогнозованих змін вологості визначено наступні режими роботи компенсуючих форсунок.

Перший режим: дві форсунки працюють з 10.15 по 10.45, тривалість режиму – 30 хвилин. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря – 2,35 л/год. Отже, при сумарній продуктивності двох форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок (інтегральна скважність) становитиме 0,58, а реальний час роботи форсунок – 17,4 хв. (термін вимкнених форсунок – 12,6 хв.).

Другий режим: дві форсунки працюють з 10.45 по 11.15, тривалість режиму становить 30 хв. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря складає 3,0 л/год. Отже, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок становитиме 0,75, а час роботи форсунок – 22,5 хв. (стан спокою – 7,5 хв.).

Третій режим: дві форсунки працюють з 11.15 по 12.30, тривалість режиму – 75 хв. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря – 3,61 л/год. Тобто, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок становитиме 0,9, а час роботи форсунок – 67,5 хв. (стан спокою – 7,5 хв.).

Четвертий режим: дві форсунки працюють з 12.30 по 13.15, тривалість режиму – 45 хв. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря – 3,1 л/год. Отже, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок становитиме 0,77, а час роботи форсунок – 34,65 хв. (стан спокою – 10,35 хв.).

П'ятий режим: дві форсунки працюють з 13.15 по 13.45, тривалість режиму – 30 хв. Середнє значення витрати водяної пари для компенсації вологості повітря складає 2,62 л/год. Отже, при продуктивності форсунок 4 л/год, коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок становитиме 0,65, а реальний час роботи форсунок – 19,65 хв. (стан спокою – 10,35 хв.).

На основі розрахованих режимів роботи системи туманоутворення та результатів моделювання добових змін зволоження побудовано загальний алгоритм керування форсунками (Рис. 6). В алгоритмі передбачено вмикання системи туманоутворення, оновлення поточних значень змінних, опитування датчиків та оновлення комплексу команд керування. В режимі налагоджування може здійснюватися корегування констант для випадку непередбачених змін параметрів зовнішнього середовища та параметрів мікроклімату, наприклад, покриття поверхні кригою чи вихід з ладу приводів вікон.

При вмиканні системи керування першим етапом відбувається оновлення інформації стосовно положень та стану виконавчих пристроїв та опитування датчиків. На другому етапі, за необхідності корегування роботи системи, програма повертається на початковий етап.

Відбувається оновлення входів та виходів контролера (можливий вибір автоматичного або ручного керування). Відбувається корегування значень констант (інтервал часу роботи форсунок, кількість форсунок). Після корегування констант здійснюється перерахунок початкових даних і система переходить до відпрацювання режимів роботи системи туманоутворення.

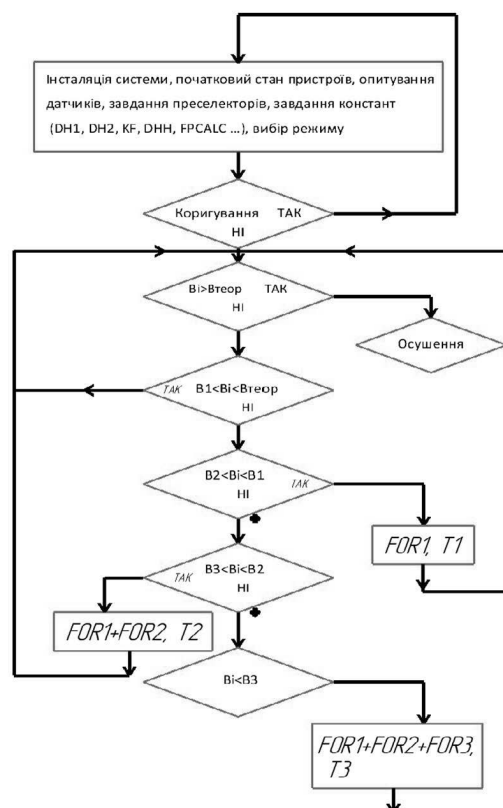


Рисунок 6. Загальний алгоритм програми керування форсунками

Джерело: створено авторами

Якщо поточне значення вологості (B_i) більше за необхідне ($B_{\text{теор}}$) система переходить в режим осушення. Якщо ж значення вологості повітря не перевищує 70 % програма керування перевіряє умови щодо вибору наступного режиму. Відбувається оновлення сигналів датчиків стану тепличного об'єкту, одночасно зберігаються попередні поточні дані, здійснюється порівняння даних для визначення напрямку і інтенсивності процесу. При попаданні вологості в інтервал від B_1 до B_2 алгоритм керування вмикає виконавчий орган (форсунку FOR1) на час $T1$. При вибігу часу $T1$ початкові дані замінюються на поточні, а поточні дані оновлюються. При потраплянні значень вологості в інтервал від $B2$ до $B3$, алгоритм вмикає виконавчі органи (форсунки FOR1 та FOR2) на час $T2$. При вибігу часу $T2$ початкові дані замінюються на поточні. При подальшому зниженні вологості нижче $B3$ алгоритм вмикає виконавчі органи (форсунки FOR1 та FOR2, та FOR3) на час $T3$. При вибігу часу $T3$ початкові

дані замінюються на поточні, а поточні дані оновлюються. Відповідно до поточної зміни вологості повітря в тепличному об'єкті здійснюється перерахунок співвідношення часу вмикання і вимикання форсунок та кількості задіяних форсунок. Алгоритм керування може бути реалізовано, наприклад, в середовищі Zelio Soft чи CoDeSys на мові FBD чи ST або LD, і спрямоване на використання логічного контролера, наприклад, SIEMENS S7-1200, чи Schneider TM241CE40U.

Вихідні умови: Форсунок: FOR1, FOR2, FOR3. Вхідні змінні: humidity: Поточний рівень вологості в 70 %. Логіка процесу керування базується на визначенні і відпрацюванні режимів в трьох діапазонах вологості: 70–65 %: працює одна форсунка; 65–60 %: працюють дві форсунок; 60–50 %: працюють три форсунок. Співвідношення термінів вмикання і вимикання форсунок розраховано відповідно до дефіциту вологості і кількості задіяних форсунок. Наприклад, у режимі роботи № 3 розрахунок здійснюється за середнім значенням дефіциту вологості, який складає 3,61 л/год. Використовуючи співвідношення роботи форсунок та стану спокою, форсунок мають працювати поки не буде досягнуте середнє значення вологості у відповідному режимі. Коефіцієнт наповненості часу роботи форсунок складатиме 0,9. Отже, якщо загальний час роботи режиму складає 75 хв. (T_0), відповідно, час роботи форсунок $T_1 = 0,9 \cdot T_0$ і складає 67,5 хв. Так як $T_1 + T_2 = T_0$, то час спокою форсунок $T_2 = T_0 - T_1$ і буде становити 7,5 хв.

Таймери: timerWork: працює протягом 67,5 хв., потім переходить до режиму паузи; timerPause: працює протягом 7,5 хв. паузи, потім повертає до режиму роботи.

Відпрацювання команд керування форсунками наведено в фрагменті коду, що доповнений у відповідності з наведеною блок-схемою [12].

Висновки

У даній роботі обґрунтовано, розроблено та перевірено на правдоподібність мехатронну систему керування вологістю повітря мікроклімату теплиці середнього об'єму з використанням компенсуючих форсунок. Виконані тестові випробування моделі підтвердили її придатність для прогнозування змін вологості повітря при процесах тепло-масообміну під дією зовнішніх чинників. Встановлено, що з урахуванням тепло-масо-обмінних процесів в геометричній 3-D моделі теплиці можуть бути змодельовані зміни витрати водяної пари теплиці впродовж доби. Отримані залежності зниження концентрації вологості в повітрі дозволили побудувати циклограму роботи компенсуючих форсунок впродовж доби.

Отримана в результаті модельного експерименту залежність дефіциту вологості впродовж доби допомогла розрахувати функцію необхідної продуктивності компенсуючих форсунок у часі. Результати розрахунків показали, що для теплиці вказаного об'єму достатньо використання двох компенсуючих форсунок продуктивністю 2 л/год. кожна з відповідним графіком їх підключення впродовж доби. Запропонований часовий розподіл роботи компенсуючих форсунок задовільнить вимоги до режиму вологості мікроклімату теплиці. Відповідно до отриманої циклограми роботи форсунок був розроблений алгоритм керування елементами мехатронної системи (середовище CoDeSys, мова програмування ST).

Список використаної літератури

- [1] Mironenko, G.P., & Spaska, L.I. (2011). *Thermal calculation of a protected ground structure*. Kharkiv: KNAU.
- [2] Ganzhur, M., Ganzhur, A., Kobylko, A., & Fathi, D. (2020). Automation of microclimate in greenhouses. *E3S Web of Conferences*, 210, article number 05004. doi: 10.1051/e3sconf/202021005004.
- [3] Willits, D.H. (2003). Cooling fan-ventilated greenhouses: A modelling study. *Biosystems Engineering*, 84(3), 315-329. doi: 10.1016/S1537-5110(02)00270-2.
- [4] Ebbs, L., & Rao, S.A. (2018). Differential response of plant species to greenhouse microclimate created by design technology and ambient conditions. *Canadian Journal of Plant Science*, 98(2), 300-308. doi: 10.1139/cjps-2016-0419.
- [5] Kittas, K., & Bartsanas, T. (2007). Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and Environment*, 42(10), 3774-3784. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.020.
- [6] Tadili, R., & Dahman, A.S. (1997). Effects of a solar heating and climatization system on agricultural greenhouse microclimate. *Renewable Energy*, 1(4), 569-576. doi: 10.1016/S0960-1481(96)00036-5.
- [7] Meteopost. (n.d.). Retrieved from <https://meteopost.com/weather/archive>.
- [8] Gaudriaan, J., & Van Laar, H.H. (1994). *Modeling potential crop growth processes*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- [9] Sinitsina, E.Yu. (2023). Model of the control object of the mechatronic microclimate system of a medium-sized greenhouse. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(3), 330-336. doi: 10.20535/2521-1943.2023.7.3.290773.
- [10] Calculation of the spray angle of nozzles and coating – Spray nozzle HONGFENG, Chinese factory, supplier, manufacturer. Spray nozzle HONGFENG, Chinese factory, supplier, manufacturer – Nozzles, spray guns, equipment for artificial fog. (n.d.). Retrieved from <https://hfspray.com/uk/10319.html>.
- [11] Vanegas-Ayala, S.-C., Baro'n-Velandia, J., & Leal-Lara, D.-D. (2022). A systematic review of greenhouse humidity prediction and control models using fuzzy inference systems. *Advances in Human-Computer Interaction*, 2022, article number 8483003. doi: 10.1155/2022/8483003.
- [12] Sinitsina, E.Yu., & Gubarev, O.P. (2024). Mechatronic system for controlling greenhouse microclimate temperature. *Mechanics and Advanced Technologies*, 8(2(101)), 164-171. doi: 10.20535/2521-1943.2024.8.2(101).298506.

- [13] Sinitsina, E.Yu., Gubarev, O.P., & Gulkov, K.S. (2024). Research of a simplified model of a nozzle for providing humidity in a greenhouse. In *Proceedings of the ICSR conferences* (pp. 196-202). Vinnytsia: International Center for Scientific Research. doi: [10.62731/mcnd-18.10.2024.004](https://doi.org/10.62731/mcnd-18.10.2024.004).

Hubarev Oleksandr

Doctor of Technical Sciences, Professor
The National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
03056, 37 Beresteyskyi Ave., Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0924-4103>

Yelyzaveta Synytsyna

Postgraduate Student
The National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
03056, 37 Beresteyskyi Ave., Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0005-7361-0031>

Mechatronic system for controlling the humidity of the greenhouse microclimate

Abstract. The influence of general parameters of temperature and humidity on the microclimate of small greenhouses is analysed. The main properties that provide the most favorable conditions for plant growth and development are identified, among which air humidity plays a significant role. To ensure a stable humidity regime inside the greenhouse, it is necessary to maintain a humidity balance. The aim of this work is to create a mechatronic system for controlling air humidity in a greenhouse. The peculiarity of the approach is a shifted algorithm for controlling sprayers based on a daily weather forecast. A computer model of the greenhouse complex was substantiated and developed, which takes into account additional compensation for water vapor, convection, and forced air movement in the greenhouse. Based on the results of the research, a mathematical model of changes in water vapor flow in the greenhouse in accordance with changes in ambient air humidity during the day was developed in the SOLIDWORKS software environment. A simulation of changes in air parameters in a greenhouse during one day was carried out to forecast the weather in the Kherson region (May 17, 2023). The modeling was based on the design parameters of the greenhouse, the initial temperature in the greenhouse of 20°C, the ambient temperature in the range from 13.9°C to 26.2°C according to the weather forecast, and the initial air humidity of 70%. It was found that the obtained characteristics allow us to estimate the overall coefficient of air saturation with water vapor, which served as the basis for determining the required performance of compensating injectors and developing a control cyclogram for the greenhouse air humidity stabilization system. To ensure stable humidity in the greenhouse, a mechatronic hydraulic fogging system was developed. Based on the results of the model experiment, the coordinates of the injectors were determined and their operation mode, namely the control algorithm, was developed. The results of the study and the developed control algorithm are suitable for use in mechatronic microclimate control systems, taking into account daily changes in environmental parameters. The algorithm provides for switching on the fogging system, updating the current values of variables, polling sensors, and updating the set of control commands. The logic of the control process is based on the definition and development of modes in three humidity ranges: 70-65%; 65-60%; 60-50%

Keywords: mechatronic system; hydraulic system; control system; microclimate; humidity; flow rate; greenhouse

Роман Зінько*

Доктор технічних наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3275-8188>

Олександр Крамський

Кандидат технічних наук
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-0882-9402>

Богдан Мокряк

Аспірант
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0009-0006-8990-4226>

Андрій Поляков

Доктор технічних наук, професор
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0413-6365>

Дослідження експлуатаційних характеристик пневматичного автомобільного двигуна

Анотація. Використання сучасних енергетичних установок у транспорті з двигунами внутрішнього згоряння не здатне повністю вирішити екологічні питання, зумовлені трафіком, особливо у густонаселених міських районах із населенням понад мільйон осіб. Одним із перспективних напрямів покращення екологічної безпеки транспорту є застосування двигунів, які використовують стиснене повітря як робоче середовище. Це зумовлено низкою переваг пневматичних двигунів у порівнянні з іншими енергетичними системами: високий рівень безпеки, простота транспортування, екологічність, низька собівартість виробництва пневматичних транспортних засобів і стисненого повітря, а також легкість утилізації повітряних батарей і енергетичних систем. В роботі представлено математичну модель, яка дозволяє виконувати чисельні розрахунки та оптимізувати основні енергетичні й експлуатаційні характеристики поршневих пневматичних двигунів із кривошипно-шатунним механізмом і заданим механізмом газорозподілу. Результати моделювання показали, що найбільш перспективним є 4-циліндровий пневматичний двигун. Розроблений варіант забезпечує необхідну потужність до 14 кВт залежно від вхідного тиску, а також має коефіцієнт заповнення P-V діаграми в межах 0,68–0,76.

Ключові слова: пневматичний двигун; стиснене повітря; моделювання; P-V діаграма; енергоефективність; екологічна безпечність; транспортні засоби

Suggested Citation:

Zinko, R., Kramskiy, O., Mokriak, B., & Polyakov, A. (2024). Research on the operational characteristics of a pneumatic automotive engine. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 48-53. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.48.

*Corresponding author



Вступ

Сучасні мобільні комплекси рухомих засобів відновлення озброєння і військової техніки що відносяться до системи технічної підтримки військ, повинні відповідати інтенсивному розвитку засобів і способів ведення бойових дій. Використання сучасних енергетичних установок у транспорті з двигунами внутрішнього згоряння не здатне повністю вирішити екологічні питання, зумовлені трафіком, особливо у густонаселених міських районах із населенням понад мільйон осіб. Одним із перспективних напрямів покращення екологічної безпеки транспорту є застосування двигунів, які використовують стиснене повітря як робоче середовище. Це зумовлено низкою переваг пневматичних двигунів у порівнянні з іншими енергетичними системами: високий рівень безпеки, простота транспортування, екологічність, низька собівартість виробництва пневматичних транспортних засобів і стисненого повітря, а також легкість утилізації повітряних батарей і енергетичних систем.

Стиснене повітря вже активно застосовується в енергетичних установках різного типу: для наддуву в двигунах внутрішнього згоряння, у комбінованих енергетичних системах при часткових режимах роботи двигуна, у комплексних установках зі змінним циклом роботи, що комбінують ДВЗ і пневматичний двигун, де використовується лише стиснене повітря. При цьому вихлопне повітря з залишковим тиском може бути повторно застосоване в інших циліндрах або збережене в балонах для подальшого використання. Такі компанії, як MDI, TATA тощо, вже створили пневматичні автомобілі, які підготовлені до серійного виробництва або вже випускаються, наприклад, на Гаваях. Харківський національний автомобільно-дорожній університет також здійснює дослідження і розробку пневматичних двигунів.

У системі пневматичного приводу енергія зазвичай перетворюється двигуном у механічну потужність шляхом розширення стисненого повітря в циліндрі (Fang et al., 2018). Поршневий механізм схожий на конструкцію стандартного двигуна внутрішнього згоряння, за винятком того, що в двигуні на стисненому повітрі відсутні форсунки або свічки запалювання. Робочий цикл такого двигуна складається з двох тактів: розширення та випуску. Важливо зазначити, що впускний процес відбувається на початку такту розширення. Впускний клапан відкривається зазвичай тоді, коли поршень досягає верхньої мертвої точки (ВМТ), після чого стиснене повітря надходить у циліндр із повітряного балона. Коли впускний клапан закривається, стиснене повітря, що залишилося в циліндрі, розширюється далі, доки поршень не дійде до нижньої мертвої точки (НМТ). Впускний клапан відкривається після завершення фази розширення, і стиснене повітря виходить із циліндра під час зворотного руху поршня.

Упродовж останнього десятиліття більшість досліджень двигунів на стисненому повітрі були зосереджені на поршневій конструкції. H. Liu et al. (2005) і Y. Chen et

al. (2005) створили математичні моделі таких двигунів і проаналізували їхню роботу в умовах одноетапного та двоетапного розширення. Результати підтвердили, що поршнева конструкція є оптимальним рішенням для двигунів на стисненому повітрі. X. Yu et al. (2002) дослідили теоретичний цикл таких двигунів і виявили, що вихідна потужність двигуна має лінійну залежність від початкової температури розширення. Збільшити продуктивність можна за допомогою багатоступеневої, квазіізотермічної експансії стисненого повітря. L. Liu & X.-L. Yu (2006) запропонували оптимізаційний підхід до теоретичного циклу двигуна, використовуючи метод багатокритеріальної оптимізації. Максимальна ефективність досягалася при співвідношенні тиску впуску та коефіцієнта стиснення 32 та 13 відповідно. Для траєкторії поршня був розроблений механізм з подвійним колінчатим валом, який забезпечує зупинку поршня, доки тиск у циліндрі не зрівняється з впускним, а також дозволяє лінійну залежність швидкості поршня від площі впускного клапана.

J.-Q. Hu et al. (2007) провели аналіз потоків у циліндрі двигуна, що дозволило виявити, що турбулентність біля впускного порту значно знижує енергоефективність через втрати стисненого повітря. Група з Пекінського університету авіації й астронавтики виконала віртуальне моделювання роботи двигуна, створивши модель, перевірену за допомогою пневматичного двигуна (APE) (Song et al., 2013; Xu et al., 2014a). Команда розробила нову систему клапанів для дослідження динамічних характеристик і створила оптимальні стратегії керування клапанами, що розширило теоретичні знання про технологію пневматичних двигунів. Дослідження також охоплювало моделювання теплових процесів (Xu et al., 2014b), яке показало значне зниження температури під час роботи. Для уникнення ризику замерзання через ефект дроселювання запропонували технологію компенсації температури (Shi et al., 2015), де етанол використовувався як теплообмінне середовище. Це дозволило підвищити ефективність двигуна на 30%. Q.H. Yu et al. (2016) запропонували механізм подвійного колінчатого з'єднання, що забезпечило стабільність тиску в циліндрі та підвищення енергоефективності в 1,86–2,86 рази.

Метою статті було створити математичну модель, яка дозволяє виконувати чисельні розрахунки та оптимізувати основні енергетичні й експлуатаційні характеристики поршневих пневматичних двигунів із кривошипно-шатунним механізмом і заданим механізмом газорозподілу.

Результати

Математичний опис основних параметричних впливів реалізується через систему диференціальних рівнянь і дозволяє побудувати передбачувану «P-V діаграму», що відображає реальний P-V процес. При застосуванні кривошипно-шатунного механізму розрахункова

схема для одного циліндра подана на Рисунку 1. Додатковою метою використання цієї методики було спрощення обчислень, уникнення зайвої складності та громіздкості в розрахунках.

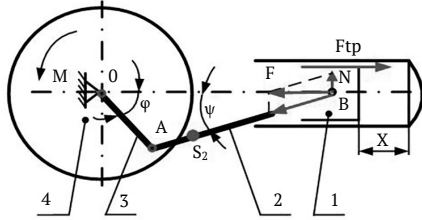


Рисунок 1. Динаміка процесів у циліндрі двигуна

Джерело: розробка авторів

Застосування розрахункових «P-V діаграм» дозволяє оцінити ефективність запропонованої динамічної методики розрахунку, а також перевірити її придатність для моделювання робочих процесів у пневматичному двигуні. Паралельно здійснюється перевірка не лише прийнятності основних фізичних принципів, припущень і спрощеної схематизації складних реальних тепло- та газодинамічних процесів, але й відповідності емпіричних величин, без яких неможливо описати фізично складні явища, що використовуються в цій методиці.

Для створення математичної моделі та розрахунку термодинамічних характеристик багаточиліндрового пневмодвигуна розглянемо його робочий цикл (Рис. 2), який складається з таких тактів (Yatsyna, 2014): 1–2 – такт впуску робочого тіла; 2–3 – такт розширення; 3–4 – такт випуску відпрацьованих газів; 4–1 – нев'язка за тиском Δp_{4-1} (близька до нуля).

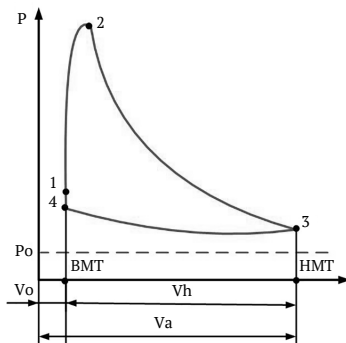


Рисунок 2. Діаграма робочого циклу поршневого пневмодвигуна

Джерело: розробка авторів

Розглянемо такт впуску робочого тіла на ділянці 1–2.

Відповідно до першого закону термодинаміки, вважаємо, що вся підведена з газом теплова енергія dQ_M витрачається на зміну внутрішньої енергії dU_1 та на роботу розширення газу dL_1 . Запишемо рівняння енергетичного балансу (Kudryavtsev, 2005; Yatsyna, 2014):

$$dQ_M = dU_1 + dL_1. \quad (1)$$

Враховуючи, що кількість теплоти, що надходить з магістралі у порожнину пневмодвигуна (далі порожнина 1), дорівнює добутку маси газу m на питому ентальпію $dQ_M = i_m dm_m$, а внутрішня енергія U_1 газу та виконувана ним робота L_1 визначаються, відповідно, $dU_1 = d(u_1 m_1)$ та $dL_1 = p_1 dV_1$, представимо рівняння (1) у такому вигляді:

$$i_m \times dm_m = u_1 dm_1 + m_1 du_1 + p_1 dV_1, \quad (2)$$

де u_1 – питома внутрішня енергія газу у порожнині 1; V_1 – об'єм порожнини 1; m_1 – маса газу, що надійшла у порожнину пневмодвигуна.

Виразимо у рівнянні (2) значення ентальпії та внутрішньої енергії через добуток температури на теплоємність за сталими тиском c_p та об'ємом c_v , відповідно:

$$c_p \times T_m \times dm_m = c_v T_1 dm_1 + c_v m_1 dT_1 + p_1 dV_1. \quad (3)$$

Розглядаючи робочий газ як ідеальний, молекулярними силами взаємодії якого можна знехтувати, опишемо його стан за рівнянням Менделєєва–Клапейрона:

$$p_1 V_1 = m_1 RT_1, \quad (4)$$

де R – газова стала (для повітря $R = 287,14$ Дж/кг К при $T = 293$ К).

Підставляючи у рівняння (3) значення $m_1 dT_1$, отримане з рівняння (4), і припускаючи у ньому $c_p/c_v = k$ та $c_p - c_v = R$, де k – показник адіабати, після нескладних перетворень отримаємо вираз:

$$kRT_1 dm_m = V_1 dp_1 + kp_1 dV_1. \quad (5)$$

Замінюючи у рівнянні (5) масу газу dm_m , що надходить у порожнину V_1 протягом часу dt , відповідним значенням витрати G_m ($dm_m = G_m dt$), виразимо отримане рівняння відносно тиску:

$$dp_1 = \frac{kG_m RT_1 dt}{V_1} - kp_1 \frac{dV_1}{V_1}. \quad (6)$$

Витрата G_m газу з необмеженого об'єму (магістралі) визначається за формулою Сен-Венана і Ванцеля (див., наприклад, Y. Chen (2005) і X. Yu (2002)):

$$G_m = \mu_1 f_1 p_M \times \sqrt{\frac{2k}{k-1} \times \frac{1}{RT_M} \left[\left(\frac{p_1}{p_M} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_M} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (7)$$

де μ_1 – коефіцієнт витрати; f_1 – площа вхідного отвору; T_M – температура газу в магістралі.

Втрати тиску газу у трубопроводі та місцевих опорах враховуються введенням коефіцієнта витрати (Kudryavtsev, 2005; Yatsyna, 2014), що також враховує стискання струменя при витіканні, швидкість підходу повітря до отвору та інші фактори.

Процес наповнення стисненим повітрям можна описати за допомогою змінного показника політропи

n , значення якого на початку процесу наповнення дорівнює показнику адиабати, а потім монотонно зменшується (Kudryavtsev, 2005):

$$n = 1 + \left[\frac{\sigma_a(k-1)}{\sigma} \right], \quad (8)$$

де $\sigma_a = p_a/p_M$; p_a – тиск у порожнині наповнення на початковий момент часу.

При $\sigma = 1$, тобто в кінці процесу, його значення асимптотично наближається до показника ізотерми $n = 1$.

Підставивши (8) у вираз (7), отримаємо наступну формулу для визначення витрати повітря під час наповнення порожнини пневмодвигуна:

$$G_M = f_1 p_M \times \sqrt{\frac{2k}{k-1} \times \frac{1}{RT_M} \left[\left(\frac{p_1}{p_M} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{p_1}{p_M} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]}. \quad (9)$$

Розглянемо процес політропного розширення робочого газу в порожнині 1 на ділянці 2–3. Рівняння політропи запишемо у такому вигляді:

$$\frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^n, \quad (10)$$

де p_2, p_3, V_2, V_3 – значення тиску в порожнині 1 та її об'єми, що визначаються відповідно під час положення поршня у точках 2 та 3.

Описуємо процес витікання стисненого повітря з порожнини пневмодвигуна при відкритому випускному клапані (ділянка 3–4). У цьому випадку може бути застосований перший закон термодинаміки (1), але в цьому рівнянні слід поставити знак мінус у лівій частині, оскільки відбувається витікання повітря:

$$-dQ_2 = dU_2 + dA_2. \quad (11)$$

Відповідно змінюємо індекс 1, що стосується першої порожнини (Рис. 2), на індекс 2 другої порожнини. Після підстановки виразів для внутрішньої енергії газу та виконуваної ним роботи у (11) отримаємо такий вираз:

$$-kRT_2 dm_2 = V_2 dp_2 + kp_2 dV_2. \quad (12)$$

Витрата повітря з обмеженого об'єму V_2 у магістраль також описується формулою Сен-Венана і Ван-целя (7), однак у ній слід прийняти $T_M = T_2$, $G_M = G_2$ та $p_M = p_2$, враховуючи, що всі ці величини є змінними [5].

$$G_2 = \mu_2 f_2 p_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \times \frac{1}{RT_2} \left[\left(\frac{p_M}{p_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_M}{p_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (13)$$

$$\varphi(\sigma) = \begin{cases} \sqrt{\sigma^{\frac{2}{k}} - \sigma^{\frac{k+1}{k}}}, & \text{якщо } 0,528 < \sigma < 1; \text{ для } k = 1,4, \\ 0,2588, & \text{якщо } 0 < \sigma \leq 0,528 \end{cases} \quad (14)$$

Після підстановки (13) у (14) отримаємо кінцевий вираз для визначення динаміки зміни тиску під час випуску з порожнини пневмодвигуна:

$$\frac{dp_2}{dt} = - \frac{k\mu_2 f_2 K p_2^{\frac{2k}{k-1}} \sqrt{RT_M}}{S_2(x_3-x)p_M^{\frac{2k}{k-1}}} \varphi\left(\frac{1}{\sigma_2}\right) + \frac{kp_2 dx}{x_3-x dt}. \quad (15)$$

Для замикання рівнянь (6), (9), (10), (15) необхідно додати закон зміни об'єму надпоршневого простору від часу.

У випадку застосування кривошипно-шатунного механізму (Рис. 2) шукану відстань X можна визначити (Kudryavtsev, 2005) як:

$$x = OA(1 - \cos\varphi) + AB(1 - \cos\omega), \omega = \arcsin\left(\frac{OA}{AB}\sin\varphi\right), \quad (16)$$

де $\varphi = t \frac{2\pi}{60} n$, n – кількість обертів за хвилину; t – час, с.

Таким чином, методика розрахунку для опису стаціонарних процесів у пневматичному двигуні базується на послідовному застосуванні рівнянь (6), (10) і (15) у системі з рівнянням (16). Оптимізація та визначення найефективніших режимів роботи досягаються шляхом варіювання основних термодинамічних і конструктивних параметрів.

Програма для чисельного моделювання та розрахунків робочого циклу, а також основних технічних і експлуатаційних характеристик поршневого пневматичного двигуна була створена за допомогою пакета Matlab-Simulink. Вона розроблена відповідно до наведеної вище математичної моделі для стаціонарного режиму роботи.

Під час досліджень змінювалися основні параметри, зокрема: зворотний тиск на випуску, характеристики навколишнього середовища, тиск і температура стисненого повітря на вході, а також швидкість обертання валу двигуна. Дослідження проводилися в сталому режимі, під час якого фіксувалися «P-V діаграми» із записом усіх зовнішніх параметрів роботи двигуна.

На Рисунку 3 зображено «P-V діаграму» пневматичного двигуна із золотниковим повітророзподілом. За контуром «P-V діаграми» можна оцінити складність термофізичних процесів, що відбуваються у циліндрі пневматичного двигуна. Окрім площ «P-V діаграм» (циклічної роботи), важливим показником є різниця між споживанням стисненого повітря, виміряним під час випробувань двигуна, і визначеним за розрахунками. У всіх режимах роботи пневматичного двигуна експериментальні значення споживання повітря виявилися вищими.

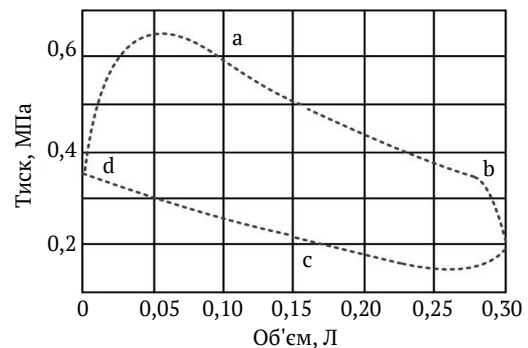


Рисунок 3. «P-V діаграма» пневматичного двигуна з золотниковим повітророзподілом

Примітки: Ne = 3,78 кВт; n = 790 об/хв.; ps = 0,9 МПа; Ts = 383 К
Джерело: розроблено авторами

На Рисунку 3 зазначені такі моменти: *a* – момент закриття впускного отвору золотникового клапана; *b* – момент відкриття випускного отвору золотникового клапана; *c* – момент закриття випускного отвору золотникового клапана; *d* – момент відкриття впускного отвору золотникового клапана. У процесі комп'ютерного моделювання роботи пневматичного двигуна з кривошипно-шатунним механізмом варіювалися наступні параметри: тиск у впускній магістралі, кут початку відкриття впускного та випускного клапанів, діаметр поршня, кількість циліндрів, діаметри впускного та випускного клапанів, а також температура повітря на вході до магістралі. Розрахунки виконувалися в сталому режимі роботи двигуна при частоті обертів 750 об/хв.

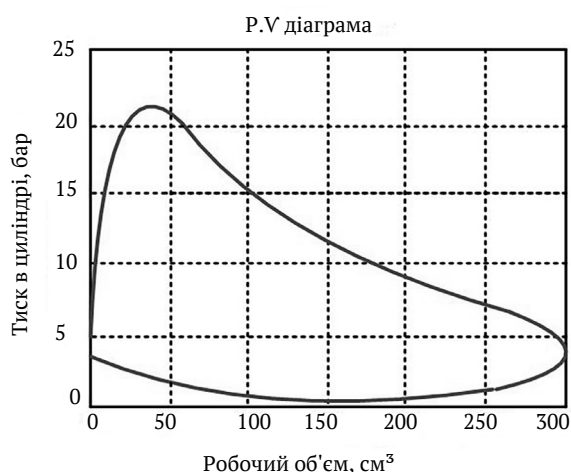


Рисунок 4. P-V діаграма робочого циклу при максимальній гальмівній потужності двигуна ($N_e = 6,22$ кВт)

Джерело: розроблено авторами

На Рисунку 4 наведена P-V діаграма робочого циклу при максимальній гальмівній потужності двигуна ($N_e=6,22$ кВт) споживання стисненого повітря (1050 л/хв.) при тиску на вході p_s від 0,5 до 1,1 МПа було на 3–12 % вище за розрахункові значення. На Рисунку 5 представлено розрахунок залежності крутного моменту від кута повороту колінчастого вала пневмодвигуна.

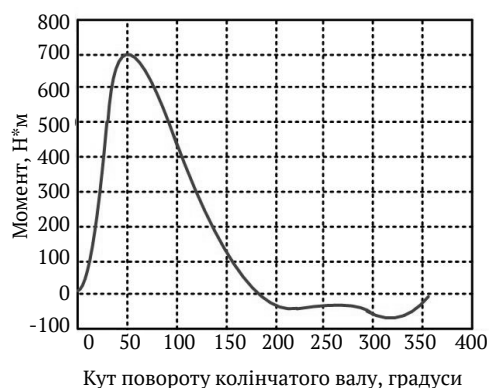


Рисунок 5. Розрахунок залежності крутного моменту від кута повороту кулачкового вала

Джерело: розроблено авторами

Висновки

Розроблена математична модель дає змогу виконувати чисельні розрахунки та оптимізувати основні енергетичні й експлуатаційні характеристики поршневих пневматичних двигунів із кривошипно-шатунним механізмом і заданим механізмом газорозподілу. За результатами моделювання, найбільш перспективним є 4-циліндровий пневматичний двигун. Цей варіант забезпечує потужність до 14 кВт залежно від вхідного тиску та має коефіцієнт заповнення P-V діаграми в межах 0,68–0,76.

Список використаної літератури

- [1] Chen, Y., Liu, H., & Tao, G.L. (2005). Simulation on the port timing of an air-powered engine. *International Journal of Vehicle Design*, 38(1-2), 259-273. doi: 10.1504/IJVD.2005.007296.
- [2] Fang, Y., Lu, Y., Yu, X., & Roskilly, A.P. (2018). Experimental study of a pneumatic engine with heat supply to improve the overall performance. *Applied Thermal Engineering*, 134, 78-85. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.113.
- [3] Hu, J.-Q., Yu, X.-L., Liu, L., & Nie, X.-H. (2007). Dynamic characteristics of in-cylinder flow field in air-powered engine. *Journal of Zhejiang University*, 41, 1912-1915.
- [4] Kudryavtsev, I.N., Kramskoy, A.V., Pyatak, A.I., & Plummer, M.C. (2005). Computer simulation of pneumatic engine operation. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 3(23), 80-89.
- [5] Liu, H., Chen, Y., Tao, G.L., Jia, G.Z., & Ding, W.H. (2005). Research on the displacement and stroke-bore ratio of the air-powered engine. In: *Proceedings of the 6th international conference on fluid power transmission and control* (pp. 381-384). Hangzhou: ICFP.
- [6] Liu, L., & Yu, X.-L. (2006). Optimal design of ideal cycle in air powered engine. *Journal of Zhejiang University*, 40, 1815-1818.
- [7] Shi, Y., Sun, J.P., Cai, M.L., & Xu, Q.Y. (2015). Study on the temperature compensation technology of air-powered engine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7, article number 023112. doi: 10.1063/1.4915294.
- [8] Song, R., Fu, X., & Cai, M. (2013). Non-dimensional modeling and simulation analysis of air powered engine. *Applied Mechanics and Materials*, 278-280, 307-314. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.278-280.307.
- [9] Xu, Q., Cai, M., & Shi, Y. (2014b). Dynamic heat transfer model for temperature drop analysis and heat exchange system design of the air-powered engine system. *Energy*, 68, 877-885. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.102.

- [10] Xu, Q.Y., Shi, Y., Yu, Q.H., & Cai, M.L. (2014a). Virtual prototype modeling and performance analysis of the air-powered engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, 228(14), 2642-2651. doi: 10.1177/0954406214520818.
- [11] Yatsyna, M.M. (2014). *Increasing the efficiency of a pneumatic engine with a ring rotor of an inter-shop autonomous vehicle*. (Abstract of the doctoral dissertation, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University, Kremenchuk, Ukraine).
- [12] Yu, Q.H., Cai, M.L., & Shi, Y. (2016). Working characteristics of two types of compressed air engine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8, article number 035701. doi: 10.1063/1.4948517.
- [13] Yu, X., Yuan, G., Shen, Y., Liu, Z., & Su, S. (2002). Theoretical analysis of air powered engine work cycle. *Journal of Mechanical Engineering*, 38(09), 118-122. doi: 10.3901/JME.2002.09.118.

Roman Zinko

Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3275-8188>

Oleksandr Kramskyi

PhD in Technical Sciences
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0007-0882-9402>

Bohdan Mokriak

Postgraduate Student
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-8990-4226>

Andrii Polyakov

Doctor of Technical Sciences, Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0413-6365>

Research on the operational characteristics of a pneumatic automotive engine

Abstract. The use of modern power units in transport with internal combustion engines cannot fully resolve environmental issues caused by traffic, particularly in densely populated urban areas with over one million inhabitants. One promising approach to improving transport's environmental safety is the use of engines that operate on compressed air as the working medium. This is due to several advantages of pneumatic engines compared to other energy systems: high safety levels, ease of transportation, environmental friendliness, low production costs for pneumatic vehicles and compressed air, as well as the ease of recycling air batteries and energy systems. This study presents a mathematical model that enables numerical calculations and optimisation of the key energy and operational characteristics of reciprocating pneumatic engines with a crank-slider mechanism and a given gas distribution mechanism. The modelling results indicate that a four-cylinder pneumatic engine is the most promising option. The developed variant provides the required power output of up to 14 kW depending on the input pressure and achieves a P-V diagram filling coefficient within the range of 0.68-0.76

Keywords: pneumatic engine; compressed air; modelling; P-V diagram; energy efficiency; environmental safety; transport vehicles

Вадим Кав'юк*

Начальник кафедри

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

61023, вул. Сумська, 77/79, м. Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-0367-8314>

Андрій Кашканов

Доктор технічних наук, професор

Вінницький національний технічний університет

21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-3294-6135>

Роль тактико-технічних характеристик засобів рухомості в аеродромно-технічному забезпеченні польотів

Анотація. В статті сформовано напрями та проаналізовано можливості обґрунтування і вибору найбільш оптимального варіанта розвитку парка засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів повітряних суден України на основі вивчення досвіду провідних країн світу та визначення ролі тактико-технічних характеристик засобів рухомості у забезпеченні польотів повітряних суден в умовах воєнного стану. Надані рекомендації дозволяють сформувати заходи щодо усунення недоліків у системі аеродромно-технічного забезпечення польотів за рахунок модернізації, уніфікації та розвитку тактико-технічних характеристик засобів рухомості. Проведений огляд і аналіз стану існуючих засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів показав, що на їх кількісний склад, тактико-технічні вимоги і конструктивні вимоги до кожної машини цієї військової техніки суттєво впливають тенденції і напрями розвитку військової авіації України, якими в сучасних умовах є: максимальне утримання у боєздатному стані наявних літаків, які мають походження ще з радянських часів, їх ремонт на вітчизняних підприємствах і незначна модернізація шляхом встановлення електронного обладнання вітчизняної розробки і нового озброєння; збереження живучості методом спроможності швидкого розосередження на оперативні аеродроми, нарощування мережі основних і запасних аеродромів; поява літаків інших іноземних країн; початок надходження на озброєння Повітряних Сил Збройних Сил України безпілотних літальних апаратів. Оцінка напрямів розвитку засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів показала, що проблемною задачею даних засобів у сучасних умовах України є збереження ресурсу як спеціального обладнання, так і автомобілів, на яких воно змонтовано. Найбільш перспективним напрямом розвитку є побудова (створення) багатомодульних машин: енергетичний модуль (автомобіль, тягач) і технологічний модуль (спеціальне обладнання). Але досі не знайдено остаточний метод, яким можна побудувати таку машину. Головною перспективою розвитку багатомодульних засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів є розв'язання задачі руху заднім ходом причіпного модуля із забезпеченням траєкторної стійкості та керованості при маневруванні

Ключові слова: автотранспортні засоби; аеродромно-технічне забезпечення; модульна технологія; тактико-технічні характеристики; експлуатаційна надійність

Suggested Citation:

Kaviuk, V., & Kashkanov, A. (2024). The role of tactical and technical characteristics of vehicles in airfield technical support of flights. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 54-62. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.54.

*Corresponding author



Вступ

Сучасні загрози та виклики національній безпеці України потребують удосконалення підходів до формування військово-технічної політики держави з урахуванням нагальної необхідності оновлення наявного озброєння та військової техніки Збройних Сил України. В сучасних умовах можливості авіації залежать від якісного, своєчасного та повного логістичного забезпечення її дій, основу якого становить система аеродромно-технічного забезпечення польотів з відповідними силами та засобами. Засобами наземного обслуговування польотів є агрегати, пристрої і пристосування, пневматичні, гідравлічні та електричні установки, призначені для контролю та підтримки технічного стану повітряних суден (ПС) [1]. Вони забезпечують застосування і обслуговування повітряних суден та їх озброєння, підтримку аеродромів в експлуатаційній готовності, виконання перевезення авіаційного персоналу. Парк засобів аеродромно-технічного обслуговування ПС України містить більше 40 зразків техніки, які на даний час агрегуються з досить великою кількістю базових автомобільних шасі (АБШ) різних типів та марок [2, 3]. Така різноманітність спричиняє велику кількість проблем під час експлуатації засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів (ЗАТЗП), оскільки усі АБШ (за винятком КраЗ) виготовляються в інших державах.

Проблеми розвитку ЗАТЗП досліджували В. В. Кириченко, Б. Г. Васильєв, О. М. Леоненко, М. М. Жданюк, Ю. М. Чередник, С. М. Макаров, Ю. М. Мотяков, С. А. Швець, С. М. Новічонок, О. Д. Кравчук, О. М. Сокол, І. В. Терентьєва, В. М. Краснокутський, R.S. Tripp, R.G. McGarvey, B.D. van Roo, J.M. Masters, J.M. Sollinger, T. Light, D. M. Romano, M. Kennedy, C. O'Connell, S. Bednarz, P. Mills, J.A. Leftwich, K. van Abel, J. Mastbaum та багато інших.

Зокрема, в результаті виконаних досліджень у роботі [2] були запропоновані методичні підходи для структурно-параметричного обґрунтування вимог до ЗАТЗП, дотримання яких дозволяє проводити випробування та оцінювати якість сучасних систем озброєння та військової техніки на всіх стадіях життєвого циклу. Аналіз способів оцінювання якості роботи ЗАТЗП як складової частини логістичного забезпечення, виконаний в роботі [4], навів авторів на думку про доцільність розгляду аеродромно-технічного забезпечення польотів як логістики сервісу. При цьому було встановлено обмеження та перспективи удосконалення сучасної системи забезпечення польотів в Україні на основі порівняння методологічних підходів з оцінювання якості авіаційної логістики та сумісності інформаційного забезпечення логістики із країнами НАТО.

Дослідження розвитку військової логістики в країнах НАТО [5-7] показує, що сучасне логістичне забезпечення в авіації повинне гарантувати виконання основними підрозділами задач як самостійно, так і в умовах взаємодії з державами-партнерами. При цьому

однією з ключових задач є вирішення питання мобільності сил та засобів логістики з метою забезпечення здатності швидкого реагування [8].

Багато уваги приділяється обґрунтуванню тактико-технічних характеристик окремих зразків ЗАТЗП. Зокрема, в роботі [9] було розглянуто питання забезпечення надійної роботи окремих зразків ЗАТЗП та формування напрямів модернізації застарілих зразків техніки шляхом використання системного підходу та багатокритеріального оцінювання показників якості. В роботі [10] сформовано перспективні проблемні завдання розвитку ЗАТЗП на основі удосконалення тактико-технічних характеристик засобів рухомості за модульним принципом.

Ведення збройної боротьби у воєнних конфліктах в сучасних умовах виявило недоліки в системі ЗАТЗП [3, 10]:

- ◆ нездатність повною мірою виконувати свої функції у надзвичайних умовах;
- ◆ недостатня гнучкість і адаптивність системи аеродромно-технічного забезпечення;
- ◆ несвоєчасність аеродромно-технічного забезпечення;
- ◆ невідповідність штатної чисельності виконавців покладеним на них завданням;
- ◆ невисока надійність і живучість ЗАТЗП.

Важливим чинником у подоланні цих недоліків є модернізація парку ЗАТЗП, його уніфікація та розвиток тактико-технічних характеристик засобів рухомості.

Мета статті – аналіз можливостей та обґрунтування першочергових заходів з удосконалення парку ЗАТЗП ПС України на основі вивчення досвіду провідних країн світу та визначення ролі тактико-технічних характеристик засобів рухомості у забезпеченні польотів ПС в умовах воєнного стану.

Результати

В сучасних умовах бойові можливості авіації залежать від якісного, своєчасного та повного логістичного забезпечення її дій, основу якого складає система аеродромно-технічного забезпечення польотів з відповідними силами та ЗАТЗП. Авіаційний парк Збройних Сил (ЗС) України в основному складається з ПС, що були на озброєнні в колишнього СРСР та виготовлені у 80–90-х роках минулого століття [2]: винищувачі МиГ-29 та Су-27, штурмовики Су-25, бомбардувальники Су-24М, літаки-розвідники Ан-30 та Су-24МР, військово-транспортні літаки Іл-76МД, спеціальні та транспортні літаки Ан-24 та Ан-26 різних модифікацій, вертольоти типу Ка-27, Ка-29, Мі-2, Мі-8, Мі-14, Мі-24, навчально-тренувальні літаки Л-39. Для забезпечення польотів цих ПС використовується аеродромна наземна техніка (Рис. 1), яку за своїм призначенням можна поділити на: засоби аеродромно-технічного забезпечення польотів; засоби пошуково-рятувального забезпечення (ЗПРЗ); засоби зв'язку та радіотехнічного забезпечення (ЗЗРЗ); засоби інженерно-авіаційного забезпечення (ЗІАЗ).

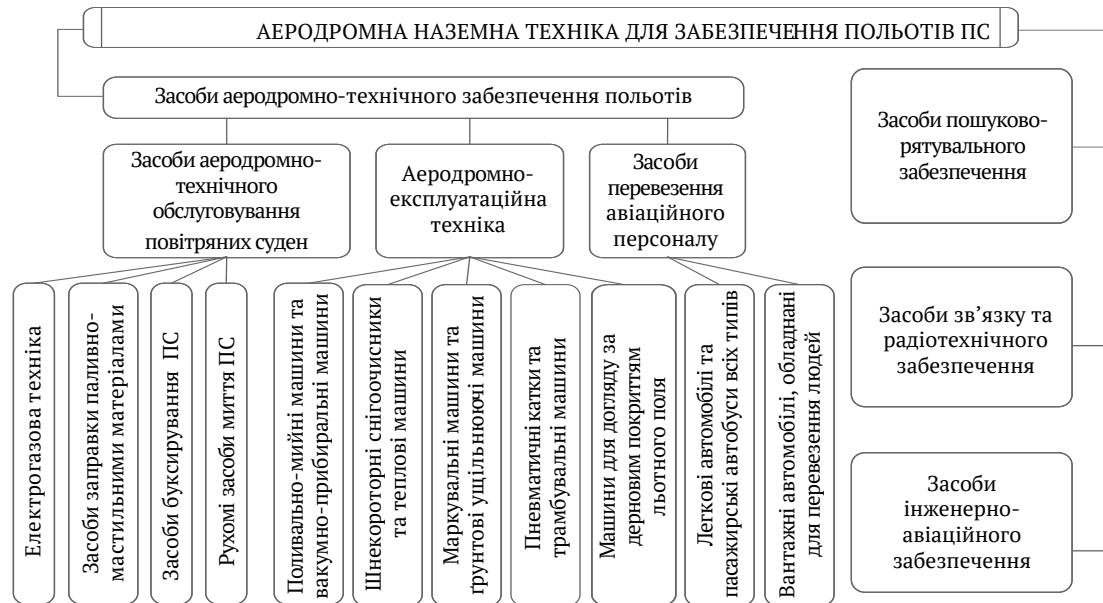


Рисунок 1. Аеродромна наземна техніка для забезпечення польотів ПС

Джерело: створено авторами

ЗАТЗП забезпечують застосування і обслуговування повітряних суден та їх озброєння, підтримку аеродромів в експлуатаційній готовності, виконання перевезення авіаційного персоналу. Типовими представниками ЗАТЗП на автомобільних шасі для обслуговування ПС авіації Збройних Сил України є аеродромні пересувні електрогідроустановки типу ЕГУ-17/210; електроагрегати типу АПА-100, АПА-80, АПА-5Д, АПА-50М; машинні перетворювачі типу АЕМГ-50М, АЭМГ-50М1, АМГ-60/30М, повітрязаправники типу ВЗ-20/350-131, киснево-зарядні станції типу АКЗС-75М, аеродромні багатоцільові кондиціонери типу АМК-24/56-131, установки для перевірки гідросистем типу УПГ-300-131 тощо [1]. Правильна і технічно грамотна організація експлуатації ЗАТЗП має за мету забезпечити постійну бойову готовність, технічну справність й найбільш ефективне їх використання за призначенням.

Динаміка зміни стану техніки ЗАТЗП за останні роки свідчить про те, що: потреба у штатних ЗАТЗП щороку збільшується; фактична наявність ЗАТЗП щороку зменшується; основна частина існуючого парку застаріла та потребує різноманітних видів ремонту, необхідність проведення яких щороку збільшується; здійснюється надходження новітніх зразків ОВТ від країн партнерів.

Крім того, технічний стан більшості ЗАТЗП ЗС України, наблизився до критичного рівня [2, 9], що викликано, в першу чергу, відпрацюванням нею більшої частини ресурсу (особливо це стосується фізичного та морального старіння), терміни експлуатації наявних ЗАТЗП на 2024 рік становили понад 20 років. У зв'язку з цим найбільш доцільними заходами для покращення технічного стану основних засобів наземного забезпечення польотів ПС ЗС України є:

а) продовження використання існуючого парку ЗАТЗП шляхом виконання таких етапів експлуатації та ремонту:

- ◆ експлуатація протягом попередньо призначеного терміну служби (ресурсу) до ремонту;
- ◆ продовження призначених показників ЗАТЗП;
- ◆ експлуатація протягом продовженого терміну служби;
- ◆ проведення капітальних та відновлювальних ремонтів ЗАТЗП;
- ◆ міжремонтна та післяремонтна експлуатація;
- ◆ проведення заходів щодо науково-технічного супроводження експлуатації та ремонту ЗАТЗП;

б) оновлення та модернізація наявного парку ЗАТЗП.

Для встановлення можливостей та обґрунтування першочергових заходів з удосконалення парку ЗАТЗП України доцільним є вивчення досвіду провідних країн світу. Відомо, що засоби рухомості в аеропорту і засоби наземного забезпечення польотів в державах НАТО використовуються для підвезення і доставки різноманітних вантажів, виконання операцій з підготовки повітряних суден до польоту, усунення несправностей, що виникають, та надання енергії для виконання великої кількості сервісних функцій [11–13]. Тенденції розвитку ЗАТЗП провідних країн світу за останні декілька десятиріч такі:

◆ поширення застосування модульних технологій побудови не тільки засобів рухомості (ЗР), а й спеціального обладнання;

◆ зменшення потужності силових установок ЗР, що пов'язано зі зменшенням габаритних та вагових показників саме спеціального обладнання. В їх конструкції застосовуються новітні технічні рішення, зокрема сучасні композитні матеріали. Більш

жорсткі вимоги ставляться щодо екологічної безпеки силових установок ЗР;

- ♦ колісні схеми сучасних ЗАТЗП тривалий строк часу залишаються постійними та у більшості їх можна поділити на три групи 4×2; 4×4; 6×4; 6×6;

- ♦ більшість провідних країн світу формують парк ЗАТЗП автомобільною технікою вітчизняного виробництва;

- ♦ поширюється використання тракторів з навісними, напівпричипними і причіпними механізмами,

а також устаткуванням спеціального призначення в якості ЗР ЗАТЗП.

В Таблиці 1, на прикладі сучасного винищувача п'ятого покоління F-35 (США), наведений перелік спеціального обладнання, що використовується для його наземного обслуговування. На Рисунку 2 наведено обладнання Air-side GSE, що використовується для наземного обслуговування авіаційної техніки повітряних сил США та порядок його розташування під час обслуговування повітряних суден.

Таблиця 1. Перелік спеціального обладнання для наземного обслуговування повітряних суден

Оригінальна назва	Переклад
Hydraulic Control Test Stand	Випробувальний стенд контролю рідин
Large Corrosion Control Cart	Великий візок для контролю корозії
Hydraulic Fluid Servicing Unit	Модуль обслуговування рідин
Engine Oil Fluid Servicing Unit	Модуль обслуговування оливи
Transmission Fluid Servicing Unit	Модуль заправлення рідин
Hydraulic Power Supply	Аеродромне джерело живлення
Hydraulic Cart	Гідравлічний візок
High Purity Self Generating Nitrogen Service Cart	Візок видобутку азоту високої чистоти
Ammunition Loader	Завантажувач боєприпасів
Aircraft Cabin Leakage Tester	Обладнання тестування герметичності кабіни
Instrument Verification System	Обладнання перевірки приладів
Transport munitions	Транспортувальник боєприпасів

Джерело: [12]

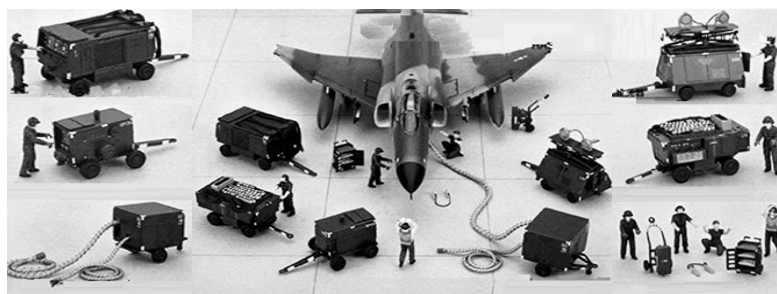


Рисунок 2. Засоби наземного обслуговування авіаційної техніки повітряних сил США

Джерело: [12]

Окрім США, актуальні розробки з цієї тематики ведуться в ФРН, Словачії, Польщі, Великобританії та ряді інших країн НАТО. Спостерігається тенденція зменшення ваги та габаритів спеціального обладнання ЗАТЗП провідних країн світу, що викликає суттєве зменшення вантажопідйомності їх ЗР. Провідні країни світу постійно збільшують уніфікацію засобів рухомості та ЗАТЗП взагалі, обираючи у якості автомобільних засобів рухомості для ЗАТЗП переважно автомобільну техніку вітчизняного виробництва. Загальна тенденція – відмова від бензинових двигунів в самохідних засобах та у приводах спеціальної техніки. На фоні найбільшого розповсюдження дизельного приводу у засобів рухомості поширюється застосування автомобілів з електричними силовими агрегатами. Країни НАТО для пересування більшості засобів наземного забезпечення використовуються причепа, що викликано підходом до застосування та транспортування такого обладнання.

Встановлено широке застосування спеціальних лоадерів які, не дивлячись на дуже специфічну конструкцію, мають непогану прохідність в транспортному положенні та здатні самозавантажуватися до транспортних повітряних суден. Країни, що входять до блоку НАТО, переоснащують парк ЗАТЗП такими засобами, що відповідають його стандартам, в тому числі й щодо засобів рухомості. Провідні країни світу у середньому кожні 10 років оновлюють свій парк ЗАТЗП, при цьому оновлюються не тільки засоби рухомості, а й спеціальне обладнання. Слід відзначити, що для наземного обслуговування повітряних суден використовується велика кількість засобів наземного забезпечення. У зв'язку з цим виробники провідних країн світу намагаються зробити ЗАТЗП найбільш універсальними.

Пріоритетним напрямом формування парку ЗАТЗП країн членів НАТО є створення нових типів малих армійських автомобілів. Так, в армії США та інших

країн широко використовуються різноманітні комплекси озброєння (у тому числі й ЗАТЗП), які встановлюються на багатоцільових автомобілях малої вантажопідйомності, що дозволяє мати високі швидкісні, тягові та маневрові якості. Значна увага в арміях провідних країн світу приділяється побудові озброєння та військової техніки (ОВТ) ЗАТЗП повітряних сил на базі модульної техніки, гібридних та електромобілів. Встановлена тенденція формування провідними країнами світу парку ЗАТЗП переважно автомобільною технікою вітчизняного виробництва. Враховуючи глибоке партнерство ЗС України з країнами НАТО та потребу повітряних сил ЗС України в технічному переоснащенні існуючих ЗАТЗАП для обслуговування літаків F-16 та подібних літальних апаратів, доцільно використати виявлений досвід при формуванні технічних програм розвитку засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів у ЗС України та в розробці нових (удосконаленні наявних) засобів ОВТ.

Серед напрямів удосконалення ЗАТЗП проглядається тенденція використання причіпної, модульної та розташованої в контейнерах техніки. Ідея модульного формування техніки не є новою – вона використовувалась у різних галузях виробництва та національної економіки [10]. При застосуванні багатоланкових машин, побудованих за модульним принципом, виникає можливість ліквідувати багатомарочність машин і, як наслідок, знизити витрати на утримання та експлуатацію техніки, підвищити річне напруження кожного агрегату, а також більш рівномірно задіяти особовий склад при виконанні робіт [14]. Також завдяки блочному

принципу модуля [15, 16] можна створити машинні агрегати різних схем компонування. Це дає можливість створити широкий набір енергетичних засобів як універсального, так і спеціального призначення. Модульний принцип побудови ЗАТЗП дає змогу змінити склад окремих агрегатів та вузлів, отримувати принципово нові енергетичні засоби. Це досягається застосуванням різноманітних схем компонування агрегатів, таких як:

- ◆ універсальні шасі з колісною формулою 4x2, 4x4, 6x6;
- ◆ селекційне шасі із вкороченою рамою;
- ◆ низькокліренсне шасі з колісною формулою 4x2;
- ◆ шасі з рамою змінного кліренсу та шасі автомобільного компонування;
- ◆ автомобільні причепи.

Для оцінювання якості компонування шасі доречно скористатись сформованою групою експлуатаційно-технічних показників, які є безпосереднім об'єктом аналізу в теорії ЗР [17]. Найважливіші показники якості та властивості АБШ наведені у Таблиці 2. Залежно від зміни умов і початкових показників ЗР його працездатність і пробіг до граничного стану змінюються в широких межах. Тому підвищення експлуатаційної надійності ЗР, зниження витрат на технічне обслуговування і ремонт, забезпечення безпеки руху є важливими практичними завданнями [14, 18, 19].

Вагомими компонентами системи забезпечення якості ЗАТЗП є використання стандартів та процеси аналізу та оцінювання запропонованих технічних рішень. Понятійний апарат та взаємозв'язки компонентів забезпечення якості можна подати у вигляді схеми (Рис. 3).

Таблиця 2. Експлуатаційно-технічні показники якості АБШ

Категорія якості	Властивості	Забезпечений ефект
Безпека руху	Захист, збереження життя та здоров'я учасників дорожнього руху	Нешкідливість для людей, довкілля та майна в екстремальних ситуаціях
Вантажопідйомність	Здатність до переміщення фізичних об'єктів	Транспортна продуктивність. Заміна альтернативних ЗР
Власна маса	Матеріаломісткість конструкції	Зниження собівартості транспортної роботи
Динамічність (швидкість, зміна показників прискорення-сповільнення, прохідність, шлях гальмування)	Зміна кількості руху	Транспортна робота. Заміна альтернативних ЗР
Керованість	Зміна напрямку руху згідно з заданим сигналом	Забезпечення заданого курсу та швидкості руху
Маневреність	Зміна свого положення за часом	Виконання транспортної роботи в складних дорожніх умовах
Паливна економічність	Витрата палива в процесі виконання транспортної роботи	Автономність руху. Собівартість транспортної роботи
Плавність руху	Рух по нерівній поверхні у заданому діапазоні коливань	Виконання транспортної роботи в складних дорожніх умовах. Нешкідливість для людей та вантажів. Швидкість
Стійкість руху	Зберігання свого положення в просторі незалежно від умов руху	Виконання транспортної роботи в складних дорожніх умовах. Нешкідливість для людей та вантажів
Екологічність	Виконання транспортної роботи без шкідливого впливу на навколишнє середовище	Мінімізація шкідливого впливу на навколишнє середовище

Джерело: складено авторами на основі [17]

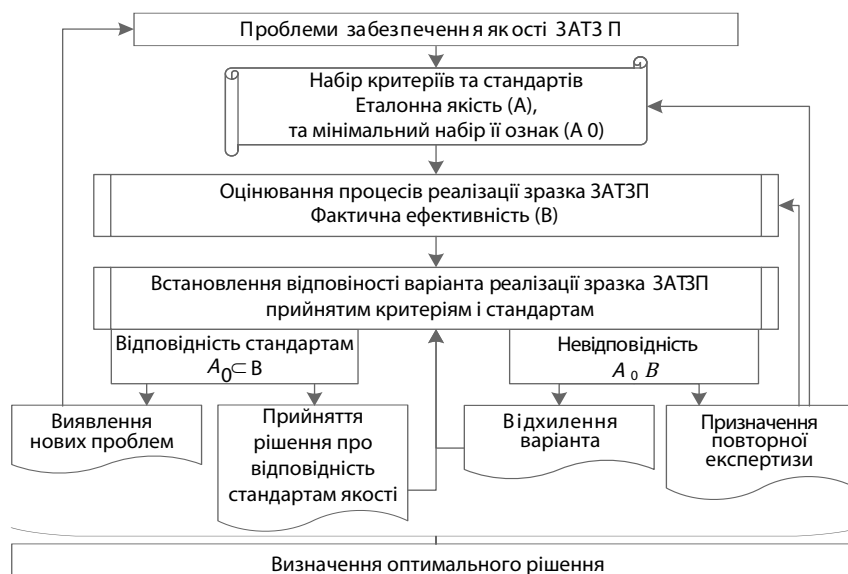


Рисунок 3. Схема забезпечення якості пропонованого варіанту компонування ЗАТЗП

Джерело: складено авторами

Більш детальний аналіз даного процесу базується на розгляді комплексу таких показників як: ефективність, економічність та адекватність, яка враховує науковість використаних методик, технічний рівень технологій, своєчасність впровадження та достатність охопту усіх проблемних питань. Підсумковий показник якості можна визначити за формулою:

$$\Sigma Q = \sqrt[m]{\prod_{k=1}^m \left(\beta_k \cdot \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \left(\alpha_i \cdot \frac{Q_i^f}{Q_i^e} \right)} \right)}, \quad (1)$$

де β_k – вага показника якості, який характеризує k -у групу властивостей в загальному показнику; m – число груп властивостей, за якими оцінюється загальна якість зразка ЗАТЗП; Q_i^e і Q_i^f – еталонне і фактичне значення характеристики i -ї властивості зразка ЗАТЗП; α_i – вага i -ї властивості показника якості, що описує k -у групу властивостей; n – кількість властивостей в k -й групі.

Основними вимогами до тактико-технічних та експлуатаційних характеристик для перспективних ЗАТЗП є: високі показники за стійкістю та плавністю ходу під час руху з забезпеченням безпеки польотів; високий рівень маневреності (у тому числі під час руху заднім ходом у складі автопоїзда); простота обслуговування та ремонту; високий рівень уніфікації автомобілів; транспортабельність (пристосованість конструкцій до перевезення на залізничних платформах, повітряних, морських (річкових) судах; висока рухомість; пристосованість до експлуатації в різних кліматичних районах країни, в денний і нічний час; високі техніко-економічні показники конструкцій у виробництві та експлуатації.

Досвід ведення бойових дій ЗС України, сучасні погляди на ведення збройної боротьби, участь у

миротворчих операціях вказують на необхідність мати у військах такі ЗАТЗП, які б мали високі тактико-технічні та експлуатаційні властивості та могли забезпечити паритет або військово-технічну перевагу над відповідними засобами армії противника. Базуючись на результатах наукових пошуків в рамках даного дослідження можна виділити три методи, які застосовуються для удосконалення парку ЗАТЗП на основі модульної технології.

Метод 1 – агрегатний (блочний) метод, під час використання якого створюється технологічне спеціальне обладнання у вигляді модуля, який легко відокремлюється від автомобіля [15, 16]. Перевага цього методу полягає лише у полегшенні процесів відокремлення спеціального обладнання від автомобіля для вирішення питань ремонту, ресурсу, модернізації. Залишаються такі недоліки: велика різноманітність марок машин парку (під кожне спеціальне обладнання потребується індивідуальний підбір автомобіля), залишається багато дорогих спеціальних автомобілів (аеродромно-експлуатаційна техніка, машини з відбором потужності та ін.), зниження живучості в умовах маршу (неможливість оперативної заміни автомобіля на будь-який інший автомобіль, особливо у польових умовах – відсутність уніфікації по шасі).

Метод 2 – створення парку ЗАТЗП на базі шасі зчленованого трактору типу Т-150К [15, 20] або інших тракторів та їх комбінації між собою та з автомобілями. Цей метод незначно відрізняється від попереднього – тільки можливістю використання вітчизняного шасі, що не вирішує усі питання. З'являються ще додаткові недоліки – якщо у шасі разом зі спеціальним обладнанням змінюються масові і габаритні параметри (база, маса, центр мас, габарити модульного блоку), то треба заново проектувати шасі, робити перерахунки і виконувати усі етапи життєвого циклу створення такої нової машини.

Це потребує значних додаткових фінансових вкладень і багато часу, що неприпустимо у сучасних умовах.

Метод 3 – створення парку ЗАТЗП на базі автопоїзду з двовісними причепами. Проведені дослідження [16, 21] показали, що динамічні властивості таких машин достатні. На перший погляд цей метод уможливає реалізацію усіх переваг модульності. Але аналіз показує, що з'являються нові суттєві недоліки, пов'язані з відсутністю технології керування маневруванням при русі причепа заднім ходом. Тому ускладнена та небезпечна така логістична операція, як «Під'їзд до повітряного судна заднім ходом», та зменшується тактична рухомість ЗАТЗП. А це зменшує живучість. Цей метод широко використовується за кордоном, але з маленькими двовісними причепами та маленькими колесами [11–13]. Це припустимо тільки для цивільної авіації, тому що виключається спроможність переміщення ЗАТЗП по дорогах та бездоріжжю для перебазування на оперативні (запасні) аеродроми, що впливає на оперативно-тактичну рухомість [1].

Отже, наявні методи мають певні недоліки та обмеження для засобів, які розглядаються, – вони не вирішують головне питання: на базі якого шасі доцільно виконувати технологічні модулі з метою створення ЗАТЗП (вирішення сучасних проблемних задач). Аналіз також показує, що досі не досліджувалось методи керування маневруванням багатомодульними засобами під час руху заднім ходом у процесі виконання логістичних операцій по обслуговуванню повітряних суден під час їх підготовки до польотів, зокрема для – ЗАТЗП, з забезпеченням вимог щодо безпеки польотів. Тому необхідно провести більш глибоке дослідження у напрямі пошуку розв'язання даної задачі, щоб розробити метод, який допоможе вирішити ці проблемні питання.

Висновки

Проведений огляд і аналіз стану існуючих ЗАТЗП показав, що на кількісний склад парку ЗАТЗП, тактико-технічні

вимоги і конструктивні вимоги до кожної машини цієї військової техніки суттєво впливають тенденції і напрями розвитку військової авіації України, якими в сучасних умовах є:

- ◆ максимальне утримання у боездатному стані існуючих літаків, які мають походження ще з радянських часів, їх ремонт на вітчизняних підприємствах і незначна модернізація стосовно електронного обладнання вітчизняної розробки і появи нового озброєння;
- ◆ збереження живучості методом спроможності швидкого розосередження на оперативні аеродроми, нарощування мережі основних і запасних аеродромів;
- ◆ поява літаків інших іноземних країн;
- ◆ початок надходження на озброєння повітряних сил ЗС України безпілотних літальних апаратів.

Потреба у створенні сучасних та вдосконаленні існуючих зразків ЗАТЗП загострюється у зв'язку з ресурсними проблемами і машин і спеціального обладнання, яке розміщено на них. Тенденція надходження на озброєння повітряних сил ЗС України безпілотних літальних апаратів є новітньою і потребує виконання нових логістичних операцій з підготовки безпілотного літального апарату до польоту в ході аеродромно-технічного забезпечення.

Оцінка напрямів розвитку ЗАТЗП показала, що проблемною задачею даних засобів у сучасних умовах України є збереження ресурсу як спеціального обладнання, так і автомобілів, на яких воно змонтовано. Найбільш перспективним напрямом розвитку є побудова (створення) багатомодульних ЗАТЗП: енергетичний модуль (автомобіль, тягач) і технологічний модуль (спеціальне обладнання). Але досі не знайдено остаточний метод, яким можна побудувати таку машину. У подальшому перспективними напрямками розвитку багатомодульних засобів аеродромно-технічного забезпечення польотів є розв'язання задачі руху заднім ходом причіпного модулю до повітряного судна з забезпеченням траєкторної стійкості і керованості при маневруванні.

Список використаної літератури

- [1] Leonenko, O.M., Kavyuk, V.V., & Busylko, O.A. (2015). *Operation of vehicles and ground support equipment for flights*. Kharkiv: KhUPS.
- [2] Zhdaniuk, M.M., Cherednyk, Yu.M., Makarov, S.M., Motiakov, Yu.M., & Shvets, S.A. (2021). Systematic approach to the development of general requirements for ground support equipment for flights. *Collection of Scientific Works of the State Research Institute of Testing and Certification of Armaments and Military Equipment*, 4(10), 45-55. doi: 0.37701/dndivsovt.10.2021.05.
- [3] International scientific and practical conference: Comprehensive defense: experience in countering the armed aggression of the Russian Federation against Ukraine: collection. materials of the international scientific-practical conference. (2023). Kyiv: NGO of Ukraine.
- [4] Novichonok, S.M., Kravchuk, O.D., Leonenko, O.M., Sokol, O.M., & Terentyeva, I.V. (2023). Ways to improve the assessment of the quality of aerodrome and technical support for flights of aircraft of the Armed Forces of Ukraine taking into account the experience of partner countries. *Science and Technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine*, 4(53), 46-53. doi: 10.30748/nitps.2023.53.06.
- [5] Serrano, A., Kalenatic, D., López, C., & Montoya-Torres, J.R. (2023). Evolution of military logistics. *Logistics*, 7(2), article number 22. doi: 10.3390/logistics7020022.
- [6] Tripp, R.S., McGarvey, R.G., van Roo, B.D., Masters, J.M., & Sollinger, J.M. (2010). *A repair network concept for air force maintenance. Conclusions from analysis of C-130, F-16, and KC-135 fleets*. Santa Monica: RAND Corporation.

- [7] Light, T., Romano, D.M., Kennedy, M., O'Connell, C., & Bednarz, S. (2016). *Consolidating air force maintenance occupational specialties*. Santa Monica: RAND Corporation.
- [8] Mills, P., Leftwich, J.A., van Abel, K., & Mastbaum, J. (2017). *Estimating air force deployment requirements for lean force packages. A Methodology and decision support tool prototype*. Santa Monica: RAND Corporation.
- [9] Kashkanov, A.A., Krasnokutskyi, V.M., Kaviuk, V.V., & Matiushchenko, S.Ya. (2023). Justification of the tactical and technical characteristics of the additional power plant during the modernization of the airfield multi-purpose air conditioner AMK-24/56-131. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Construction: Collection of Scientific Works*, 2, 3-17. doi: 10.20998/2078-6840.2023.2.01.
- [10] Kyrychenko, V.V., Kaviuk, V.V., & Vasyliiev, B.G. (2017). *Solving the problematic tasks of the prospects for the development of airfield maintenance facilities for aircraft*. *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, 2(27), 42-48.
- [11] Thomas, S. (2001). *Civilian and military air traffic control in the EU. Working document for the STOA Panel*. Brussels, European Parliament.
- [12] North Atlantic Treaty Organization (NATO). (2022). *Aviation Committee*. Retrieved from https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_69339.htm.
- [13] Ground support. (n.d.). Retrieved from <https://www.aeroservicesltd.com/ru/ground-support/gse>.
- [14] Kashkanov, A.A., & Bilichenko, V.V. (2004). *Operation and maintenance of transport vehicles*. Vinnytsia: VNTU.
- [15] Krasnokutskyi, V.M. (2006). *Method of building a complex of ATZ flight facilities based on energy modules*. (Doctoral dissertation, Kharkiv Air Force University, Kharkiv, Ukraine).
- [16] Kyrychenko, V.V. (2012). *Rational ratios of the main characteristics of block-modular ground support facilities for aviation flights*. (Doctoral dissertation, Kharkiv Air Force University, Kharkiv, Ukraine).
- [17] Pacejka, H.B. (2012). *Tire and vehicle dynamics*. Butterworth-Heinemann: Elsevier. doi: 10.1016/C2010-0-68548-8.
- [18] Burennikov, Yu.A., Kashkanov, A.A., & Rebedailo, V.M. (2009). *Rolling stock of road transport: Work processes and calculation elements*. Vinnytsia: VNTU.
- [19] Kashkanov, V.A., Kashkanov, A.A., & Kuzhel, V.P. (2020). *Information systems and technologies in road transport*. Vinnytsia: VNTU.
- [20] Podrygailo, M.A., Krasnokutskyi, V.M., & Kyrychenko, V.V. (2007). *Formation of braking and dynamic properties of modular equipment for aerodrome and technical support of aviation flights*. *Weapons Systems and Military Equipment*, 3(11), 69-73.
- [21] Kyrychenko, V.V., Podrygailo, M.A., Kurenko, O.B., & Klets, D.M. (2012). *Experimental determination of dynamic properties of promising means of mobility of ground support means of aviation operations based on wheeled technological and energy modules and their comparison with dynamic properties of means of mobility of ground support means of aviation operations, which are in service with the Air Force of the Armed Forces of Ukraine in conditions of a military airfield*. *Collection of Scientific Works of the KhUPS*, 2(31), 34-38.

Vadym Kaviuk

Head of the Department

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University

61023, 77/79 Sumska Str., Kharkiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-0367-8314>

Kashkanov Andrii

Doctor of Technical Sciences, Professor

Vinnitsia National Technical University

21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnitsia, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-3294-6135>

The role of tactical and technical characteristics of vehicles in airfield technical support of flights

Abstract. The article formulates directions and analyses the possibilities of substantiating and selecting the most optimal option for the development of the fleet of airfield technical support for flights of Ukrainian aircraft based on the experience of the leading countries of the world and determining the role of tactical and technical characteristics of vehicles in ensuring flights of aircraft under martial law. The provided recommendations allow to formulate measures to eliminate shortcomings in the system of airfield technical support of flights through the modernization, unification and development of tactical and technical characteristics of vehicles. The review and analysis of the state of the existing airfield technical support facilities showed that their quantitative composition, tactical and technical requirements and design requirements for each machine of this military equipment are significantly influenced by the trends and directions of development of the military aviation of Ukraine, which in modern conditions are: maximum maintenance in combat-ready condition of existing aircraft, which have their origin since Soviet times, their repair at domestic enterprises and insignificant. modernization of other electronic equipment of domestic development and the appearance of new weapons; preservation of survivability by the method of susceptibility of rapid dispersal at operational airfields, expansion of the network of main and reserve airfields; the appearance of aircraft of other foreign countries; the beginning of the entry into service of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine of unmanned aerial vehicles. An assessment of the directions of development of airfield technical support facilities has shown that the problematic task of these facilities in the current conditions of Ukraine is to preserve the life of both special equipment and vehicles on which it is mounted. The most promising direction of development is the construction (creation) of multimodular vehicles: an energy module (car, tractor) and a technological module (special equipment). But no definitive method has been found yet to build such a machine. The main obstacle to further prospects for the development of multimodular airfield technical support vehicles is the unresolved problem of reversing the trailer module to ensure trajectory stability and controllability during maneuvering

Keywords: vehicles; airfield technical support; modular technology; tactical and technical characteristics; operational reliability

Anton Kozlov*

Master

National University "Odesa Maritime Academy"

65052, 8 Didrikhson Str., Odesa, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0000-1305-0558>

Valentyn Stehnii

Master

National University "Odesa Maritime Academy"

65052, 8 Didrikhson Str., Odesa, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0007-2009-6539>

Oleksander Holyk

Master

National University "Odesa Maritime Academy"

65052, 8 Didrikhson Str., Odesa, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0008-4492-7410>

Integration of an optoelectronic surveillance system with an artillery radar station to optimise ship self-defence in mine detection

Abstract. The purpose of the study was to analyse ways to improve the efficiency and accuracy of interaction between optoelectronic systems (OES) and radar stations (RLS) on ships to improve anti-aircraft fire systems in self-defence zones. Various approaches were used to analyse data integration, automate processes, and optimise communication between systems based on theoretical models and practical examples of interaction between ship systems. The study showed that the integration of OES surveillance with RLS on ships significantly increases the accuracy of target detection and the effectiveness of anti-aircraft fire systems in war zones. It was found that synchronisation of data with the OES and RLS provides faster identification of threats, especially in difficult weather conditions or with limited visibility. Data processing algorithms are analysed, which significantly improve noise filtering and the accuracy of recognising mines and other threats by improving methods for analysing signals and integrating information from various sensor systems. Automated control systems allow minimising the response time to threats, increasing the efficiency of actions. The study also found that automatic steering systems integrated with navigation and safety systems effectively reduced the risk of mine detonation through real-time manoeuvres. The methods used included dynamic positioning and automatic correction of the ship's course depending on data obtained from the OES and RLS. This contributed to a quick response to threats and increased the overall safety of ships in coastal areas. It was established that improving communication channels between systems reduces delays in data transmission, which contributes to a faster response to threats. It was found that the integration of automatic steering systems with navigation systems improves the ship's manoeuvrability and reduces the likelihood of falling into mine threat zones. The analysis showed that an integrated approach to modernising the interaction between the OES and RLS allows creating a more stable and effective ship defence system in coastal zones. The practical significance of the research lies in the potential use of the findings for the development and implementation of modern integrated ship defence systems, which contribute to enhancing ship safety in challenging conditions

Keywords: noise filtering; navigation; manoeuvrability; communication channels; coastal zone safety; automatic steering systems

Suggested Citation:

Kozlov, A., Stehnii, V., & Holyk, O. (2024). Integration of an optoelectronic surveillance system with an artillery radar station to optimise ship self-defence in mine detection. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 63-73 doi: 10.63341/vjmet/2.2024.63.

*Corresponding author



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Introduction

In the modern military environment, improving the effectiveness of ship self-defence systems is an important task, especially in the context of threats from mines, missile attacks, underwater objects, and other hazards that can cause damage during navigation in coastal areas and strategically important regions. Integration of optoelectronic surveillance systems (OES) with artillery radar stations (RLS) is a key direction to achieve this goal. OES provide high-quality visual surveillance and accurate target identification, which allows detecting threats at close and medium distances. RLS, in turn, specialise in detecting objects at a long distance, including those that are under water or in conditions of limited visibility. The combination of these two technologies helps to create a comprehensive system that significantly improves the accuracy of detecting threats, such as mines. The problem of the study is the need to improve the effectiveness of interaction between the OES and RLS to improve the accuracy and speed of responding to threats in modern military conflicts. The presence of difficult weather conditions, limited visibility and risks associated with mine threats pose additional challenges to ensuring the safety of ships in coastal areas. Automation of control and data processing processes allows minimising delays and ensuring prompt response, but requires further improvement in terms of information synchronisation and integration of automatic steering and navigation systems. This requires a comprehensive approach to modernising defence systems to improve their effectiveness and security in the face of rapidly changing threats.

A study of this topic showed that a number of researchers have already explored various aspects of integrating these technologies. X. Zhou *et al.* (2021) focused on automating data processing and integrating control systems, which can significantly improve the efficiency of responding to threats. Their research has demonstrated improved accuracy due to reduced information processing time, but does not fully cover the impact of automation on integration with OES. F. Mercaldo & A. Santone (2021) explored new signal processing algorithms to reduce noise and improve the accuracy of threat recognition. Although their results showed a significant improvement in noise filtering, there are gaps in integrating these algorithms with the new sensors.

H. Bounaceur *et al.* (2022) analysed the operation of improved radars in conditions of limited visibility, which confirmed an increase in their effectiveness in detecting threats. However, aspects of RLS integration with OES were rather neglected. L. Chang *et al.* (2022) focused on control automation and its impact on response speed, but their study does not fully cover the integration of these systems into integrated defence solutions. V. Mashtalir *et al.* (2023) considered the integration of sensor systems for integrated ship protection. Their results showed the advantages of this approach, but did not consider the impact of data synchronisation on overall security under specific coastal conditions.

M. Lanza *et al.* (2022) also made significant contributions to sensor system integration research, showing the benefits of new technologies for reducing data transmission delays and improving efficiency. However, these studies do not fully cover the issues of interaction between different technologies in real-world settings. O. Melnyk *et al.* (2022a) investigated automatic steering systems and their impact on ship manoeuvrability, finding that their integration with navigation systems reduces the risk of mine strikes. E. Ali *et al.* (2021) examined the impact of new technologies on reducing data transmission delays, which is critical for timely response. J. Zhang *et al.* (2021) focused on improving signal processing algorithms and integrating information from various sensor systems, which can significantly improve the accuracy of threat detection in complex environments. The study by M. Fathi *et al.* (2022) demonstrated the advantages of new approaches to data processing in difficult weather conditions, but did not fully consider the integration of the latest sensors with existing control systems. These studies confirm the importance of integrating OES and RLS to improve defence efficiency, but also point to the need to further explore integrated solutions and integrate new technologies to achieve optimal results in real-world conditions.

The purpose of the study was to analyse methods for improving the interaction between OES and RLS on ships to improve the accuracy and effectiveness of anti-aircraft fire systems in self-defence and combat zones.

Materials and Methods

In this study, a comprehensive approach was applied to analyse methods for improving the interaction between optoelectronic systems (OES) and radars on ships, in particular in conditions typical of self-defence zones near the coast of Ukraine. Modern data processing methods were used to assess the integration of OES and RLS. In particular, noise filtering using adaptive filters was used to improve the separation of useful signals from noise. Data fusion algorithms, such as clustering and synchronisation algorithms, allowed the integration of information from different sensor systems. And the introduction of automated data processing technology helped to optimise the collection and analysis of information in real time.

Integration was carried out based on marine equipment, which are used on coastal defence ships, including:

- ◆ OES “Sarmat-2”, “Sens-2”, and “Spin”, which were developed by the State Enterprise Research Institute “Kvant” (Ukraine);
- ◆ radar system “Delta-M” by the State Enterprise Research Institute “Kvant” (Ukraine).

Special attention was paid to systems that can operate in conditions of limited visibility and complex electronic conditions.

To test the effectiveness of system integration, combat simulations were conducted using virtual reality and computer modelling technologies. This made it possible

to create conditions as close to real life as possible and to assess: the accuracy of target detection and identification, the speed of system response to threats, the effectiveness of combining data from the UES and radar, and the performance of anti-aircraft fire systems in real time. The performance of the signal processing algorithms, interference immunity and ability to operate in low visibility conditions were tested in simulated conditions in coastal areas, analysing threat scenarios such as mine threats or drone attacks. The main methods for improving signal processing algorithms focused on filtering out noise that interferes with accurate determination of target coordinates, and optimising algorithms for integrating data from both systems.

The study tested a system for automatically determining safe routes in high-risk areas. It included the integration of self-driving systems with navigation systems, anti-aircraft fire control systems, information systems for collecting and processing data from the power grid and radar. The integration of these systems ensured: real-time data visualisation on interactive displays, timely detection of threats, coordination of crew actions and automated systems for rapid response to dangerous situations.

The following calculations based on equations were used in the study. The equation for calculating the synchronisation delay time of signals from two sources has the form (1):

$$t_{sync} = t_{OES} - t_{RLS}, \quad (1)$$

where: t_{sync} – time for signal synchronisation; t_{OES} – signal transmission time from the OES; t_{RLS} – time of signal transmission from the RLS.

An important stage was the introduction of an automated fire control system. The system used machine learning algorithms to quickly identify threats and classify objects. For this purpose, algorithms based on conditional probability were used according to the Bayes method (2):

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (2)$$

where: $P(A|B)$ – probability that the threat is a mine, provided that the data obtained; B , $P(A)$ – probability of a threat; $P(A|B)$ – probability that the data reflects a mine.

The automated fire control system has reduced delays in responding to threats due to fast data processing. Autosteering systems adjusted the ship's course to avoid threats detected by the OES and RLS. Manoeuvring was provided based on the projected mine rate according to equation (3):

$$\Delta\theta = \frac{d_{min}}{\vartheta_{ship}} \cdot \cos(\alpha), \quad (3)$$

where: $\Delta\theta$ – course change angle; d_{min} – distance to the mine threat; ϑ_{ship} – ship speed; $\cos(\alpha)$ – angle between the ship and the mine threat.

Results

For modern defence systems, it is important to ensure a high level of accuracy and effectiveness in detecting and neutralising threats, especially in conditions of combat operations in coastal areas. One of the key factors influencing the increase in the combat readiness of ships is the integration of the OES and RLS (Kari et al., 2023). OES and RLS used on warships have various advantages and limitations. Combining their capabilities through synchronisation and collaborative data processing is a necessary step to improve the effectiveness of anti-aircraft fire systems.

OES and RLS systems play a key role in improving the effectiveness of self-defence systems of the Ukrainian naval forces. Among the main representatives of the OES are “Sarmat-2”, “Sens-2”, and “Spin”, which were developed by the State Enterprise Research Institute “Kvant”. Table 1 shows the main OES and RLS systems, their technical characteristics, advantages and disadvantages.

Table 1. Main OES and RLS systems

System name	Type	Main technical characteristics	Advantages	Disadvantages
Sarmat-2	OES	Thermal imager with cooled receiver, TV camera with varifocal lens	High sensitivity, auto-tracking ability	High cost, need for regular maintenance
Sens-2	OES (modification “Sarmat-2”)	Predictor sight, manual control	Flexibility in operation, possibility of manual mode	Dependence on manual control
Spin	OES	Standard elements for integrating firepower	Easy integration with other systems	Limited features in poor visibility conditions
Delta-M	RLS	Detection of targets over long distances	High detection range, stable operation	Vulnerability to obstacles and masking goals

Source: compiled by the authors based on S. Voronkov (2020)

The “Sarmat-2” system is equipped with a thermal imager with a cooled receiver and a television camera with a varifocal lens, which provides high sensitivity and the ability to auto-track targets. It allows controlling the fire of medium-calibre artillery and increases the effectiveness of combat in conditions of limited visibility. Modification “Sens-2” has a long-angle sight and the possibility of manual control, which makes it especially useful in situations where automatic mode may not be appropriate. The “Spin”

system is easy to integrate with other systems, but its capabilities are limited in conditions of poor visibility. RLS that operate based on radio wave reflection remain effective even at night or in adverse weather conditions such as fog or rain. They provide threat detection over long distances and demonstrate high stability, but may be vulnerable to masking targets. Integration of the OES with the RLS creates a comprehensive surveillance system that functions continuously, even in difficult conditions. Due to the

combination of data from both systems, maximum efficiency is achieved: information from the OES can be supplemented with data from the RLS, which increases the accuracy and reliability of determining the coordinates of objects and threats (Majors & O'Neil, 2021).

An important issue in the integration of the two systems is the synchronisation of signals received from OES and RLS sensors, and the assessment of the impact of the delay in their receipt on the overall efficiency of interaction between these systems. To do this, it is important to determine specific delay time values between signals. The synchronisation delay time between the OES and RLS signals was determined using equation (1). During the study, the arrival time of the signal from the OES was 5×10^{-5} seconds, and from the RLS – 5.001×10^{-5} seconds, then:

$$t_{\text{sync}} = t_{\text{OES}} - t_{\text{RLS}} = 5 \times 10^{-5} - 5.001 \times 10^{-5} = -1 \times 10^{-8} \text{c.}$$

This result showed that the delay between signals was very small and was only -1 nanosecond, and therefore, the data transfer rate remained at a fairly high level. According to the research, optimising synchronisation between these systems can significantly reduce the time required to detect, identify, and target a threat, which is especially important in conditions of limited visibility, where the accuracy of threat recognition is crucial. In coastal waters where the presence of mines and small objects can lead to serious consequences, a quick and accurate system response is vital. Rapid detection of the exact location of threats allows quickly responding and use anti-aircraft fire systems with maximum efficiency. In addition, integration reduces the burden on operators responsible for monitoring and analysing threats. A system that automatically combines data from OES and RLS can provide operators with more accurate and coordinated information about potential threats, making decision-making easier (Zhang *et al.*, 2022). Therefore, the introduction of data synchronisation and co-processing methods between OES and radars is an important step to improve the accuracy of threat detection and improve the effectiveness of ship defence systems.

Automating processes in controlling artillery systems on ships can significantly improve the efficiency and speed of responding to threats (Brown *et al.*, 2021). For this purpose, it is important to implement modern algorithms that allow automatic processing of data from OES and RLS. However, to understand how accurately automated systems can identify threats, it is necessary to consider a probabilistic approach, in particular, Bayesian inference. The probability that the detected object is a mine threat can be calculated using equation (2). In particular, in the current study, the probability that an object is a mine threat before receiving a signal is 0.4 (or 40%), the probability of receiving a signal from an object if it is really a mine threat is 0.9 (or 90%), and the overall probability of receiving a signal from an object (regardless of its type) is 0.5 (or 50%), then:

$$P(A|B) = \frac{0.9 \cdot 0.4}{0.5} = 0.72.$$

Therefore, in the current study, the probability that an object is a mine threat, provided that a signal is received, is 0.72, or 72%. In general, the accuracy of object identification using OES is very high, and when using artificial intelligence, it exceeds 90%. The accuracy of OES identification depends on the resolution of cameras, infrared and thermal imaging sensors, and computer vision algorithms that allow achieving 90-95% accuracy for well-defined objects. Radar identification is limited to general categories of objects, with an accuracy of 70-80%. These systems are primarily designed to fix an object and determine its trajectories. The integration of OES and RLS allows to achieve a high level of threat identification accuracy – 95-98% in favourable conditions, reducing the likelihood of false identification, which is important for optimizing ship self-defence systems. In particular, the probability of detecting a threat if a signal is received is crucial for an effective response in coastal areas, where even small errors can lead to serious consequences. To achieve high accuracy and quality of threat detection, the technical performance of both systems is important.

High-quality OES systems provide accuracy of up to $0.01-0.05^\circ$ in determining angular coordinates, depending on the resolution of sensors such as infrared, ultraviolet, or daytime cameras. OES can detect targets at distances of up to several tens of kilometres, but atmospheric conditions such as fog or rain can affect the range. The error of visual detection methods is several metres, which can affect the accuracy of threat assessment. Modern radars can determine the angular coordinates of targets with an accuracy of $0.1-1^\circ$, which depends on the frequency of operation and signal strength. Radars are capable of detecting targets at distances of up to several hundred kilometres (for large objects), and the accuracy of measuring the range can reach several metres. For ultra-high-frequency radars, the error is 5-50 metres, while for millimetre waves it can be only a few centimetres. Combining these technologies reduces the overall error rate. The RLS provides accurate distance and speed detection, while the OES improves the accuracy of angular coordinates and target recognition (Ballan *et al.*, 2024). Based on this integration, the total error can be reduced to 1-5 metres in distance and $0.01-0.1^\circ$ in angle. Due to this approach, automated systems are able to better classify objects and respond more quickly to threats, which ensures a high level of ship safety in difficult conditions.

Modern autosteering systems are an important component on ships, providing automatic correction of the ship's course depending on threats detected by the OES and RLS. They can significantly reduce the risk of damage from mines or anti-aircraft fire by manoeuvring in a timely and accurate manner. Automatic course adjustment is carried out in real time, which ensures prompt response to changes in the situation around the ship. Autonomous steering systems can integrate with navigation and ship protection systems, which helps to automatically determine safe routes in areas with a high level of threat (Hanaford & Hassel, 2021). This provides an additional layer

of security, as the system can process data from the OES and RLS, identify potential threats, and instantly adjust its course to avoid dangerous areas. Such integration allows the ship to manoeuvre effectively even in difficult conditions, reducing the likelihood of enemy shells hitting the ship or tripping mines. This approach significantly increases the overall effectiveness of the ship's self-defence

system, ensuring a high level of safety in dangerous waters. Automated systems help to reduce the human factor in decision-making and increase the speed of response to threats, which is critical for maintaining the ship's defence capability in the face of constant risks. The characteristics of systems for improving the overall effectiveness of ship self-defence are discussed in Table 2.

Table 2. Basic control systems and their functions in ship self-defence

System	Function	Advantages
OES	Visual observation	High accuracy in the daytime and in good weather conditions
RLS	Radar detection	Can work in conditions of limited visibility
Automated control system	Control of anti-aircraft fire systems	Minimises reaction time and improves accuracy
Autosteering system	Automatic ship manoeuvring	Reduces the risk of being blown up by mines and hit by enemy shells
Navigation system	Automatic detection of safe routes	Provides security in areas with a high level of threat

Source: compiled by the authors based on G. Mander et al. (2023)

In general, the integration of OES, RLS, automated control systems, steering systems and navigation technologies into a single control network significantly increases the effectiveness of the ship's self-defence. This integrated system provides a timely and accurate response to a variety of threats that arise in difficult and unpredictable conditions, such as limited visibility or high levels of mine hazards. Due to this integration, management decisions are made faster, manoeuvring becomes more adaptive and accurate, and the risk of damage is significantly reduced. This creates a more stable and reliable defence system that can effectively protect the ship in all situations, increasing its survivability and efficiency in coastal waters and in areas with a high level of threat.

In modern conditions of technology development, an important aspect of improving the efficiency of OES and RLS is the improvement of signal processing algorithms. One of the key problems that arise during the interaction of OES and RLS is the influence of external interference

and noise on the accuracy of systems. Noise filtering is an integral part of improving signal processing algorithms, as it can significantly reduce the impact of undesirable factors on system performance. In addition, an important step in improving algorithms is to improve the accuracy of determining the coordinates of objects. Since OES provide high-resolution visual data, and radars provide stable operation in conditions of limited visibility, the combination of these advantages helps to more accurately determine the location of targets, reducing the time to make decisions in critical situations. Algorithms for integrating data from different systems are also being improved. Modern data pooling algorithms use multisensory information processing methods, which facilitates more accurate and faster coordinate determination. Combining information with OES and RLS should consider the difference in data formats and the speed of their receipt. Table 3 shows the interaction of systems on the ship and potential directions for improving signal processing algorithms.

Table 3. Interaction of systems on the ship and improvement of signal processing algorithms

System	Main function	Data type	Data processing issues	Ways to improve algorithms
OES	Visual observation	Infrared and daytime video streams, SWIR signals, laser marking signals, analogue and digital signals (voltage, current, frequency)	Noise, interference, voltage instability, limited visibility, power consumption	Noise filtering, adaptive voltage regulation, optimisation of power consumption, improvement of image processing algorithms
RLS	Object detection and tracking	Radar signals (amplitude, phase, frequency)	Noise, interference, multi-purpose echoes, coordinate errors	Improvement of signal processing algorithms, adaptive filtering, use of artificial intelligence methods for object recognition
Management system	Decision-making, movement control	Digital signals (coordinates, speed, course)	Data transfer delays, data inaccuracies, conflicting commands	Optimisation of route planning algorithms, use of neural networks for real-time decision-making
Autosteering system	Steering wheel control	Digital signals (commands to change course)	Delays in executing commands, steering instability	Improvement of control algorithms, adaptive regulation, use of ship movement models

Source: compiled by the authors based on P. Xie et al. (2021) and I.K. Dagkinis et al. (2023)

Therefore, improving signal processing algorithms is crucial for improving the efficiency of OES and RLS.

Improved noise filtering, coordinate accuracy, and optimisation of data pooling algorithms allow creating a more

reliable and accurate threat detection system. This, in turn, increases the level of safety of ships in coastal areas and ensures timely response to potential hazards.

Making effective decisions in a dynamic combat environment requires quick access to relevant information provided by automated systems. The interfaces of these systems should be designed in such a way as to minimise the time required to analyse the situation and make a decision. Imperfect interfaces can lead to delays in decision-making and, as a result, reduce the efficiency of task execution. Therefore, the development of ergonomic interfaces is one of the priority areas in modern research in the field of human-computer interaction (Liu *et al.*, 2022).

In addition, to ensure management flexibility, operators should be able to manually interfere with the operation of automated systems. Although automated systems can operate effectively under standard operating conditions, human intervention becomes necessary in complex and unpredictable situations. For example, an operator can manually adjust the system's actions in cases where it misclassifies a threat or skips critical data. This provides an additional level of control and reliability in the decision-making process.

The effectiveness of modern ship protection systems largely depends on optimal interaction between the operator and automated threat detection systems, such as OES and RLS. Rapid exchange of information between these systems and the operator is a prerequisite for timely response to changes in the tactical situation. Automatic control systems should be integrated into the overall control system of the ship in such a way as to ensure effective performance of tasks under all conditions. This provided real-time optimised manoeuvring based on the projected mine rate, which significantly reduced the risk of a collision. The angle of change of the ship's course was calculated using the following equation (3). For example, if the distance to a mine threat was 100 metres, the ship's speed was 20 m/s, and the angle between the ship and the mine threat was 30°, then:

$$\Delta\theta = \frac{100}{20} \cdot \cos(30^\circ) = 4.33^\circ.$$

This result showed that to avoid the threat, the ship had to change course by 4.33°. This was especially important in high-risk conditions, when even minor manoeuvres could help to avoid a collision with a mine or other obstacles.

Operators must quickly analyse the situation and make informed decisions based on data coming from the OES and RLS (Höffmann *et al.*, 2021). For modern defence systems, it is important to ensure a high level of accuracy and effectiveness in detecting and neutralising threats, especially in conditions of combat operations in coastal areas. One of the key factors for improving the combat readiness of ships is the integration of OES and RLS. Data synchronisation between these systems can significantly improve the speed of threat identification and accurate detection, even in difficult weather conditions.

The introduction of automated control and autosteering systems that can quickly respond to threats minimises response time. Automation and improvement of signal processing algorithms play a key role in improving the accuracy of these systems, which, in turn, reduces the risk of damage to ships and increases their efficiency in difficult coastal conditions.

Discussion

The combined use of OES and RLS technologies has significantly improved the accuracy of determining the location of sea mines. OES uses highly sensitive cameras, including day, night and thermal imaging, which helps to visually identify mines on the water surface by temperature differences. Due to its high resolution, OES systems can identify even small objects with an accuracy of several metres, automating the image analysis process using machine vision and artificial intelligence algorithms. RLS, in turn, are capable of detecting both underwater and surface objects, providing high accuracy in determining their location with the possibility of penetration into the surface layers of water. This allows quickly tracking moving mines, significantly expanding the detection area. Integration of OES and radar provides more efficient solutions to mine detection problems. First, the radar quickly detects suspicious objects at a long distance, then the OES clarifies identification, reducing the likelihood of false positives and allowing the crew to make decisions more quickly. Automated object recognition, based on data from both systems, increases situational awareness and helps to clearly classify threats. Due to the integration of these technologies, the response time was optimised, and the overall level of safety of ships was significantly increased.

This was also investigated by M. Zhang *et al.* (2021), where the results confirmed that data processing and integration between OES and RLS is critical to improving the effectiveness of air defence. The introduction of synchronisation and collaborative data processing methods allows combining information from both systems to quickly identify threats and improve the accuracy of determining target coordinates. Data synchronisation helps to avoid delays and errors that may occur when using individual systems, and provides a faster and more accurate response to threats.

G. Wu *et al.* (2021) also showed that the integration of OES and RLS can effectively combine the advantages of both technologies. OES provides high resolution and accuracy in conditions of good visibility, which contributes to clear identification of targets. In turn, radars demonstrate high efficiency in difficult weather conditions, such as fog or night darkness, where visibility is limited. Based on this integration, a significant improvement in target detection and maintenance is achieved, which is crucial for ensuring reliable protection in difficult conditions. It is worth noting that the integration of OES and RLS combines the advantages of both technologies: OES provide high resolution with good visibility, and RS are effective in conditions

of limited visibility, such as fog or night. This significantly improves target detection and tracking.

The integration of these systems requires proper crew training and the development of intuitive interfaces for rapid information analysis. In addition, it is critical to ensure data security and stability of communication between systems, since the risks of cyber-attacks can significantly affect efficiency. Integration of OES and RLS is a strategic step in the development of the fleet's defence capability, but its implementation requires a comprehensive approach and careful analysis of possible challenges. The study showed that OES provided more detailed information about targets, which allowed reducing the load on the RLS. Thus, the crews were able to respond to threats in a timely manner, relying on visual information, which significantly improved the quality of operational management. This synergy between the two systems has significantly improved the detection of underwater objects, providing more detailed information about the situation around the ship.

The results of this study are consistent with the conclusions given in the paper by X. Wu *et al.* (2021), as improvements in algorithms for detecting small objects in coastal areas significantly improve the accuracy of threat detection, and reduce the likelihood of errors, which makes systems more efficient and efficient in responding.

The results of the study open up a broad discussion about the importance of integrating modern technologies in military operations. As threats in the marine environment become more complex, it is important to adapt control systems to new challenges. Integration of OES and RLS can significantly improve detection capabilities, but continuous improvement of data processing algorithms is necessary to achieve optimal results. The analysis of the data obtained highlights the importance of combining OES surveillance with artillery radars to improve the self-defence of ships, in particular, when searching for mines. This integration of technologies opens up new opportunities for improving the security of naval operations, requiring continuous improvement of systems to ensure their effectiveness in modern military conflicts. It is also worth noting that the results obtained confirmed the possibility of improving the efficiency of defence systems by simultaneously using OES and RLS. This integration significantly reduced the time required to respond to threats, which had a positive impact on the overall safety of ships when performing tasks in difficult conditions.

The study by H. Cui *et al.* (2021) found that improving signal processing algorithms is key to effectively integrating data with OES and RLS, as these systems use different types of information. Improved noise filtering reduces the impact of extraneous signals that can distort the results, while improving the accuracy of determining the coordinates of objects provides more accurate target detection. Optimising algorithms for combining data from both systems provides more comprehensive and reliable analysis, which is crucial for improving the overall efficiency of the system in the face of real threats.

In turn, E. Chiou & J. Lee (2023) concluded that improving interaction between operators and automated systems is a critical aspect for ensuring efficiency in complex air defence systems. It is necessary not only to automate processes, but also to ensure that operators have access to intuitive interfaces that provide quick access to the most important data from the OES and RLS. This helps to reduce delays in decision-making and increase the efficiency of responding to threats.

The results show that the simultaneous use of these technologies not only reduces the burden on the crew, but also optimises decision-making processes, which is crucial in difficult combat conditions. However, the implementation of these integration solutions requires further improvement of signal processing algorithms to ensure accuracy and reliability in detecting threats. An important aspect is also the need to provide intuitive interfaces for operators, as this will reduce delays in decision-making and increase the speed of responding to threats. Thus, success in implementing the integration of OES and RLS depends not only on technological improvements, but also on the readiness of crews to work with new systems. This comprehensive strategy can significantly improve the overall safety of ships in difficult operating conditions, highlighting the need for further research in this area.

An important aspect of the study was the need to adapt systems to the specific conditions in which they operate. The results showed that a variety of mine search scenarios required the configuration of integrated systems to meet specific environmental conditions. This highlighted the need for further research that would allow for a deeper study of the various situations in which systems can be optimised.

M. Del Giudice *et al.* (2022) also conducted a study, the results of which confirmed that interfaces should be user-friendly and clearly structured, which allows operators to quickly analyse information and make decisions based on data from systems. Operators should be able to intervene manually if necessary to adjust automated actions or respond to unforeseen situations. This approach provides a balance between automation and human control, which is critical for effective management in the face of rapidly changing threats.

S. Krile *et al.* (2021) also found that the modernisation of communication and network interaction is an important step to ensure the efficient operation of the OES, RLS, and other systems of the ship. The introduction of high-speed data channels will facilitate rapid exchange of information between these systems in real time, which is crucial for timely response to threats. In addition to speed, special attention should be paid to the security of networks to prevent cyber-attacks and unauthorised access that could disrupt the operation of systems.

The variety of scenarios that can occur when searching for mines requires a deeper understanding of environmental conditions and adaptation of systems to these conditions. It is also important to note that user-friendly and clearly structured interfaces for operators are critical, as they allow quickly analysing data and making informed

decisions. A balance between automation and human control is essential for responding to unforeseen situations, which can be key in the context of rapidly changing threats. Modernisation of communication tools and the introduction of high-speed data channels also play an important role in ensuring the efficiency of these systems, since the speed of information exchange is crucial for timely response. However, network security is critical to preventing cyber-attacks, which can significantly threaten the security of systems. Therefore, further research in this area is needed to develop optimal solutions that ensure the reliability and effectiveness of integrated defence systems.

Analysis of the results confirmed the importance of integrating OES surveillance with RLS to optimise the self-defence of ships when searching for mines. This combination of technologies opens up new opportunities for improving the safety of naval operations, requiring further development and improvement of these systems to ensure their effectiveness in war conditions.

O. Melnyk *et al.* (2022b) found that integrating upgraded communications equipment into the overall network of the ship's combat control system is also a priority. This will ensure synchronisation between the OES, RLS, and other important elements of the ship's defence, such as fire support and missile defence systems. The coordinated operation of all these systems will improve the overall defence capability and increase the effectiveness of protecting the ship in combat conditions.

It should be noted that the modernisation of communication and network interaction is a necessary condition for improving the effectiveness of ship defence systems. Fast and secure data transmission between OES and RLS can significantly reduce the time spent on information processing and decision-making, which is critically important in real combat operations. Synchronisation of all elements through a single network increases the reliability and efficiency of responding to threats, improving the overall level of protection of the ship.

In general, the results obtained confirmed the potential of integration of OES and RLS in improving the safety of naval operations and the requirements for further development of these technologies in modern combat operations.

Conclusions

The study confirmed the effectiveness of integrating OES surveillance with artillery radars to optimise the self-defence of ships when searching for mines. Synchronisation of data between these systems has improved the accuracy of

threat detection in difficult conditions, such as limited visibility or worse weather conditions. The use of OES helped to reduce the response time to potential hazards, since improving the efficiency in processing and transmitting information made it possible to minimise delays. Automation of control processes in combination with integrated automatic steering systems increases the manoeuvrability of ships, which reduces the risk of falling into mine threat zones. Improved coordination systems between various defence subsystems have increased the effectiveness of air defence in coastal zones of Ukraine. This integration allowed for more reliable self-defence of ships, reducing overall vulnerability to external threats. A comprehensive approach to modernising the ships' defence systems has shown significant potential in improving their security. Improved interaction between the radar and OES made it possible to optimise the functioning of anti-aircraft fire systems, which increased the speed and accuracy of responding to threats, thereby reducing risks for ships in high-risk areas.

Thus, the results of the study indicate a high efficiency of integrating OES surveillance with artillery radars to improve the safety of ships when performing tasks in minefields. The data obtained confirm the need for further development and improvement of technologies for integrating surveillance and defence systems to ensure more reliable protection of ships from modern threats, in particular, unmanned aerial vehicles, cruise missiles, underwater sabotage forces, and conventional air and sea attacks. In the face of growing security challenges, particularly in coastal areas, it is important to ensure synchronisation and effective interaction between OES and RLS. Such integration will help to quickly identify threats, increase the accuracy of target detection and speed of response, which are critical aspects for the successful implementation of combat missions. Systematic improvement of these technologies will contribute to strengthening the defence capabilities of naval forces and improving the level of security in areas of potential conflict.

To further improve the integration of OES surveillance with artillery RLS, it is necessary to investigate their effectiveness in real combat operations, in particular, when countering dynamic threats and sudden changes in the tactical situation.

Acknowledgements

None.

Conflict of Interest

None.

References

- [1] Ali, E.S., Hasan, M.K., Hassan, R., Saeed, R.A., Hassan, M.B., Islam, S., Nafi, N.S., & Bevinakoppa, S. (2021). Machine learning technologies for secure vehicular communication in internet of vehicles: Recent advances and applications. *Security and Communication Networks*, 2021(1), article number 8868355. doi: 10.1155/2021/8868355.
- [2] Ballan, L., Melo, J.G.O., van den Broek, S.P., Baan, J., Heslinga, F.G., Huizinga, W., Dijk, J., & Dilo, A. (2024). EO and radar fusion for fine-grained target classification with a strong few-shot learning baseline. In *Proceedings conference: Signal processing, sensor/information fusion, and target recognition XXXIII* (article number 130570K). Maryland: SPIE. doi: 10.1117/12.3013756.

- [3] Bounaceur, H., Khenchaf, A., & Le Caillec, J.M. (2022). Analysis of small sea-surface targets detection performance according to airborne radar parameters in abnormal weather environments. *Sensors*, 22(9), article number 3263. doi: [10.3390/s22093263](https://doi.org/10.3390/s22093263).
- [4] Brown, R., Carlson, C., & Halligan, M. (2021). *Next generation logistics ships: Supporting the ammunition and supply demands of distributed maritime operations*. Monterey: Naval Postgraduate School.
- [5] Chang, L., Liu, S., & Bowers, J.E. (2022). Integrated optical frequency comb technologies. *Nature Photonics*, 16(2), 95-108. doi: [10.1038/s41566-021-00945-1](https://doi.org/10.1038/s41566-021-00945-1).
- [6] Chiou, E.K., & Lee, J.D. (2023). Trusting automation: Designing for responsivity and resilience. *Human Factors*, 65(1), 137-165. doi: [10.1177/00187208211009995](https://doi.org/10.1177/00187208211009995).
- [7] Cui, H., Guan, Y., Chen, H., & Deng, W. (2021). A novel advancing signal processing method based on coupled multi-stable stochastic resonance for fault detection. *Applied Sciences*, 11(12), article number 5385. doi: [10.3390/app11125385](https://doi.org/10.3390/app11125385).
- [8] Dagkinis, I.K., Psomas, P.M., Platis, A.N., Dragović, B., & Nikitakos, N.V. (2023). Modelling of the availability for the ship integrated control system sensors. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 9, article number 100119. doi: [10.1016/j.clscn.2023.100119](https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100119).
- [9] Del Giudice, M., Di Vaio, A., Hassan, R., & Palladino, R. (2022). Digitalization and new technologies for sustainable business models at the ship-port interface: A bibliometric analysis. *Maritime Policy & Management*, 49(3), 410-446. doi: [10.1080/03088839.2021.1903600](https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1903600).
- [10] Fathi, M., Haghi Kashani, M., Jameii, S.M., & Mahdipour, E. (2022). Big data analytics in weather forecasting: A systematic review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(2), 1247-1275. doi: [10.1007/s11831-021-09616-4](https://doi.org/10.1007/s11831-021-09616-4).
- [11] Hannaford, E., & Hassel, E. V. (2021). Risks and benefits of crew reduction and/or removal with increased automation on the ship operator: A licensed deck officer's perspective. *Applied Sciences*, 11(8), article number 3569. doi: [10.3390/app11083569](https://doi.org/10.3390/app11083569).
- [12] Höffmann, M., Roy, S., Berger, A., Bergmann, W., Chan, K., Shubbak, M., Longhorst, J., Schnauder, T., Struß, O., & Büskens, C. (2021). Wind affected maneuverability of tugboat-controlled ships. *IFAC-PapersOnLine*, 54(16), 70-75. doi: [10.1016/j.ifacol.2021.10.075](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.075).
- [13] Kari, S.S., Raj, A.A., & Balasubramanian, K. (2023). Evolutionary developments of today's remote sensing radar technology – right from the telemobiloscope: A review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 12(1), 67-107. doi: [10.1109/MGRS.2023.3329928](https://doi.org/10.1109/MGRS.2023.3329928).
- [14] Krile, S., Maiorov, N., & Fetisov, V. (2021). Modernization of the infrastructure of marine passenger port based on synthesis of the structure and forecasting development. *Sustainability*, 13(7), article number 3869. doi: [10.3390/su13073869](https://doi.org/10.3390/su13073869).
- [15] Lanza, M., Sebastian, A., Lu, W.D., Le Gallo, M., Chang, M.F., Akinwande, D., Puglisi, F.M., Alshareef, H.N., Liu, M., & Roldan, J.B. (2022). Memristive technologies for data storage, computation, encryption, and radio-frequency communication. *Science*, 376(6597), article number eabj9979. doi: [10.1126/science.abj9979](https://doi.org/10.1126/science.abj9979).
- [16] Liu, J., Aydin, M., Akyuz, E., Arslan, O., Uflaz, E., Kurt, R.E., & Turan, O. (2022). Prediction of human-machine interface (HMI) operational errors for maritime autonomous surface ships (MASS). *Journal of Marine Science and Technology*, 27, 293-306. doi: [10.1007/s00773-021-00834-w](https://doi.org/10.1007/s00773-021-00834-w).
- [17] Majors, D.W., & O'Neil, R.P. (2021). *Integration of radar sensor data with situational awareness tools to respond to an unmanned aerial threat*. (Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, USA).
- [18] Mander, G., Enix, Z., & Deraoui, A. (2023). *Naval surface warfare a cost effectiveness analysis of hard-kill versus soft-kill for ship self defense*. Monterey: Naval Postgraduate School.
- [19] Mashtalir, V., Zhuk, O., Minenko, L., & Artyukh, S. (2023). Conceptual approaches to the use of wireless sensor networks by the armies of the world's leading countries. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 47(2), 96-112. doi: [10.33099/2311-7249/2023-47-2-96-112](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-47-2-96-112).
- [20] Melnyk, O., Onishchenko, O., Onyshchenko, S., Voloshyn, A., Kalinichenko, Y., Naleva, G., & Rossomakha, O. (2022a). Autonomous ships concept and mathematical models application in their steering process control. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16(3), 553-559. doi: [10.12716/1001.16.03.18](https://doi.org/10.12716/1001.16.03.18).
- [21] Melnyk, O., Onyshchenko, S., Pavlova, N., Kravchenko, O., & Borovyk, S. (2022b). Integrated ship cybersecurity management as a part of maritime safety and security system. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 22(3), 135-140. doi: [10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18](https://doi.org/10.22937/IJCSNS.2022.22.3.18).
- [22] Mercaldo, F., & Santone, A. (2021). Audio signal processing for android malware detection and family identification. *Journal of Computer Virology and Hacking Techniques*, 17(2), 139-152. doi: [10.1007/s11416-020-00376-6](https://doi.org/10.1007/s11416-020-00376-6).
- [23] Voronkov, S. (2020). What is the "Sense" of naval artillery fire control systems. Retrieved from <https://armyinform.com.ua/2020/03/31/yakyj-sens-u-systemah-keruvannya-vognem-korabelnoyi-artyleryi/>.

- [24] Wu, G., Atilla, I., Tahsin, T., Terziev, M., & Wang, L. (2021). Long-voyage route planning method based on multi-scale visibility graph for autonomous ships. *Ocean Engineering*, 219, article number 108242. doi: [10.1016/j.oceaneng.2020.108242](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108242).
- [25] Wu, X., Ding, H., Liu, N.B., & Guan, J. (2021). A method for detecting small targets in sea surface based on singular spectrum analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, article number 5110817. doi: [10.1109/TGRS.2021.3138488](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3138488).
- [26] Xie, P., Guerrero, J.M., Tan, S., Bazmohammadi, N., Vasquez, J.C., Mehrzadi, M., & Al-Turki, Y. (2021). Optimization-based power and energy management system in shipboard microgrid: A review. *IEEE Systems Journal*, 16(1), 578-590. doi: [10.1109/JSYST.2020.3047673](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3047673).
- [27] Zhang, J.A., Liu, F., Masouros, C., Heath, R.W., Feng, Z., Zheng, L., & Petropulu, A. (2021). An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 15(6), 1295-1315. doi: [10.1109/JSTSP.2021.3113120](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2021.3113120).
- [28] Zhang, M., Montewka, J., Manderbacka, T., Kujala, P., & Hirdaris, S. (2021). A big data analytics method for the evaluation of ship-ship collision risk reflecting hydrometeorological conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 213, article number 107674. doi: [10.1016/j.ress.2021.107674](https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107674).
- [29] Zhang, X., et al. (2022). Finding critical scenarios for automated driving systems: A systematic mapping study. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 49(3), 991-1026. doi: [10.1109/TSE.2022.3170122](https://doi.org/10.1109/TSE.2022.3170122).
- [30] Zhou, X.Y., Liu, Z.J., Wang, F.W., & Wu, Z.L. (2021). A system-theoretic approach to safety and security co-analysis of autonomous ships. *Ocean Engineering*, 222, article number 108569. doi: [10.1016/j.oceaneng.2021.108569](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108569).

Антон Козлов

Магістр
Національний університет «Одеська морська академія»
65052, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-1305-0558>

Валентин Стегній

Магістр
Національний університет «Одеська морська академія»
65052, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0009-0007-2009-6539>

Олександр Голик

Магістр
Національний університет «Одеська морська академія»
65052, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна
<https://orcid.org/0009-0008-4492-7410>

Інтеграція оптико-електронної системи спостереження з артилерійською радіолокаційною станцією для оптимізації самооборони кораблів при пошуку мін

Анотація. Метою дослідження було проаналізувати способи підвищення ефективності та точності взаємодії між оптико-електронними системами (ОЕС) і радіолокаційними станціями (РЛС) на кораблях для вдосконалення зенітно-вогневих систем у зонах самооборони. Були проаналізовані процеси інтеграції даних, автоматизації і оптимізації комунікації між системами на основі теоретичних моделей і практичних прикладів взаємодії корабельних систем. Дослідження показало, що інтеграція ОЕС спостереження з РЛС на кораблях значно підвищує точність виявлення цілей і ефективність зенітно-вогневих систем у зонах бойових дій. Встановлено, що синхронізація даних з ОЕС та РЛС забезпечує швидшу ідентифікацію загроз, особливо у складних погодних умовах або при обмеженій видимості. Проаналізовані алгоритми обробки даних, які значно покращують фільтрацію шумів і точність розпізнавання мін та інших загроз завдяки вдосконаленню методів аналізу сигналів і інтеграції інформації з різних сенсорних систем. Автоматизовані системи керування дозволяють мінімізувати час реакції на загрози, підвищуючи оперативність дій. Дослідження також виявило, що автоматичні рульові системи, інтегровані з навігаційними системами та системами захисту, ефективно зменшували ризик підриву на мінах завдяки маневрам, оптимізованим у реальному часі. Використані методи включали динамічне позиціонування та автоматичне коригування курсу корабля залежно від даних, отриманих від ОЕС і РЛС. Це сприяло швидкому реагуванню на загрози та підвищувало загальну безпеку кораблів у прибережних зонах. Встановлено, що удосконалення комунікаційних каналів між системами забезпечує зниження затримок у передачі даних, що сприяє оперативнішому реагуванню на загрози. Виявлено, що інтеграція автоматичних рульових систем з навігаційними системами покращує маневреність корабля і знижує ймовірність потрапляння в зони мінних загроз. Аналіз показав, що комплексний підхід до модернізації взаємодії між ОЕС та РЛС дозволяє створити більш стійку і ефективну систему оборони кораблів у прибережних зонах. Практична цінність дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для розробки та впровадження сучасних інтегрованих систем оборони кораблів, що сприяють підвищенню рівня безпеки кораблів у складних умовах.

Ключові слова: фільтрація шумів; навігація; маневреність; комунікаційні канали; безпека прибережних зон; автоматичні рульові системи

Андрій Кашканов

Доктор технічних наук, професор
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3294-6135>

Микола Москалюк*

Аспірант
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-4660-8858>

Невизначеність та її вплив на формування запасів запасних частин для забезпечення ефективності транспортних процесів

Анотація. Покращення ефективності транспортних процесів неможливе без удосконалення логістики управління запасами запасних частин. Функціонування логістичних процесів в ланцюгах постачань супроводжується значною невизначеністю та ризиками. Час, який менеджери витрачають на усунення порушень у ланцюгах постачання запасних частин через вплив невизначеності на автомобільному транспорті, становить від 20 % до 40 % загальних витрат часу на забезпечення логістичних процесів. Цей показник може бути знижений шляхом впровадження передових систем управління ланцюгами постачань, використання аналітики для прогнозування та запобігання проблемам, а також підвищення рівня співпраці з постачальниками. У статті розглянуто основні фактори формування попиту на запасні частини. Проаналізовано причини виникнення невизначеності та ризиків у ланцюгах постачань. Встановлено, що невизначеність чинників попиту на запасні частини може бути викликана рядом факторів, таких як коливання економічних умов, сезонні зміни, зміни в технології або навіть непередбачувані ситуації, як-от пандемії чи природні катастрофи. Ці фактори включають характеристики людини, технічні засоби, процеси функціонування та обслуговування, а також зовнішнє середовище. Для оптимального розподілу ресурсів для забезпечення надійності системи необхідно визначити пріоритетність впливових факторів. Оскільки багато з цих факторів є якісними та оцінюються експертно, це ускладнює застосування традиційних методів планування експерименту та регресійного аналізу, які зазвичай використовуються в статистичній теорії надійності систем «людина – машина». Аналіз джерел невизначеності в логістичних процесах ланцюгів постачань, методів їх зменшення, а також економіко-математичних методів підтримки прийняття рішень щодо структури та планування робіт у ланцюгах постачання дозволяє виділити ряд тенденцій та перспективних напрямків досліджень у цій сфері. Ці напрямки включають: необхідність формування та розвитку термінологічної бази, удосконалення методів прогнозування запасів запасних частин, розвиток стратегій управління ланцюгами постачань, мінімізацію ризиків у ланцюгах постачань та пошук балансу між ефективністю та стійкістю систем управління запасами

Ключові слова: автотранспортні засоби; експлуатаційна надійність; запасні частини; невизначеність; ефективність; транспортний процес

Suggested Citation:

Kashkanov, A., & Moskaliuk, M. (2024). Uncertainty and its impact on the formation of spare parts inventories to ensuring the efficiency of transport processes. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 74-80. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.74.

*Corresponding author



Вступ

Добре налагоджена робота транспортного сектора відіграє ключову роль в економічному та соціальному розвитку кожної країни, сприяючи зміцненню регіональної та глобальної співпраці та інтеграції. Функціонування складних економічних систем супроводжується невизначеністю поведінки як суб'єктів господарювання, так і елементів самої системи [1]. Врахування цієї невизначеності є необхідною умовою забезпечення науковості та точності опису реальних об'єктів, їхніх властивостей та поведінки у відповідних умовах.

Управління попитом на запасні частини є критично важливим для забезпечення ефективної роботи виробничих процесів на транспорті та підтримки високого рівня обслуговування споживачів транспортних послуг. Менеджери з управління запасами стикаються з викликами пошуку балансу між зменшенням загальних логістичних витрат та забезпеченням високого рівня логістичного сервісу [2, 3]. Логістика запасних частин стає ключовим компонентом управління ланцюгами поставок. За даними Dataintel Consulting [4], розмір світового ринку запасних частин у 2023 році оцінювався приблизно в 450 млрд дол. США. Прогнозується, що до 2032 року він досягне приблизно 700 млрд дол. США, зростаючи приблизно на 5,3 % на рік.

Дослідження Deloitte Research [5] показало, що післяпродажні послуги стали значним джерелом доходів для найбільших виробничих компаній світу. У 2024 році ці доходи становили в середньому 35 % від загального доходу. Цей показник свідчить про важливість післяпродажного обслуговування, яке включає технічне обслуговування, ремонт, запасні частини та інші послуги, що надаються клієнтам після придбання продукту. Це дослідження також виявило, що компанії, які інвестують у покращення післяпродажних послуг, зазвичай мають вищий рівень задоволеності клієнтів і лояльності, що сприяє зростанню їхньої ринкової частки та доходів.

Відмова обладнання, машини, технічної системи може спричинити високі витрати для компанії, тому своєчасне усунення неполадки з найменшими витратами стає першорядним завданням для багатьох компаній. У більшості випадків неполадки усуваються за рахунок заміни запчастини або за фактом виявлення несправності або як превентивний захід у процесі технічного обслуговування. Ключові особливості систем постачання запасними частинами включають [6]: глобальне охоплення та складність структури й функціонування; інтеграцію функцій і органів для ремонту несправних деталей і вузлів; значну кількість номенклатурних позицій; високі витрати на зберігання чи втрати прибутку внаслідок відсутності запасних частин (ЗЧ); важливу роль фактору взаємозамінності.

При цьому пошук компромісу між рівнем логістичного сервісу та витратами ускладнюється широкою номенклатурою ЗЧ та самою природою попиту на ЗЧ, що має стохастичний та нерівномірний характер, який не підкоряється нормальному закону розподілу.

Таким чином, для покращення процесів управління запасами ЗЧ необхідно проаналізувати факторний простір, який формує елементи невизначеності та впливає на виникнення ризиків в структурі функціонування ланцюгів постачань.

Проблеми управління запасами ЗЧ досліджували багато науковців. Зокрема, в роботі [7] автори зосередилися на розробці методів покращення функціонування служб технічного обслуговування (ТО) автотранспортних засобів (АТЗ) на основі показників вартості та якості придбаних ЗЧ з урахуванням ступеня їх впливу на безпеку експлуатації автомобілів. Метою дослідження було створення методики оцінювання ризику виникнення дорожньо-транспортних пригод, спричинених несправними ЗЧ, оскільки на той момент не існувало загальноприйнятого підходу щодо вирішення цього питання.

Новий підхід щодо визначення номенклатури комплектів запасних частин, інструментів та приладдя на основі методів теорії надійності [8] запропоновано в роботі [9]. Розроблений метод дає змогу більш точно прогнозувати число відмов елементів та необхідну кількість ЗЧ для забезпечення високої експлуатаційної надійності електронної апаратури.

Автори роботи [10] присвятили своє дослідження покращенню забезпечення ЗЧ підприємств автомобільного сервісу. Ними було проаналізовано факторний простір, в якому формується попит на ЗЧ, та розроблена методика оптимізації запасів з урахуванням ремонтних впливів та визначення оптимальних стратегій управління в умовах недостатці інформації, ризику та часткової визначеності.

У дисертаційному дослідженні [11] розроблялися заходи з підвищення ефективності експлуатації АТЗ підприємств автомобільного транспорту на основі удосконалення процесів забезпечення ЗЧ з урахуванням доступності запасних частин в регіоні, фінансових спроможностей підприємств та можливих ризиків втрати коштів.

Проблеми розвитку адитивного виробництва (АВ) запасних частин на вимогу стали предметом дослідження науковців з Фінляндії та Великобританії [12]. Це дослідження показало, що основна проблематика в АВ зосереджена на доступності матеріалів, якості, розмірах деталей, вартості, операціях попередньої та подальшої обробки. Виявлено, що подальший розвиток використання струминної обробки в'язучого матеріалу та екструзії матеріалів відкриє більше можливостей у використанні високовартісних запасних частин для таких галузей, як аерокосмічна, автомобільна, енергетична, оборонна, виробництва споживчих товарів та медичної промисловості.

В роботі [13] досліджувались питання забезпечення експлуатаційної надійності новітніх конструкцій машин, зокрема їх мехатронних систем [14, 15]. Під час роботи з цими системами потрібно приймати два

типи рішень: коли втрутитися в систему та скільки ЗЧ потрібно мати при цьому. Автори дослідження прийшли до думки, що зі збільшенням кількості компонентів у машині важливість вибору запасних частин для системи також зростає, і це призводить до тенденції проводити ТО системи якомога пізніше, перш ніж система вийде з ладу.

Дослідження [16] присвячене проблемам усунення стохастичних несправностей техніки як запасними частинами потрібного типу, так і найнятими сервісними інженерами під час післяпродажного ТО протягом гарантійного періоду на потужностях виробника. Авторами запропоновано ефективний і простий у реалізації евристичний алгоритм для отримання обґрунтованих рішень щодо покращення інтегрованого планування запасів запасних частин, гарантійного та сервісного обслуговування та підвищення прибутковості послуг.

Опубліковані роботи не повною мірою охоплюють існуюче коло практичних завдань з управління запасами з точки зору врахування різного роду невизначеності факторів формування попиту на ЗЧ: випадковий та нестаціонарний характер процесів надходження та

витрачання запасів, природне зменшення товарів, інфляція, дефіцит, одночасна дія кількох типів обмежень тощо. Облік перерахованих особливостей потребує проведення подальших досліджень.

Мета статті – оцінка впливу невизначеності під час формування запасів запасних частин для забезпечення ефективності транспортних процесів та пошук шляхів покращення процесів управління запасами ЗЧ в реальних умовах експлуатації.

Результати

Потреба в запасних частинах для служб ТО і ремонту, з метою забезпечення нормальної роботи рухомого складу та підтримання його надійності, залежить від характеристик наявної системи управління постачанням та споживанням запасних частин. Ці характеристики також впливають на організацію транспортного процесу. Досвід експлуатації АТЗ показує, що на обсяги і асортимент ЗЧ впливають показники якості парку рухомого складу, виробничої бази, персоналу, прийнятої системи технічного обслуговування і ремонту автомобілів та умови експлуатації АТЗ (Рис. 1).

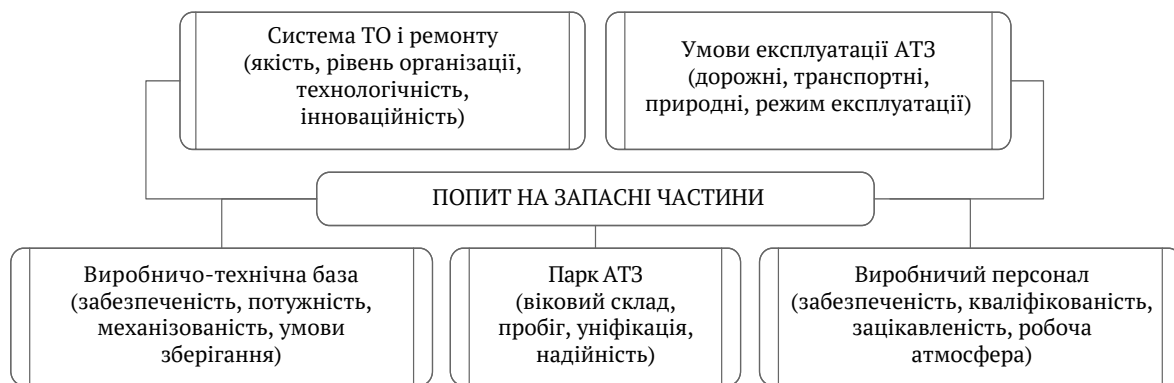


Рисунок 1. Фактори формування попиту на ЗЧ

Джерело: створено авторами

Функціонування ланцюгів постачання (ЛП) пов'язане зі значною невизначеністю та ризиком. Витрати часу менеджерів на усунення порушень у ЛП ЗЧ для автомобільного транспорту можуть сильно варіюватися залежно від компанії та її процесів. За деякими оцінками [17], менеджери можуть витратити від 20 % до 40 % свого часу на вирішення проблем, пов'язаних із ланцюгами постачань. Цей показник може бути знижений шляхом впровадження передових систем управління ЛП, використання аналітики для прогнозування та запобігання проблемам, а також підвищення рівня співпраці з постачальниками.

В загальному випадку, невизначеність означає відсутність знання про реальний стан досліджуваної системи [18]. Саме тому більшість статистичних показників є наближеними та невизначеними. У незнанні та невизначеності можна виділити три основні аспекти [1, 19]:

1. Невизначеність виникає через об'єктивну неможливість точного й однозначного розуміння системи на сучасному етапі розвитку теорії пізнання. Вона тісно пов'язана з груповими інтересами, суб'єктивними впливами та оцінками, що впливають на формування суспільних явищ.

2. Невизначеність також пов'язана з недостатнім розумінням, що зумовлене недосконалістю існуючих соціально-економічних, статистичних та математичних теорій.

3. Інформаційна невизначеність виникає через неточність і неповноту вимірювань та обчислень, а також через навмисне спотворення вихідних даних.

Невизначеність чинників попиту на запасні частини може бути викликана рядом факторів, таких як коливання економічних умов, сезонні зміни, зміни в технології або навіть непередбачувані ситуації, як-от пандемії чи природні катастрофи (Рис. 2).

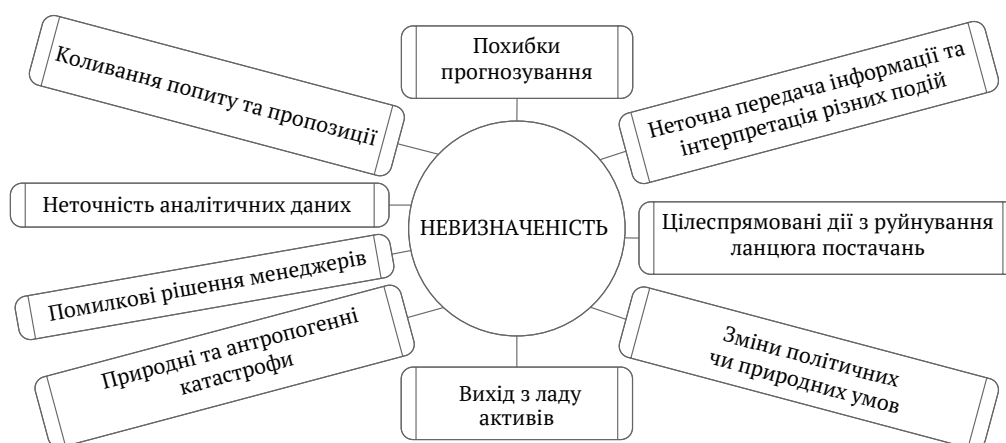


Рисунок 2. Причини невизначеності в ЛП

Джерело: створено авторами

Управління попитом на ЗЧ є критично важливим для забезпечення ефективної роботи виробничих процесів та підтримки високого рівня обслуговування клієнтів. Типовими стратегіями та методами забезпечення реалізації такого роду питань є: підвищення точності прогнозування попиту на ЗЧ на основі використання історичних даних і аналітичних інструментів [9, 20]; використання методів управління запасами, таких як система Just-in-Time або система мінімального рівня запасів, для оптимізації рівня запасів та зменшення витрат на зберігання [10]; розподіл клієнтів на сегменти за частотою замовлень або важливістю для бізнесу, що сприяє кращому розумінню та задоволенню їхніх потреб [21]; забезпечення стабільних поставок та мінімізації ризиків перебоїв за рахунок поглибленої співпраці з постачальниками; регулярний аналіз причин, через які виникають несправності або поломки, що дозволяє більш точно прогнозувати необхідність у запасних частинах [11, 16]; використання сучасних технологій, таких як системи управління складом (WMS) або інтегровані ERP-системи, для автоматизації та оптимізації процесів управління запасами [22].

Прогнозування потреби у запасах є одним із основних елементів управління запасами та слугує базою для подальшого планування їхнього рівня. Однією з найбільших складностей у цьому процесі є робота з нерегулярним попитом, що характерно для запасних частин. Існує два головних підходи до прогнозування потреби у запасах: кількісний та якісний. Комбінування цих підходів створює змішаний підхід, де результати

кількісного аналізу коригуються з урахуванням експертних оцінок [19]. Якісний підхід до прогнозування потреб у запасах базується на судженнях, інтуїції та експертних оцінках фахівців, без використання строгих математичних розрахунків, і тому має суб'єктивний характер. Натомість, кількісний підхід опирається на зібрану статистику споживання за попередні періоди або на дані про зміну фактичного попиту [1].

Розглянемо найбільш відомі методи, що застосовуються на практиці. До таких методів належать прогнозування на основі ковзного середнього значення (КСЗ) потреби у запасах та метод експоненційного згладжування (ЕЗ), які вважаються класичними. Проте ці методи є неефективними при роботі з нерегулярним або спорадичним попитом через такі причини:

- ◆ класичні методи не враховують наявності тривалих періодів нульового споживання;

- ◆ класичні методи не зважають на функції розподілу прогнозованого попиту під час виконання замовлень.

Використання неправильних методів прогнозування потреби у ЗЧ може призвести або до дефіциту, що спричиняє скасування замовлень, або до надмірного запасу, що збільшує логістичні витрати. Тому необхідно розглянути методи, що враховують ці особливості, зокрема метод Кростона (Croston's method) [23] та метод SBA (Syntetos-Boylan Approximation) [20], які мінімізують похибки прогнозування за наявності великої нерегулярності попиту. Ефективність використання методів прогнозування запасів ЗЧ у відносних значеннях їх вартості подано у Таблиці 1.

Таблиця 1. Зміна відносної вартості запасів залежно від використовуваного методу прогнозування

Період прогнозування	Методи прогнозування			
	КСЗ	ЕЗ	Croston's	SBA
Тиждень	20,1	5,67	1,1	1*
Місяць	21,14	6,37	1,38	1,23
Квартал	24,32	3,4	2,12	1,97

Примітки: *еталонне базове значення

Джерело: розроблено авторами на основі [20, 23]

Як видно з Таблиці 1, метод SBA є найбільш прийнятними для прогнозування запасів ЗЧ, оскільки дозволяє скоротити рівень запасу. Однак достатня ефективність його використання досягається за наявності точної кількісної інформації, на основі якої здійснюється прогнозування.

Надійність та безпека системи типу «людина – машина», яка використовується для управління запасами ЗЧ з метою підвищення ефективності транспортних процесів, залежить від численних факторів, що взаємодіють один з одним. Ці фактори включають характеристики людини, технічні засоби, процеси функціонування та обслуговування, а також зовнішнє середовище. Для оптимального розподілу ресурсів для забезпечення надійності системи необхідно визначити пріоритетність впливових факторів. Оскільки багато з цих факторів є якісними та оцінюються експертно, це ускладнює застосування традиційних методів планування експерименту та регресійного аналізу, які зазвичай використовуються в статистичній теорії надійності систем «людина – машина» [24].

Процес прийняття рішень при формуванні запасів ЗЧ слід розглядати як стохастичний та нечіткий процес, який потребує застосування синтезу детермінованих, імовірнісних, регресійних та нейро-нечітких моделей для врахування факторів, що впливають на зменшення невизначеності при прийнятті рішень. При цьому, мірою

неповноти інформації може бути ентропійний показник невизначеності, оскільки він є достатньо загальним як для експертних, так і для статистичних оцінок [1, 19].

Висновки

Покращення ефективності забезпечення транспортних процесів неможливе без удосконалення логістики управління запасами ЗЧ. Функціонування ЛП пов'язане зі значною невизначеністю та ризиком. Витрати часу менеджерів на усунення порушень у ЛП ЗЧ внаслідок впливу невизначеності для автомобільного транспорту складають від 20 % до 40 % від загальних потреб на забезпечення процесів функціонування ЛП. Цей показник може бути знижений шляхом впровадження передових систем управління ЛП, використання аналітики для прогнозування та запобігання проблемам, а також підвищення рівня співпраці з постачальниками.

Аналіз джерел невизначеності у ЛП, методів їх зменшення, а також економіко-математичних методів підтримки прийняття рішень стосовно структури і планування робіт у ЛП дає змогу виокремити низку тенденцій та перспективних напрямів досліджень у цій галузі: необхідність формування та розвитку термінологічної бази, удосконалення методів прогнозування запасів ЗЧ, розвитку стратегій керування ЛП, мінімізації ризиків в ЛП, пошуку балансу ефективності та стійкості систем управління запасами.

Список використаної літератури

- [1] Snytiuk, V.E. (2008). *Forecasting. Models. Methods. Algorithms*. Kyiv: Maklout.
- [2] Kashkanov, A.A., Buriak, V.V., & Moskaliuk, M.L. (2023). Aspects of logistic support of production processes of road transport enterprises of Ukraine. In *Materials of the XVI international scientific and practical conference "Modern technologies and prospects for the development of road transport"* (pp. 154-156). Vinnytsia: VNTU.
- [3] Kashkanov, V.A., Kashkanov, A.A., & Varchuk, V.V. (2017). *Organization of road transport*. Vinnytsia: VNTU.
- [4] Sharma R. (2023). *Auto spare parts market research report 2032*. Retrieved from <https://dataintel.com/report/global-auto-spare-parts-market?form=MG0AV3>.
- [5] Industries & Markets. (n.d.). Retrieved from <https://www.statista.com/studies-and-reports/industries-and-markets>.
- [6] Kashkanov, A., & Moskaliuk, M. (2024). Methods of justification of spare parts stocks in the transport process management system. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(1), 68-74. doi: 10.31649/2413-4503-2024-19-1-68-74.
- [7] Bondarenko, E., Dryuchin, D., Goncharov, A., Bulatov, S., & Feklin, E. (2023). Improving the efficiency of vehicle operation by defining the organizational and methodological parameters of the spare parts incoming inspection system. In A. Guda (Ed.) *Networked control systems for connected and automated vehicles. NN 2022. Lecture notes in networks and systems* (Vol. 509, pp. 1083-1089). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-031-11058-0_110.
- [8] Kashkanov, A.A., & Bilichenko, V.V. (2004). *Operation and maintenance of transport machines*. Vinnytsia: VNTU.
- [9] Strelnikov, V.P., & Strelnikov, P.V. (2022). Defining the nomenclature of the spare parts sets and calculating the number of single sets of spare parts. *Mathematical Machines and Systems*, 2, 83-90. doi: 10.34121/1028-9763-2022-2-83-90.
- [10] Subochev, O.I., Zavaliy, T.A., & Pogorelov, M.G. (2019). Improving the provision of spare parts for service enterprises. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, 1(32), 58-67. doi: 10.32515/2664-262X.2019.1(32).58-67.
- [11] Antoniuk, O.P. (2021). *Improving the process of providing spare parts for rolling stock of a motor transport enterprise*. (Doctoral dissertation, Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine).
- [12] Mika, S., & Pei, E. (2023). Additive manufacturing processes and materials for spare parts. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37, 5979-5990. doi: 10.1007/s12206-023-1034-0.
- [13] Kaya, B., Karabağ, O., & Fadiloğlu, M.M. (2024). Maintenance decision and spare part selection for multi-component system. In: N.M. Durakbasa & M.G. Gençyılmaz (Eds.) *Industrial engineering in the Industry 4.0 era*. (pp. 443-453). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-031-53991-6_34.

- [14] Kashkanov, V.A., Kashkanov, A.A., & Kuzhel, V.P. (2020). *Information systems and technologies in road transport*. Vinnytsia: VNTU.
- [15] Burennikov, Yu.A., Kashkanov, A.A., & Rebedailo, V.M. (2009). *Rolling stock of road transport: workflow processes and calculation elements*. Vinnytsia: VNTU.
- [16] Wang, Q., Liu, C., Zheng, M., Wang, D., & Pan, E. (2024). Integrated planning of multiple spare parts inventory, warranty, and service engineers for a service-oriented manufacturer. In *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 22, 788-801. doi: [10.1109/TASE.2024.3354422](https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3354422).
- [17] Raaymann, S., & Spinler, S. (2024). Measuring supply chain resilience along the automotive value chain – a comparative research on literature and industry. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 192, article number 103792. doi: [10.1016/j.tre.2024.103792](https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103792).
- [18] Kashkanov, A.A. (2020). Methodology for assessing and reducing uncertainty in the tasks of automotive technical examination of road accidents. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 1(11), 71-78. doi: [10.31649/2413-4503-2020-11-1-71-78](https://doi.org/10.31649/2413-4503-2020-11-1-71-78).
- [19] Rotshtein, A., & Rakytianska, H. (2012). *Fuzzy evidence in identification, forecasting and diagnosis*. Berlin: Springer. doi: [10.1007/978-3-642-25786-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25786-5).
- [20] Boylan, J., & Syntetos, A. (2021). *Intermittent demand forecasting: Context, methods and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons. doi: [10.1002/9781119135289](https://doi.org/10.1002/9781119135289).
- [21] Bacchetti, A., & Sacconi, N. (2012). Spare parts classification and demand forecasting for stock control: Investigating the gap between research and practice. *Omega*, 40(6), 722-737. doi: [10.1016/j.omega.2011.06.008](https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.06.008).
- [22] Woźniakowski, T., Jałowiecki, P., & Zmarzłowski, K. (2018). ERP systems and warehouse management by WMS. *Information System in Management*, 7(2), 141-151. doi: [10.22630/ISIM.2018.7.2.6](https://doi.org/10.22630/ISIM.2018.7.2.6).
- [23] Eaves, A.H.C., & Kingsman, B.G. (2004). *Forecasting for the ordering and stock-holding of spare parts*. *The Journal of the Operational Research Society*, 55(4), 431-437.
- [24] Rotshtein, A., Katielnikov, D., & Kashkanov, A. (2019). A fuzzy cognitive approach to ranking of factors affecting the reliability of man-machine systems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55, 958-966. doi: [10.1007/s10559-019-00206-8](https://doi.org/10.1007/s10559-019-00206-8).

Andrii Kashkanov

Doctor of Technical Sciences, Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3294-6135>

Mykola Moskaliuk

Postgraduate Student
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-4660-8858>

Uncertainty and its impact on the formation of spare parts inventories to ensuring the efficiency of transport processes

Abstract. Improving the efficiency of transport processes is impossible without improving the logistics of managing spare parts inventories. The functioning of logistics processes in supply chains is accompanied by significant uncertainty and risks. The time that managers spend on eliminating disruptions in the supply chains of spare parts due to the impact of uncertainty on road transport is from 20% to 40% of the total time spent on ensuring logistics processes. This indicator can be reduced by implementing advanced supply chain management systems, using analytics to predict and prevent problems, as well as increasing the level of cooperation with suppliers. The article examines the main factors shaping the demand for spare parts. The causes of uncertainty and risks in supply chains are analysed. It is established that the uncertainty of demand factors for spare parts can be caused by a number of factors, such as fluctuations in economic conditions, seasonal changes, changes in technology, or even unforeseen situations, such as pandemics or natural disasters. These factors include human characteristics, technical means, operation and maintenance processes, and the external environment. For optimal resource allocation to ensure system reliability, it is necessary to prioritize influencing factors. Since many of these factors are qualitative and are assessed by experts, this complicates the application of traditional methods of experimental design and regression analysis, which are usually used in the statistical theory of reliability of “human-machine” systems. Analysis of sources of uncertainty in logistics processes of supply chains, methods for their reduction, as well as economic and mathematical methods for supporting decision-making regarding the structure and planning of work in supply chains allows us to identify a number of trends and promising areas of research in this area. These areas include: the need to form and develop a terminology base, improve methods for forecasting spare parts inventories, develop supply chain management strategies, minimize risks in supply chains, and find a balance between the efficiency and sustainability of inventory management systems

Keywords: vehicles; operational reliability; spare parts; uncertainty; efficiency; transport process

Danyil Klokta*

Master

National Aviation University

03058, 1 Liubomyr Huzar Ave., Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0008-8089-7116>

Aeronautical impact on the process of cleaning runways from contamination

Abstract. The study is aimed at analysing aeronautical methods of runway cleaning from contamination to improve the efficiency of maintenance and safety of aviation operations. The study used aerodynamic analyses, data on high-speed airflow technologies, chemicals, and automatic control systems and sensors to comprehensively assess the effectiveness of runway de-icing. The results of the study showed that the use of aeronautical methods of runway cleaning significantly increases the efficiency of removing contaminants such as snow, ice, and dust particles. It was found that directed high-speed airflows effectively reduce cleaning time compared to traditional mechanical methods, reducing the risk of damage to the runway surface. In addition, the integration of these methods with automatic control systems and sensors can improve cleaning safety and reduce the negative impact on the environment. The combined use of aeronautical technologies with chemicals was also found to be effective, making these approaches promising for use at airports with high flight intensity. The study confirmed the feasibility of introducing such technologies to ensure the safety and economic efficiency of aviation operations. The analysis also showed that the use of aeronautical methods reduces the need for frequent re-cleaning of runways, which helps to reduce operating costs. In addition, the use of these technologies helps to reduce the amount of deposits on the runway surface, which has a positive impact on the durability of the pavement. The research introduces a new approach to runway cleaning, showing how aeronautical methods can improve the efficiency, safety, and cost-effectiveness of aviation operations, opening up prospects for further innovation in this area

Keywords: high-speed air flows; automatic control; chemicals; coating damage; environmental impact

Introduction

The impact of aerodynamic processes on runway de-icing is extremely important for modern aviation infrastructure, as it directly affects flight safety and economic efficiency. Contaminants such as snow, ice, dust and various chemicals can significantly degrade runway surfaces, increasing the risk of accidents and delays in aviation operations. Traditional cleaning methods, such as mechanical brushes or chemicals, are often insufficient to effectively address this problem, creating a need for new technological solutions. Aeronautical methods, which use high-speed airflows and integrated automatic control systems, offer new opportunities to improve runway cleaning. These technologies not only remove contaminants more efficiently, but also

reduce the time required for cleaning, which helps to reduce operating costs. Further exploration of aeronautical techniques is relevant to improve overall flight safety and optimize costs at high-traffic airports. The introduction of such technologies can significantly improve operational efficiency and environmental safety in airport operations.

The problem of effective runway de-icing is a relevant issue for aviation infrastructure due to its impact on flight safety and operating costs. In this context, several authors have already studied various aspects of this topic. The study by B. Kim *et al.* (2023) showed that the effectiveness of high-speed airflows in clearing snow and ice is not limited to clearing carts, but can also be applied

Suggested Citation:

Klokta, D. (2024). Aeronautical impact on the process of cleaning runways from contamination. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 81-91. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.81.

*Corresponding author



to runways. Z. Li *et al.* (2024) investigated how the integration of aeronautical technologies with automatic control systems and sensors, as well as with laser cleaning, can significantly improve the accuracy and safety of the cleaning process by ensuring effective detection and removal of contaminants. In the work of Q. Zhang *et al.* (2022), the authors noted the positive impact of combining aeronautical methods with chemicals to reduce contamination and increase the durability of runway surfaces.

Y. Lai *et al.* (2022) investigated the impact of aeronautical technologies on reducing negative environmental impacts and environmental risks. F. Maltinti *et al.* (2024) showed that the use of high-speed airflows reduces the number of repeated clearing operations, which, together with the introduction of fast departure taxiways, optimizes runway capacity and sustainability. K. Ottogalli *et al.* (2021) found that automating the clearing process using aeronautical techniques can significantly reduce human error and improve overall efficiency. Y. Xiang *et al.* (2021) analysed the economic feasibility of introducing new runway cleaning technologies, confirming their high cost-effectiveness. F. Farivar *et al.* (2021) investigated the durability of runway surfacing using aeronautical methods and found their positive impact on reducing surface erosion.

G. Zhao *et al.* (2024) compared traditional mechanical cleaning methods with new aerial technologies, pointing out the advantages of the latter in terms of speed and efficiency. R. Shrestha *et al.* (2021) showed that unmanned aerial vehicles can effectively detect contamination on runways, reducing the risk of accidents and delays. Despite the significant advances in this research, there are gaps that need to be further explored. In particular, the long-term effects of new technologies on runways, their cost-effectiveness in different climates, and their interaction with other cleaning methods need to be investigated.

The aim of the study was to investigate the effectiveness of aeronautical methods of runway cleaning from contaminants in order to improve flight safety and reduce operating costs. Research objectives:

1. Evaluating the effectiveness of aeronautical methods in the process of clearing runways of contaminants such as snow, ice, and dust particles.
2. Analysing the possibility of reducing the cleaning time and reducing the risk of damage to the lane coating when using high-speed air flows compared to traditional mechanical methods.
3. Exploring the integration of aeronautical methods with automatic control systems and sensors to improve safety, reduce negative environmental impact and lower operating costs.

Materials and Methods

The study used several key methods to comprehensively assess the effectiveness of runway de-icing. The aerodynamic analyses included the creation of computer models to simulate the aerodynamic forces encountered during aircraft take-off and landing, which allowed us to

investigate how different types of aircraft and their speeds affect the distribution of light pollutants such as dust and fine debris on the runway. In addition, aerodynamic forces were measured using anemometers and airspeed sensors to collect data on the actual airflows generated by the aircraft and their impact on runway cleaning.

High-speed airflow technologies were analysed by evaluating the efficiency and performance of the turbine and fan systems used to generate these airflows. Different configurations and capacities of these systems were tested to optimise their ability to remove contaminants. The cleaning results achieved with high-speed airflows were compared to those achieved with traditional mechanical methods such as scrapers and brushes. The runways were cleaned using mechanical and chemical methods. Runway cleaning systems, such as the Schmidtsdrift Sweeper from Schmidt (Germany), have been investigated for their effective removal of contaminants using powerful fans and airflow controllers to ensure high performance without damaging the pavement (South Cambs District..., 2024). For mechanical cleaning, the Buffalo Turbine (n.d.) from Buffalo Turbine (USA) with rotary brushes and powerful air flows was used, as well as the Vammas T600 (n.d.) from Fortbrand Services (Finland), which combines mechanical brushes with air systems for effective contaminant removal.

The selection and testing of chemicals for melting ice and snow was also part of the study. Various chemicals were evaluated at different temperature conditions, including salts and antifreeze, to determine their effect on lane clearance. Methods of combining chemicals with high-speed air flows to achieve even distribution and faster evaporation of the chemicals were analysed. The chemicals used included Calcium Magnesium Acetate (CMA) from Cryotech Deicing Technology (USA) for melting ice and snow (Yang *et al.*, 2022), Potassium Acetate from Nachurs Alpine Solutions (USA) to melt ice at low temperatures (Sajid *et al.*, 2021), and Sand & Salt Mixture from Cargill (USA) to improve traction in winter conditions (Pérez-Fortes *et al.*, 2022).

The effectiveness of the integration of automatic runway management systems and sensors for monitoring conditions and pollution levels was assessed by analysing the quality of their interaction, including the use of sensor systems to collect real-time data on weather conditions, pollution levels and runway conditions. It was analysed how automatic control systems, by processing sensor data using real-time methods and adaptive control algorithms, could adapt the cleaning process to changing conditions, ensuring a timely and effective response to pollution. Algorithms were developed to optimize cleaning and reduce lane maintenance costs using machine learning and optimization models. These methods provided a comprehensive assessment of the effectiveness of modern runway cleaning technologies, allowing us to find optimal solutions to improve safety and reduce airport maintenance costs.

One of the main elements of the study was to examine the impact of different aircraft models on runway

conditions, in particular their impact on surface cleaning and contamination. The impact of both large aircraft, such as the Boeing 747 (USA), and medium-haul models, such as the Airbus A320 (France/Germany), were analysed. Particular attention was paid to the latest technological solutions introduced by the Boeing 787 Dreamliner (USA), as well as light aircraft such as the Cessna 172 (USA). The aim of this analysis was to assess the specific characteristics of each aircraft model and their impact on runway pollution, including rubber residues, pavement wear and cleaning requirements. This allowed us to identify the most effective strategies for maintaining runway pavement quality by adapting cleaning methods according to the type of aircraft and its impact on the runway surface, which contributed to the efficiency and safety of airport operations.

Results

Different aircraft models have different weight characteristics and landing gear types that affect the load distribution on runways. In particular, heavy aircraft with a large landing weight can cause significant deformation and damage to the runway pavement, which reduces its durability and safety. In addition, different types of landing gear may have different cushioning mechanisms, which also affects the degree of wear on the surface during landing and take-off.

The Boeing 747, also known as the “Jumbo Jet”, is one of the largest commercial aircraft in the world. The Boeing 747 has a significant weight, which, depending on the model, can range from approximately 180 to 220 tonnes when empty (Fig. 1). This places a high load on the runway during landing. Heavy aircraft, such as the Boeing 747, can leave deep rubber marks that are difficult to remove. The heavy weight of the aircraft during landing and take-off can cause the top layer of the runway surface to break down, resulting in more frequent replacement or repair. During braking, significant rubber marks are formed on the runway surface, which contributes to wear and tear on the pavement and requires frequent maintenance and repair.

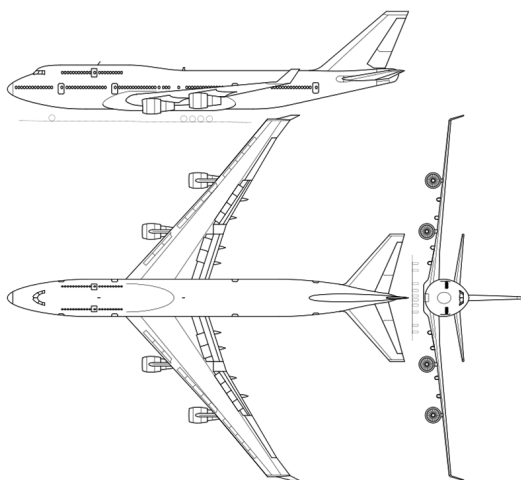


Figure 1. Diagram of the Boeing 747 aircraft

Source: Boeing 747-8 (n.d.)

The Boeing 747 landing gear consists of four main landing gear located under the wings and body of the aircraft, and one front landing gear. The main landing gear is fitted with multiple wheels (typically 4 wheels per landing gear) to distribute the weight of the aircraft evenly on the runway. This weight distribution is critical to prevent excessive stress on certain areas of the runway. The runways on which the Boeing 747 landing gear is designed must be long (typically 3 to 4 km) and constructed of high-quality materials, such as reinforced concrete or special asphalt pavements, which are able to withstand heavy loads and are resistant to wear and tear and large amounts of rubber footprints.

The Airbus A320 is a popular medium-haul aircraft (Fig. 2). It weighs around 70 to 80 tonnes when empty. Compared to larger aircraft, the load on the runway during its landing and take-off is significantly lower, so it causes less wear and tear and leaves less rubber on the pavement. Although the high frequency of flights can cause dust and fine particles to accumulate, less intensive cleaning is required than for larger aircraft.

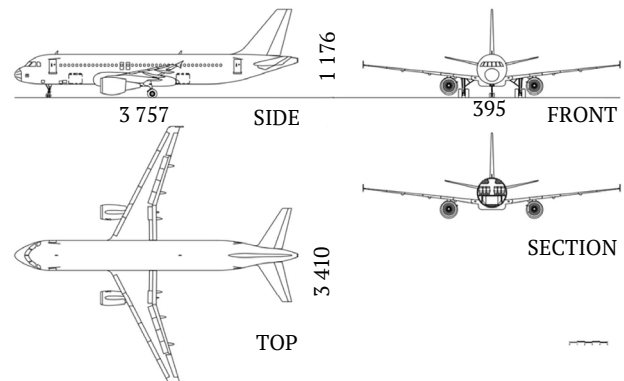


Figure 2. Schematic of the Airbus A320 aircraft

Source: Airbus A320 (n.d.)

The Airbus A320 landing gear comprises two main components: the front (dual) and main (two-wheel) landing gear. The main landing gear consists of two pairs of wheels, each of which is mounted on a suspension to provide reliable support during landing and take-off. The wheels of the main landing gear are designed for use on runways from 2,500 to 3,000 m long and can withstand various types of surfaces, including concrete and asphalt strips. An important feature is also the shock absorption, which softens impacts and reduces wear and tear on the runway surface, ensuring safety and comfort during landing and take-off.

The Boeing 787 Dreamliner is the latest aircraft equipped with lightweight materials and modern technologies that reduce runway impact (Fig. 3). Its empty weight is around 130 to 150 tonnes. The landing gear of this aircraft is designed for runways with a minimum length of 2,400 m and can be used on various types of surfaces, including asphalt and concrete. Advanced braking systems and specialized tyres ensure less wear and tear on the pavement and less rubber remaining on the runway. This, in turn, reduces

the level of contamination of the lane and reduces the need for frequent cleaning.

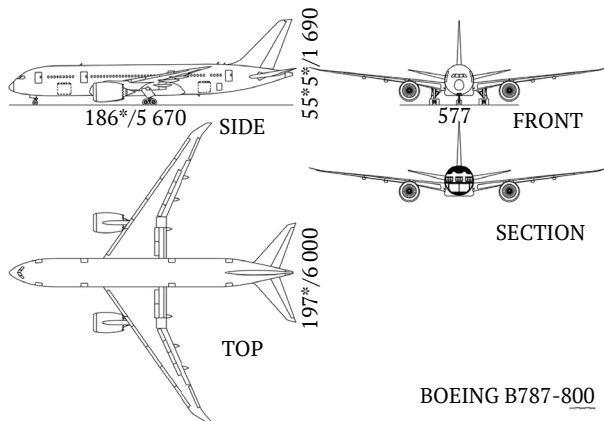


Figure 3. Schematic of the Boeing 787 Dreamliner aircraft
Source: Boeing 787 Dreamliner (n.d.)

The Cessna 172 is a lightweight aircraft often used for training and private flights. Its empty weight is around 1,200 to 1,300 kg (Fig. 4). This aircraft has a lower impact on runways due to its lightness and lower load, which does not cause significant wear and tear or runway contamination, but frequent use can contribute to the accumulation of light contaminants (dust).

The Cessna 172 landing gear is equipped with standard pneumatic wheels with shock absorption systems designed for medium runways (approximately 800 to 1,500 m). It is suitable for various types of surfaces, including asphalt and concrete runways, as well as non-asphalt surfaces such as dirt or grass runways. The pneumatic wheels provide good cushioning and reduce surface impact, but regular use on unpaved or uneven surfaces can lead to dust and fine particles accumulating, requiring periodic runway cleaning.

Different aircraft models have a significant impact on runway conditions, ranging from heavy wear and tear from

heavy aircraft to less pollution from light aircraft. This study shows that each aircraft type requires a different approach to runway cleaning and maintenance management. Knowing these impacts allows for the development of effective strategies to keep runways in excellent condition and ensure flight safety. Table 1 shows the impact of different aircraft on runways depending on their weight and landing gear type.

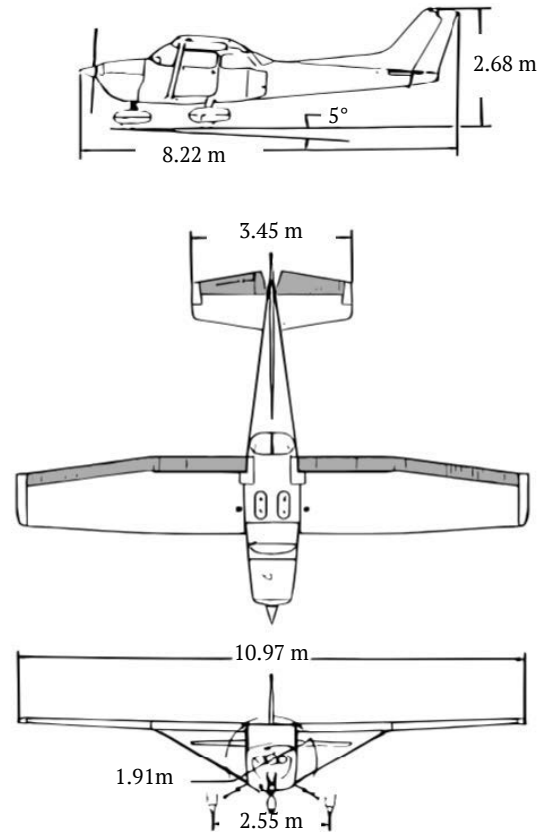


Figure 4. Schematic of the Cessna 172 aircraft
Source: Cessna 172 (n.d.)

Table 1. Impact of different aircraft on runways

Aircraft	Maximum take-off weight (kg)	Chassis type	Strip length (min.)	Type of coating	Impact on the coating
Boeing 747	400,000	Pneumatic wheels	3,000	Asphalt, concrete	High pressure, significant coating wear
Airbus A320	77,000	Pneumatic wheels	2,500	Asphalt, concrete	Medium pressure, moderate coating wear
Boeing 787 Dreamliner	250,000	Pneumatic wheels	2,500	Asphalt, concrete	Moderate pressure, medium coating wear
Cessna 172	1,100	Pneumatic wheels	800	Asphalt, concrete, soil	Low pressure, low coating wear

Source: compiled by the author based on data from E. Toraldo *et al.* (2023)

The aerodynamic properties of the airflow generated by an aircraft during its movement have a significant impact on the condition of runways (Frant *et al.*, 2024). During acceleration and take-off, an aircraft creates a powerful air jet that can interact with the runway surface. This natural airflow can ultimately help remove light contaminants, such as dust or small particles of debris, that are present on the surface.

When an aircraft is travelling on the runway, the airflow generated by its speed is quite strong. This can lead to the separation and lifting of fine particles, which are then blown to the side or lifted into the air. In this way, light contaminants can be partially removed due to the natural aerodynamic effect.

However, this cleaning method has significant limitations. First and foremost, the impact of the airflow is not

sufficient to remove more serious contaminants such as ice or snow. These types of contaminants, especially in large quantities, are heavy and cannot be effectively removed by the simple action of airflow. Ice, for example, has a high density and strength, which makes it resistant to wind effects. Snow, in turn, can stick to the surface of the runway and turn into a crust, making it even more difficult to remove.

Therefore, additional measures are required to ensure flight safety and maintain optimal runway conditions. Depending on the type and extent of contamination, different cleaning methods can be used, such as mechanical, chemical or combined approaches. For example, to remove ice and snow, specialized machines with heated or mechanical means are often used to effectively cope with such conditions. Two models are worth highlighting among these machines: Buffalo Turbine and Vammas T600.

The Buffalo Turbine, developed in the USA, is one of the most effective snow and ice removal machines thanks to its innovative approach (Fig. 5). The main advantage of this machine is the use of powerful rotating brushes, which, together with powerful airflows, allow for fast and efficient removal of fine particles and dirt from runways. The brushes rotate at high speeds, which helps to distribute the airflow in such a way as to blow snow and ice off the runway surface, reducing the need for subsequent mechanical treatment. This is particularly important in high snowfall conditions, where traditional cleaning methods may be less effective.

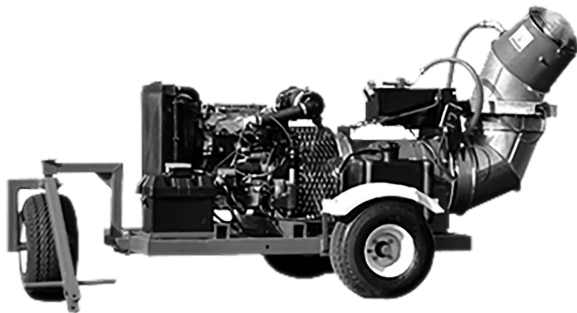


Figure 5. Buffalo Turbine

Source: Buffalo Turbine (n.d.)

In contrast to the Buffalo Turbine, the Vammas T600, manufactured in Finland, provides a more comprehensive approach to runway clearing (Fig. 6). This machine combines mechanical and airborne methods, allowing it to effectively deal with both light snow and heavy frozen ice formations. It is equipped with rotary brushes that mechanically remove snow and ice, as well as powerful fans that provide additional cleaning efficiency by using airflow. This combined approach makes the Vammas T600 a versatile cleaning tool that can adapt to different weather conditions and levels of dirt.

Both of these machines demonstrate how innovative technology can be used to improve the efficiency of the runway cleaning process. The Buffalo Turbine with its airflow orientation and the Vammas T600 with its combined

mechanical and airborne approach are currently the best-specialized tools for ensuring good runway surface quality at airports. This underlines the importance of continuous investment in the latest technology to maintain high standards of safety and efficiency in aviation infrastructure.



Figure 6. Vammas T600

Source: Vammas T600 (n.d.)

Chemical cleaning methods involve the use of specialized reagents that help to effectively combat ice formation and ensure that the surface of the strips is properly rough. One of the most commonly used reagents is CMA. CMA is effective in melting ice and snow due to its chemical composition, which contains calcium and magnesium and reacts with water. This reaction lowers the freezing point of water, which allows CMA to melt ice and snow at low temperatures. CMA has an advantage over traditional salt and calcium because it is less aggressive to surfaces and the environment. It reduces corrosion and minimizes the environmental impact, making it a popular choice for airport runway deicing.

Potassium Acetate is another effective deicing agent used to melt ice at low temperatures. Potassium Acetate has the ability to remain active and effective at very low temperatures due to the presence of potassium, making it particularly useful in harsh winters. It dissolves ice quickly, allowing for faster and safer runway clearance.

To improve runway surface roughness in winter conditions, a "Sand & Salt Mixture" is used, where the main active chemical element is sodium, which provides increased traction and prevents ice formation. This mixture provides improved traction between aircraft wheels and the runway surface, reducing the risk of skidding and ensuring a more stable and safe landing. The sand and salt mixture not only improves traction, but also helps to melt ice, providing additional safety for aviation operations.

The use of chemicals is an essential part of the winter runway management system. Specialized reagents such as CMA and Potassium Acetate, together with a mixture of sand and salt, provide effective ice and snow removal, and improve runway roughness and safety. Their use contributes to the safe operation of airports in winter and helps maintain high aviation safety standards.

Therefore, while the aerodynamic properties of airflow can be useful for removing light contaminants from

runway surfaces, their impact is limited and insufficient to address all contamination issues. It is important to integrate additional technological measures to ensure a high level of runway cleanliness and safety, especially in conditions of significant contamination, which is critical to the safety of aviation operations.

In runway cleaning technologies, high-speed airflows play a critical role in ensuring that contaminants are removed efficiently without damaging the runway surface (Vidal *et al.*, 2023). The use of powerful turbines or fans to create concentrated jets of air can remove fine dust particles, sand, and other light contaminants that can accumulate on the surface.

This cleaning method is particularly useful when traditional mechanical methods may not be sufficient or may cause damage to the pavement. Directional airflows provide an effective way to remove contaminants without physical contact, helping to maintain runway integrity.

Runway cleaning systems use large fans on specialized vehicles to ensure high performance (Alabi *et al.*, 2021). One example of such a vehicle is the Schmidtsdrift Sweeper, which is equipped with powerful fan systems and has various nozzles and controls to precisely control the direction and speed of the airflow (Fig. 7).

This vehicle allows for the effective removal of contaminants without chemical or mechanical methods that can damage the pavement. An important advantage is its ability to reduce the risk of damage to runway pavement, as the airflow does not come into direct contact with the surface.

This helps to avoid wear and tear on materials, which is critical for the long-term operation of airports. Therefore, airflow-based technologies like the Schmidtsdrift Sweeper are the ideal choice for regular maintenance, keeping the surface clean and safe without compromising its integrity.

At airports, maintaining runways in excellent condition is critical to the safety of aviation operations (Cunha *et al.*, 2021). One effective approach to cleaning such surfaces is to integrate an aeronautical approach with chemicals. This method combines the advantages of both physical and chemical processes to achieve optimal results in removing ice and snow from runway surfaces (Table 2).



Figure 7. Schmidtsdrift Sweeper

Source: South Cambs District Council: Electric operation reduces driver fatigue! (2024)

Table 2. Evaluation of the effectiveness of aeronautical methods in the process of runway cleaning from contamination

Type of pollution	Cleaning method	Air flow (m ³ /s)	Deleted (d/m ²)
Snow	Aeronautical method	60	8.0
Ice		60	7.5
Dust particles		60	9.0

Source: compiled by the author based on data from M.V. Corraza and P. Di Mascio (2024)

Chemicals used to melt ice or snow play a key role in this process. Some of the most common runway deicing reagents include salts, such as sodium chloride (salt) or calcium chloride, as well as specialized mixtures, such as potassium acetate or urotropin-based mixtures, which are designed to melt frozen layers more quickly and effectively (Muldma *et al.*, n.d.). Once applied to the surface, the reagents begin to interact with the ice cover, lowering the freezing point of the water and accelerating the melting process.

However, the efficiency of using chemicals is significantly increased by using an aerial approach. This approach involves the use of airflows to evenly distribute chemicals over the entire runway surface. High-speed air flows created by powerful fans or turbines ensure an even distribution of chemicals, which contributes to more efficient melting of ice and snow and prevents the formation of undesirable irregularities or irregularities on the surface.

An additional advantage of using airflow is that it accelerates the evaporation of chemical residue after treatment. Once the chemical has melted the ice or snow, the residue must be removed quickly to ensure that it does not interfere with the continued operation of the runway. Promoting the evaporation of the residue with air currents helps to prepare the surface for subsequent aviation operations more quickly and reduces the risk of possible negative effects from the chemicals used, such as corrosion or environmental pollution. Thus, the combination of chemicals and an aeronautical approach can achieve significant benefits in the runway deicing process. This approach not only ensures effective removal of ice and snow, but also improves safety on runways, keeping them in excellent condition for the smooth operation of airports. The integration of these technologies demonstrates an innovative approach to managing winter conditions at airfields and opens up new opportunities to improve the efficiency and safety of aviation operations.

Runway deicing is an important aspect of ensuring the safety of aviation operations, especially in winter weather conditions (Table 3). Technologies that use powerful air currents to remove ice and snow are becoming

increasingly popular due to their efficiency and speed. However, despite the many advantages of such techniques, their intensive use can lead to serious problems, such as runway surface erosion.

Table 3. Analysis of the possibility of reducing the cleaning time and reducing the risk of damage to the lane surface

Cleaning method	Cleaning time (min)	Risk of coating damage (%)	Time savings (%)
High-speed flows	25	5	40
Traditional mechanical methods	45	10	-

Source: compiled by the author based on data from Y. Wu *et al.* (2022)

Surface erosion occurs when the powerful air jets used for cleaning cause particles of runway pavement material to fly into the atmosphere (Jamieson and White, 2021). This process can gradually reduce the thickness and structure of the pavement, which in turn can affect its performance. Increased roughness or reduced surface strength can reduce the grip coefficient of aircraft tyres on the pavement, which can compromise flight safety.

One of the main risks of erosion is that the runway surface can become more vulnerable to further damage, such as cracks or wear, which can occur over time. This damage can affect the quality of the surface and its ability to withstand heavy loads, which is critical to the safety of aircraft during take-off and landing. Additionally, erosion can result in frequent repairs or replacement of the pavement, which can increase the cost of airfield maintenance.

To avoid such negative consequences, it is crucial to be careful when using air jet cleaning methods. The strength and angle of the air jet must be precisely controlled, which should be within 10-30 degrees of the surface to minimize the risk of damage to the coating. For example, this may

involve the use of specialized equipment such as mobile air cleaners, which are equipped with adjustable fans and nozzles to precisely control the airflow intensity and angle of the jet, allowing for optimal adjustment of the impact on the runway surface and reducing the risk of damage.

Additionally, it is important to implement regular monitoring of the runway pavement to detect any signs of erosion or other damage. This will allow prompt action to be taken to repair and restore the surface, preventing further deterioration.

Although the use of high-powered airflows is an effective method of runway cleaning, the potential risks of surface erosion must be taken into account. A balanced approach to the application of these technologies, with a focus on controlling the intensity of airflows and regular monitoring of the pavement condition, will help maintain runway quality and ensure the safety of aviation operations (MoghimiEsfandabadi *et al.*, 2023). Modern automation technologies and sensor systems open up new opportunities to improve cleaning efficiency and adapt to changing weather conditions (Table 4).

Table 4. Study of the integration of aeronautical methods with automatic control systems and sensors

System	Impact on safety (points)	Environmental impact (points)	Cost reduction (%)	Control accuracy (%)	Notes
Automatic systems	8	7	15	20	Improved control accuracy
Sensors	9	8	12	25	Reducing the negative impact on the environment

Source: compiled by the author based on data from A.O. Aderibigbe *et al.* (2023)

The integration of aeronautical methods with modern sensors and automatic control systems allows for the creation of dynamic and adaptive runway cleaning systems. The sensors on the cleaning equipment are able to monitor the runway surface in real time, including the level of contamination and the presence of ice or snow. This data allows automatic systems to adjust equipment parameters, such as air jet intensity or machine speed, to ensure optimal cleaning conditions. One of the advantages of such automated systems is their ability to respond quickly to changes in weather conditions. For example, if the weather deteriorates sharply or snowfall increases, sensors can detect these changes and automatically adjust the cleaning system. This ensures that runway quality is maintained and prevents the accumulation of unwanted contaminants that can be dangerous for aircraft.

Sensor systems also help to improve resource efficiency. For example, systems that monitor the consumption of chemicals or water for cleaning can automatically adjust the flow of chemicals depending on the degree of surface contamination. This reduces material costs and environmental impact, while ensuring effective cleaning.

In addition, automation reduces the human factor that can affect the quality of work. Automated systems perform tasks with high accuracy, which reduces the risk of errors and increases the overall efficiency of the cleaning process. Importantly, such systems can also monitor the condition of runways and generate reports on the work performed, which helps with maintenance management and planning further activities.

The integration of aeronautical methods with sensors and automatic control systems represents a significant step forward in ensuring the safety and efficiency of

runway cleaning. These technologies enable fast and accurate response to changing conditions, reduce costs and improve the quality of cleaning, which is critical to maintaining the safety of aviation operations.

Thus, aeronautical impact is a critical component in a comprehensive approach to runway cleaning, which contributes to improved flight safety and reduced operating costs.

Discussion

The analysis of the results showed that the aeronautical impact on runway pollution control is significant and multifaceted. The study of the impact of the natural airflow created by different types of aircraft showed that this flow helps to remove light contaminants such as dust and small debris. However, its effectiveness was not sufficient to deal with more serious contaminants such as snow or ice. This highlighted the need for additional technological solutions to ensure complete runway cleanliness, especially in severe weather conditions. This was also investigated by Y. Guo *et al.* (2022), where the results confirmed that natural wind can help clean runways from light contaminants such as dust or snow by blowing them off the surface. However, its effectiveness depends on wind speed and direction. At low speeds or in adverse weather conditions, natural wind may not be sufficient to keep runways clean.

The effectiveness of technologies using high-speed air flows was significantly higher compared to traditional mechanical cleaning methods. The study results confirmed that such technologies can significantly reduce the cleaning time and reduce the risk of damage to the lane pavement. In particular, the use of powerful turbines and fans to create directional airflows has shown to be advantageous in removing contaminants without damaging the lane surface, making these methods more efficient and safer. A. Esposito *et al.* (2022) concluded that high-speed airflows effectively blow away light contaminants such as dust and snow faster than mechanical methods. They are also less aggressive to the lane surface, reducing the risk of damage and the need for frequent repairs. In the study by A. Rabajczyk *et al.* (2021), the authors found that high-speed airflows reduce cleaning time and reduce the risk of damage to the lane coating because they do not physically contact the surface. This allows the lane to be ready for use faster and reduces the need for repairs. These results support the study cited above, as they demonstrate that high-speed airflows are indeed effective in cleaning runways, reducing the time required for the process and reducing the risk of pavement damage. The data shows that the use of airflow not only speeds up cleaning, but also reduces the need for mechanical methods that can damage the surface. This confirms the benefits of implementing high-speed air systems as the optimal solution for keeping lanes clean in a safe and efficient manner.

The study of the combined use of aerial methods with chemical reagents also showed positive results. The air flows used in conjunction with the reagents contributed to an even distribution and faster evaporation of chemicals, which significantly increased the efficiency of ice and snow

removal. This reduced the need for repeated treatments and increased the overall efficiency of the cleaning process. It is worth noting the work of O. Bafakeeh *et al.* (2021), who also found that combining aeronautical methods with chemicals increases the efficiency of runway cleaning. Aeronautical methods remove light contaminants, while chemicals, such as saline solutions, soften ice and snow, making them easier to remove. In turn, H. Sparacino *et al.* (2022) concluded that the use of aerial methods together with chemicals significantly improves ice and snow removal. The chemicals soften the ice and the airflow effectively removes it, ensuring that runways are cleared quickly and efficiently. These findings are consistent with the current study, as they confirm that the combined use of aeronautical techniques and chemicals significantly improves runway deicing performance. They demonstrate how the integration of these technologies can provide faster and better ice and snow removal, which is consistent with the arguments made earlier about the benefits of an integrated approach to cleaning.

Assessment of the potential risk of runway surface erosion due to intensive use of air traffic has highlighted the need for careful monitoring and management of such technologies. Although aeronautical methods have proven to be effective, there is a risk of potential damage to the runway surface. This highlights the importance of developing guidelines for the safe use of new technologies to prevent negative impacts. E. Aydoğan & S. Demirel (2022) also conducted a study that confirmed that chemicals and mechanical cleaning methods can cause runway surface erosion, leading to wear and tear and pavement defects. This can degrade the runway and affect flight safety. Therefore, it is important to choose cleaning methods that minimize the risk of erosion and ensure the durability of the pavement. Furthermore, M.T. Miah *et al.* (2022) found that new technologies, such as automated systems and innovative materials, can reduce the risk of erosion and increase the efficiency of runway cleaning. They suggest less aggressive chemicals and new methods that reduce pavement damage and improve runway maintenance. Comparing the data obtained during the research, it can be noted that new runway cleaning technologies significantly reduce the risk of pavement erosion and increase the overall efficiency of the process. It has been found that the combined use of modern methods and innovative materials can achieve better results compared to traditional approaches. This confirms that the introduction of new technologies not only improves the speed and quality of cleaning, but also helps to maintain the durability and safety of runways.

The integration of aeronautical methods with automatic control systems and sensors has significantly improved the accuracy and efficiency of cleaning. Automatic control systems have enabled more effective response to changes in weather conditions and pollution levels, which has reduced costs and increased the efficiency of the cleaning process. This has confirmed the importance of automation in modern airports to optimise resource use and ensure safety. C. Lv *et al.* (2022) concluded that

the integration of aeronautical methods with automatic control systems increases the efficiency of runway cleaning. Automation allows precise control of the power and direction of air flows, optimising the cleaning process according to weather conditions and type of contamination. G. Zhu *et al.* (2022) found that automatic control systems, particularly sensor systems, can significantly improve the accuracy and efficiency of cleaning. Although the current study does not mention laser cleaning, sensor systems can be integrated with laser cleaning technologies to monitor and determine the degree of contamination and to automate the cleaning process. This ensures a quick response to changing conditions and more efficient removal of contaminants from runways, which increases the overall efficiency of airport infrastructure. When analysing the results of the study, it is clear that the integration of aeronautical methods with automatic control systems provides significant benefits in runway cleaning. Automation of processes not only increases the accuracy and speed of cleaning, but also optimises the use of resources and reduces the risk of errors. This confirms the effectiveness of the combined approach, which achieves better results than traditional methods, providing faster and better runway cleaning.

Thus, the study results confirmed that aeronautical methods are a promising approach to runway cleaning. They provide high efficiency, reduce the risk of damage and can be integrated with modern management technologies to improve overall performance. However, to achieve optimal results, further research and development of these methods is needed to reduce potential risks and maximise their benefits.

Conclusions

The study confirmed the effectiveness of new technological solutions in keeping runways clean. It was found that the natural airflow created during take-off and landing is useful for removing light contaminants such as dust and small debris, but is not sufficient to deal with more serious

problems such as snow and ice. This points to the need to integrate additional technologies to fully clean runways.

The efficiency of high-speed airflows generated by turbines or fans has been proven to be significantly higher than traditional mechanical methods. These technologies not only reduce the time required for cleaning, but also minimize the risk of damage to the lane coating, which is important for maintaining its longevity.

The combined use of aerial techniques with chemicals to melt ice and snow has been shown to increase overall cleaning efficiency. Airflows help to distribute the chemicals evenly and evaporate them more quickly, reducing the need for repeated treatments.

An assessment of the potential risk of runway surface erosion showed that care must be taken when applying high-powered airflows to avoid adverse effects on the runway surface. The integration of aeronautical methods with automatic control systems and sensors increases the accuracy and efficiency of cleaning, ensuring adaptation to changing weather conditions and reducing costs.

In general, the study results confirm that aeronautical methods are promising for improving the runway cleaning process, providing new opportunities to improve the safety and economic efficiency of aviation operations.

In order to fully understand the aeronautical impact on runway cleaning, the long-term effects of intensive use of high-speed air traffic on runway pavement wear and durability need to be further investigated. The limitation of this study is that it does not take into account the effect of different runway pavement types on the effectiveness of aeronautical cleaning methods.

Acknowledgements

None.

Conflict of interest

None.

References

- [1] Aderibigbe, A.O., Ohenhen, P.E., Nwaobia, N.K., Gidiagba, J.O., & Ani, E.C. (2023). Advanced sensing techniques in electro-mechanical systems: Surveying the rise of smart sensors and their implications for system robustness. *Engineering Science & Technology Journal*, 4(6), 323-340. doi: 10.51594/estj.v4i6.628.
- [2] Airbus A320. (n.d.). Retrieved from <http://surl.li/tcbaxk>.
- [3] Alabi, B.N., Saeed, T.U., Amekudzi-Kennedy, A., Keller, J., & Labi, S. (2021). Evaluation criteria to support cleaner construction and repair of airport runways: A review of the state of practice and recommendations for future practice. *Journal of Cleaner Production*, 312, article number 127776. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127776.
- [4] Aydoğan, E., & Demirel, S. (2022). The omnidirectional runway with infinite heading as a futuristic runway concept for future free route airspace operations. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 94(7), 1180-1187. doi: 10.1108/AEAT-09-2021-0283.
- [5] Bafakeeh, O.T., Shewakh, W.M., Abu-Oqail, A., Abd-Elaziem, W., Abdel Ghafaar, M., & Abu-Okail, M. (2021). Synthesis and characterization of hybrid fiber-reinforced polymer by adding ceramic nanoparticles for aeronautical structural applications. *Polymers*, 13(23), article number 4116. doi: 10.3390/polym13234116.
- [6] Boeing 747-8. (n.d.). Retrieved from <https://www.boeing.com/commercial/747-8>.
- [7] Boeing 787 Dreamliner. (n.d.). Retrieved from <https://www.boeing.com/commercial/787>.
- [8] Buffalo Turbine. (n.d.). Retrieved from <https://buffaloturbine.com/>.
- [9] Cessna 172. (n.d.). Retrieved from <https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/aircraft-guide/aircraft/cessna-172>.

- [10] Corazza, M.V., & Di Mascio, P. (2024). Strategies to reduce pollutant emissions in the areas surrounding airports: Policy and practice implications. *Future Transportation*, 4(3), 820-833. doi: [10.3390/futuretransp4030039](https://doi.org/10.3390/futuretransp4030039).
- [11] Cunha, D.A., Andrade, M., Prado, L.A., Santana, L.O., & da Silv, M.P. (2021). RISK assessment in airport maintenance runway condition using MCDA-C. *Journal of Air Transport Management*, 90, article number 101948. doi: [10.1016/j.jairtraman.2020.101948](https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101948).
- [12] Esposito, A., Allouis, C., & Lappa, M. (2022). A new facility for hypersonic flow simulation driven by a high velocity oxygen fuel gun. In *Proceedings of the 33th congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*. Bonn: International Council of the Aeronautical Sciences. Retrieved from <https://strathprints.strath.ac.uk/83464/>.
- [13] Farivar, F., Haghighi, M.S., Jolfaei, A., & Wen, S. (2021). Covert attacks through adversarial learning: Study of lane keeping attacks on the safety of autonomous vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26(3), 1350-1357. doi: [10.1109/TMECH.2021.3064816](https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3064816).
- [14] Frant, M., Kiszowski, Ł., Majcher, M., & Zalewski, P. (2024). Experimental tests and numerical analysis of aerodynamic properties of the composite-made jet-propelled aerial target. *Materials*, 17(14), article number 3575. doi: [10.3390/ma17143575](https://doi.org/10.3390/ma17143575).
- [15] Guo, Y., Hu, M., Zou, B., Hansen, M., Zhang, Y., & Xie, H. (2022). Air traffic flow management integrating separation management and ground holding: An efficiency-equity bi-objective perspective. *Transportation Research Part B: Methodological*, 155, 394-423. doi: [10.1016/j.trb.2021.12.004](https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.12.004).
- [16] Jamieson, S., & White, G. (2021). Laboratory evaluation of the performance of stone mastic asphalt as an ungrooved runway surface. *Materials*, 14(3), article number 502. doi: [10.3390/ma14030502](https://doi.org/10.3390/ma14030502).
- [17] Kim, B., Ahn, J., & Kwon, H. (2023). A study on a partially-open bogie fairing to improve anti-snow performance of a high-speed train. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37(4), 1859-1869. doi: [10.1007/s12206-023-0324-x](https://doi.org/10.1007/s12206-023-0324-x).
- [18] Lai, Y.Y., Christley, E., Kulanovic, A., Teng, C.C., Björklund, A., Nordensvärd, J., Karakaya, E., & Urban, F. (2022). Analysing the opportunities and challenges for mitigating the climate impact of aviation: A narrative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, article number 111972. doi: [10.1016/j.rser.2021.111972](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111972).
- [19] Li, Z., Wang, S., Zheng, W., Wang, Y., & Pan, Y. (2024). A review of dynamic monitoring technology and application research of laser cleaning interface. *Measurement*, 238, article number 115311. doi: [10.1016/j.measurement.2024.115311](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115311).
- [20] Lv, C., Chang, J., Bao, W., & Yu, D. (2022). Recent research progress on airbreathing aero-engine control algorithm. *Propulsion and Power Research*, 11(1), 1-57. doi: [10.1016/j.jprr.2022.02.003](https://doi.org/10.1016/j.jprr.2022.02.003).
- [21] Maltinti, F., Flore, M., Pigozzi, F., & Coni, M. (2024). Optimizing airport runway capacity and sustainability through the introduction of rapid exit taxiways: A case study. *Sustainability*, 16(13), article number 5359. doi: [10.3390/su16135359](https://doi.org/10.3390/su16135359).
- [22] Miah, M.T., Oh, E., Chai, G., & Bell, P. (2022). Runway grooving techniques and exploratory study of the deterioration model. In H.R. Pasindu, S. Bandara, W.K. Mampearachchi & T.F. Fwa (Eds.), *Proceedings of 12th international conference on road and airfield pavement technology "Road and Airfield Pavement Technology"* (pp. 219-240). Cham: Springer. doi: [10.1007/978-3-030-87379-0_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87379-0_16).
- [23] MoghimiEsfandabadi, M.H., Djavareshkian, M.H., & Abedi, S. (2023). Significance of aviation safety, its evaluation, and ways to strengthen security. *International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application*, 6(2), 37-45. doi: [10.22034/IJRRS.2023.6.2.5](https://doi.org/10.22034/IJRRS.2023.6.2.5).
- [24] Muldma, K., Mets, B., Siirde, K., Siirde, A., Reinaas, M., Närep, A., Uustalu, J.-M., Koern, V.Ö., Lopp, M., & Kaldas, K. (n.d.). *Production of snow and ice melting agents-calcium and magnesium acetates from oil shale industry combustion waste*. Retrieved from https://www.iscre28.org/abstracts/abstract_588_518_1.pdf.
- [25] Ottogalli, K., Rosquete, D., Rojo, J., Amundarain, A., Maria Rodriguez, J., & Borro, D. (2021). Virtual reality simulation of human-robot coexistence for an aircraft final assembly line: Process evaluation and ergonomics assessment. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(9), 975-995. doi: [10.1080/0951192X.2021.1946855](https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1946855).
- [26] Pérez-Fortes, A.P., Varas-Muriel, M.J., & Bermejo, M. (2022). Crushing effects on the durability of rocky aggregates used on road surfaces subjected to winter maintenance and extreme climate conditions. *Construction and Building Materials*, 351, article number 128948. doi: [10.1016/j.wear.2021.203757](https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203757).
- [27] Rabajczyk, A., Zielecka, M., Klapsa, W., & Dziechciarz, A. (2021). Self-cleaning coatings and surfaces of modern building materials for the removal of some air pollutants. *Materials*, 14(9), article number 2161. doi: [10.3390/ma14092161](https://doi.org/10.3390/ma14092161).
- [28] Sajid, H.U., Naik, D.L., & Kiran, R. (2021). Improving the ice-melting capacity of traditional deicers. *Construction and Building Materials*, 271, article number 121527. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.121527](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121527).
- [29] Shrestha, R., Oh, I., & Kim, S. (2021). A survey on operation concept, advancements, and challenging issues of urban air traffic management. *Frontiers in Future Transportation*, 2, article number 626935. doi: [10.3389/ffutr.2021.626935](https://doi.org/10.3389/ffutr.2021.626935).
- [30] South Cambs District Council: Electric operation reduces driver fatigue! (2024). Retrieved from <https://www.aebi-schmidt.com/en/news/blog/2024/06/07/south-cambs-district-council-electric-operation-reduces-driver-fatigue/>.
- [31] Sparacino, H., Stepenuck, K.F., Gould, R.K., & Hurley, S.E. (2022). Review of reduced salt, snow, and ice management practices for commercial businesses. *Transportation Research Record*, 2676(3), 507-520. doi: [10.1177/03611981211052538](https://doi.org/10.1177/03611981211052538).

- [32] Toraldo, E., Ketabdari, M., Battista, G., & Crispino, M. (2023). Assessing the impact of rutting depth of bituminous airport runway pavements on aircraft landing braking distance during intense precipitation. *Designs*, 7(2), article number 41. doi: 10.3390/designs7020041.
- [33] Vammas T600. (n.d.). Retrieved from https://dobrowolski.com.pl/2244_en.html.
- [34] Vidal, Y.L., Arapa, C.A., Mejía, Á.D., Supo, E., Gutierrez, J.L., & Salas, P.E. (2023). A systematic review of methods for cleaning FOD on runways. In *Proceedings of the 17th international conference on engineering of modern electric systems* (pp. 1-4). Oradea: IEEE. doi: 10.1109/EMES58375.2023.10171778.
- [35] Wu, Y., Du, J., Liu, G., Ma, D., Jia, F., Klemeš, J.J., & Wang, J. (2022). A review of self-cleaning technology to reduce dust and ice accumulation in photovoltaic power generation using superhydrophobic coating. *Renewable Energy*, 185, 1034-1061. doi: 10.1016/j.renene.2021.12.123.
- [36] Xiang, Y., Cai, H., Liu, J., & Zhang, X. (2021). Techno-economic design of energy systems for airport electrification: A hydrogen-solar-storage integrated microgrid solution. *Applied Energy*, 283, article number 116374. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116374.
- [37] Yang, H., Huang, M., Zhou, G., Chen, X., & Ming, R. (2022). [Retracted] Application of TOPSIS method combined with grey relational degree in the selection of snow-melting agent use plan. *Journal of Nanomaterials*, 2022(1), article number 3882031. doi: 10.1155/2022/3882031.
- [38] Zhang, Q., Fan, L., Wang, H., Han, H., Zhu, Z., Zhao, X., & Wang, Y. (2022). A review of physical and chemical methods to improve the performance of water for dust reduction. *Process Safety and Environmental Protection*, 166, 86-98. doi: 10.1016/j.psep.2022.07.065.
- [39] Zhao, G., Zhao, B., Ding, W., Xin, L., Nian, Z., Peng, J., He, N., & Xu, J. (2024). Nontraditional energy-assisted mechanical machining of difficult-to-cut materials and components in aerospace community: A comparative analysis. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 6(2), article number 022007. doi: 10.1088/2631-7990/ad16d6.
- [40] Zhu, G., Xu, Z., Jin, Y., Chen, X., Yang, L., Xu, J., Shan, D., Chen, Y., & Guo, B. (2022). Mechanism and application of laser cleaning: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 157, article number 107130. doi: 10.1016/j.optlaseng.2022.107130.

Даниїл Кльокта

Магістр

Національний авіаційний університет

03058, просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0009-0008-8089-7116>

Аеронавтологічний вплив на процес очищення злітно-посадкових смуг від забруднень

Анотація. Дослідження спрямоване на аналіз аеронавтологічних методів очищення злітно-посадкових смуг від забруднень для підвищення ефективності обслуговування та безпеки авіаційних операцій. У дослідженні були використані аеродинамічні аналізи, дані щодо технологій високошвидкісних повітряних потоків, хімічних реагентів, а також вивчені автоматичні системи управління і сенсори для комплексної оцінки ефективності очищення злітно-посадкових смуг від забруднень. Результати дослідження показали, що використання аеронавтологічних методів очищення злітно-посадкових смуг значно підвищує ефективність видалення забруднень, таких як сніг, лід і пилові частки. Було виявлено, що спрямовані високошвидкісні потоки повітря ефективно скорочують час очищення, порівняно з традиційними механічними методами, зменшуючи ризик пошкодження покриття смуг. Крім того, інтеграція цих методів із системами автоматичного управління та сенсорами дозволяє підвищити безпеку очищення і зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. Комбіноване використання аеронавтологічних технологій з хімічними реагентами також було визнано ефективним, що робить ці підходи перспективними для застосування в аеропортах з високою інтенсивністю польотів. Дослідження підтвердило доцільність впровадження таких технологій для забезпечення безпеки та економічної ефективності авіаційних операцій. Аналіз також виявив, що використання аеронавтологічних методів зменшує необхідність частих повторних очищень злітно-посадкових смуг, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат. Крім того, застосування цих технологій сприяє зменшенню кількості відкладень на поверхні смуг, що позитивно впливає на довговічність їхнього покриття. Дослідження вносить новий підхід до очищення злітно-посадкових смуг, показуючи, як аеронавтологічні методи можуть підвищити ефективність, безпеку та економічність авіаційних операцій, що відкриває перспективи для подальших інновацій у цій сфері

Ключові слова: високошвидкісні потоки повітря; автоматичне управління; хімічні реагенти; пошкодження покриття; вплив на навколишнє середовище

Володимир Михалевич*

Доктор технічних наук, професор
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>

Олександр Грушко

Доктор технічних наук, професор
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5551-375X>

Юрій Добранюк

Кандидат технічних наук, доцент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6387-6331>

Оксана Тютюнник

Кандидат педагогічних наук, доцент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8544-4246>

Напружений стан товстостінної труби під дією внутрішнього тиску та осової сили

Анотація. Розглянуто класичну задачу визначення напруженого стану товстостінної труби з нерухомими днищами під дією внутрішнього тиску та породжуваної ним осової сили. За вказаних умов осова деформація дорівнює нулю. Приймається схема ідеально пластичного тіла. Розроблені інформаційні Maple-технології всіх ключових етапів розв'язування вказаної задачі. Для можливості здійснити аналіз матеріалу труб сприймати пластичну деформацію без руйнування основне диференціальне рівняння задачі сформульовано та розв'язано відносно показника напруженого стану, що дорівнює відношенню першого інваріанта тензора напружень до інтенсивності напружень. Показано, що крайові умови приводять до системи трьох лінійних неоднорідних рівнянь відносно невідомих параметрів рівнянь для напружень. Визначено, що ця система завжди має розв'язок, оскільки визначник матриці системи обернено пропорційний квадрату радіуса межі, що відділяє пластичну та пружну області труби і завжди відмінний від нуля. Показано, що рівняння, яке встановлює залежність між прикладеним тиском і радіусом межі між пластичною та пружною областями, не піддається прямому розв'язанню відносно невідомого радіуса. Однак його доцільно застосовувати у формі, розв'язаній відносно тиску. Побудовані розподіли компонентів напружень, нормованих за межею текучості, по товщині труби узгоджуються з літературними даними, які підтверджують, що максимальні значення колового навантаження спостерігаються на зовнішній поверхні. Це трактується, як ознака достовірності теоретичного розв'язку, що узгоджується з експериментальними даними Бріджмена, згідно яким руйнування матеріалу товстостінної труби, що навантажена внутрішнім тиском, починається із зовнішньої поверхні. Отримані в цій роботі закономірності зміни показника напруженого стану, удосконалюють наведене обґрунтування,

Suggested Citation:

Mykhalevych, V., Hrushko, O., Dobraniuk, Y., & Tiutiunnyk, O. (2024). Stressed state of a thick-walled pipe under the action of internal pressure and axial force. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 92-98. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.92.

*Corresponding author



оскільки з позицій теорії деформовності матеріалів при холодному деформуванні граничні деформації матеріалу звичайно зменшуються з ростом показника напруженого стану, найбільші значення якого мають місце в точках зовнішньої поверхні і досягають значення $\sqrt{3}$

Ключові слова: товстостінна труба; рівномірний тиск; напружений стан; показник напруженого стану

Вступ

Авторами [1] зазначається, що в залежності від ступеня пластичної деформації до руйнування матеріали можна розділити на ковкі (пластичні) та крихкі. Для пластичних матеріалів характерним є значно більша пластична деформація. З посиланням на [2, 3] стверджується, що виникнення та поширення пластичних тріщин у металах є важливим питанням аналізу руйнування інженерних конструкцій, зокрема, таких як кораблі та морські споруди. Зазначається, що зручне прогнозування початку пластичного руйнування потребує визначення напружено-деформованого стану та моделей руйнування, що адекватно відображають процеси руйнування, але не вимагають масштабних випробувань матеріалу для калібрування.

Відповідно, в сучасних працях до таких моделей відносять аналітичні представлення залежності еквівалентної пластичної деформації до руйнування від показника напруженого стану, що визначається відношенням першого інваріанта тензора напружень до інтенсивності напружень. З огляду на кількість посилань, класичними стали праці Райса-Трейсі, Макклінтока, Джонсона-Кука, Кокрофта-Латама-Оха, Кліфта, Броза, Вержбіцького разом з його учнями, Деля та багатьох інших [1–6].

Ці питання привертати значну увагу і вітчизняних науковців. В рамках теорії підсумовування пошкоджень широкий комплекс питань висвітлено в [7, 8], питання оцінки деформовності під час деяких технологічних процесів розглянуто авторами [9–13]. Численні аналітичні представлення залежностей граничних деформацій від показника напруженого стану [14–16] характеризуються монотонним зменшенням граничної деформації з ростом показника напруженого стану, що повністю узгоджується із зазначеними закордонними публікаціями.

Для застосування теорії підсумовування пошкоджень у розв'язанні прикладних задач важливо точно визначати напружено-деформований стан заготовки під час технологічної операції або елемента конструкції в процесі його експлуатації. Упродовж останніх десятиліть увага дедалі більше зміщується на використання методу скінченних елементів, реалізованого в спеціалізованих програмних комплексах. Водночас спостерігається нестача досліджень, що спрямовані на забезпечення можливостей застосування цієї теорії через використання класичних розв'язків задачі визначення напружено-деформованого стану.

Мета: розробити сучасні інформаційні Maple-технології для розв'язання та дослідження задачі визначення компонент напружень та показника напруженого

стану в точках поперечного перерізу товстостінної труби під дією внутрішнього тиску та осової сили.

Результати

На Рисунку 1 зображено схему товстостінної труби з днищами, що не можуть зсуватися в осьовому напрямку. Внутрішній та зовнішній радіуси труби – r_p , r_2 . Труба навантажена заданим внутрішнім тиском p . Надалі вважатимемо матеріал труби нестисливим та незміцнюваним.

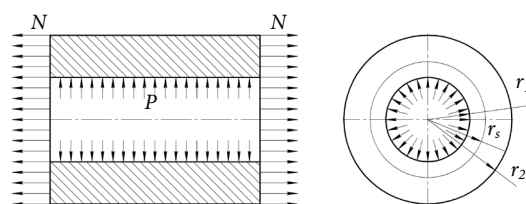


Рисунок 1. Схематичне зображення навантаженої товстостінної труби

Джерело: розроблено авторами

Під дією внутрішнього тиску на днища труби виникає навантаження труби осовою силою N – одною з невідомих, що мають бути визначені в процесі розв'язання задачі. Оскільки за умовою днища труби не можуть зсуватися в осьовому напрямку, приймаємо умову рівності нулю осової деформації в будь-якій точці поперечного перерізу труби.

$$\varepsilon_z = 0. \quad (1)$$

Ця умова пов'язана також з гіпотезою плоских перерізів, що може вважатися справедливою для перерізів, достатньо віддалених від торців труби.

Пружна деформація ε_z визначається трьома головними напруженнями: осовим σ_z , коловим σ_ϕ та радіальним σ_r за допомогою співвідношення.

$$\varepsilon_z = \frac{1}{2E} [2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\phi], \quad (2)$$

де E – модуль пружності.

З урахуванням відсутності осової деформації (1), із останнього співвідношення впливає залежність між компонентами головних напружень:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_\phi}{2}. \quad (3)$$

Обчислимо інтенсивність напружень:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{(\sigma_z - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2\sigma_z^2 - 2\sigma_z\sigma_\phi + 2\sigma_\phi^2 - 2\sigma_\phi\sigma_r + 2\sigma_r^2 - 2\sigma_r\sigma_z}}{\sqrt{2}}, \quad (4)$$

з урахуванням (3):

$$\begin{aligned} & \text{subs}\left(\sigma_z = \frac{\sigma_\phi + \sigma_r}{2}, \%; \text{lhs}(\%) = \text{simplify}(\text{rhs}(\%))\right) \\ & \sigma_i = \frac{1}{2} \left(2 \left(\frac{1}{2} \sigma_\phi + \frac{1}{2} \sigma_r \right)^2 - 2 \left(\frac{1}{2} \sigma_\phi + \frac{1}{2} \sigma_r \right) \sigma_\phi + 2 \sigma_\phi^2 - 2 \sigma_\phi \sigma_r + 2 \sigma_r^2 \right. \\ & \quad \left. - 2 \sigma_r \left(\frac{1}{2} \sigma_\phi + \frac{1}{2} \sigma_r \right) \right) \sqrt{2} \\ & \sigma_i = \frac{1}{2} \sqrt{3} \operatorname{sgn}(\sigma_\phi - \sigma_r) (\sigma_\phi - \sigma_r), \end{aligned} \quad (5)$$

Під час дії тільки внутрішнього тиску справедлива нерівність $\sigma_\phi - \sigma_r > 0$, отже:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\phi - \sigma_r). \quad (6)$$

Обчислимо середнє напруження:

$$\sigma = \frac{\sigma_z + \sigma_\phi + \sigma_r}{3}. \quad (7)$$

З урахуванням (3)

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_z + \sigma_\phi + \sigma_r}{3}; \text{subs}\left(\sigma_z = \frac{\sigma_\phi + \sigma_r}{2}, \%; \right) \\ \sigma &= \frac{1}{3} \sigma_z + \frac{1}{3} \sigma_\phi + \frac{1}{3} \sigma_r. \end{aligned} \quad (8)$$

Порівнюючи (3) та (8), звернемо увагу, що осьове напруження дорівнює середньому:

$$\sigma_z = \sigma. \quad (9)$$

Обчислимо показник напруженого стану:

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_i} = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\phi - \sigma_r) = \sqrt{3} \frac{\sigma_\phi + \sigma_r}{\sigma_\phi - \sigma_r}. \quad (10)$$

За умовою пластичності Хубера-Мізеса.

$$\sigma_i = \sigma_s, \quad (11)$$

де $\sigma_i = \sigma_s = \text{const}$ – напруження течії.

Визначення напружень в пластичній області здійснюється звичайно на основі диференціального рівняння рівноваги елемента труби [17]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_\phi - \sigma_r}{r} = 0. \quad (12)$$

Відповідно теорії малих пружно-пластичних деформацій:

$$\begin{cases} \varepsilon_z = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_z - \sigma) \\ \varepsilon_\phi = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_\phi - \sigma) \\ \varepsilon_r = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_r - \sigma), \end{cases} \quad (13)$$

де ε_i – інтенсивність деформацій.

Із першого рівняння (13) за рівності нулю осьової деформації випливають співвідношення (8), (9).

Відповідно до прийнятої схеми ідеально пластичного тіла на основі (6), (11) матимемо:

$$\sigma_\phi - \sigma_r = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s, \quad (14)$$

або

$$\sigma_\phi - \sigma_r + \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s = 0, \quad (15)$$

і тоді вираз для показника напруженого стану (10) та диференціальне рівняння (12) можуть бути перетворені до:

$$\eta = \sqrt{3} + 3 \frac{\sigma_r}{\sigma_s}, \quad (16)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{\sigma_s}{r} = 0. \quad (17)$$

На основі (16)

$$\sigma_r = \sigma_s \cdot \frac{\eta - \sqrt{3}}{3} = \sigma_s \cdot \bar{\eta} \quad (18)$$

і диференціальне рівняння (17) можемо записати відносно нормованого показника напруженого стану $\bar{\eta}$:

$$\frac{d\bar{\eta}}{dr} - \frac{2\sqrt{3}}{3r} = 0. \quad (19)$$

Маємо звичайне диференціальне рівняння першого порядку з відокремлюваними змінними. Відокремимо змінні та проінтегруємо отримане рівняння:

$$\int d\bar{\eta} = \int \frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{dr}{r}, \quad r_i \leq r \leq r_s \quad (20)$$

або

$$\bar{\eta} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \left(\ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + C \right), \quad (21)$$

де r_s – радіус межі, що розділяє пружну та пластичну області; C – стала інтегрування.

На основі останньої рівності та рівностей (18) отримаємо:

$$\eta = \sqrt{3} + 2\sqrt{3} \left(\ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + C \right), \quad (22)$$

$$\sigma_r = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(\ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + C \right). \quad (23)$$

На основі отриманої формули для радіального напруження в пластичній області та з урахуванням (14), (3) отримуємо, відповідно, формули для колового напруження

$$\sigma_\phi = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(\ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + C + 1 \right) \quad (24)$$

та осьового

$$\sigma_z = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(\ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + C + \frac{1}{2} \right). \quad (25)$$

Використаємо умову рівності радіального напруження тиску $-p$ на внутрішній поверхні труби, тобто

$$\sigma_r = -p \text{ при } r = r_1, \quad (26)$$

тоді, враховуючи (23), отримаємо

$$p = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(\ln \left(\frac{r_s}{r_1} \right) - C \right). \quad (27)$$

В пружній області при $r_s < r \leq r_2$ радіальне та колове навантаження визначаються за формулами [17]

$$\sigma_\varphi = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(A_1 + \frac{A_2}{r^2} \right), \quad (28)$$

$$\sigma_r = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(A_1 - \frac{A_2}{r^2} \right). \quad (29)$$

На зовнішній поверхні труби радіальне напруження дорівнює нулю, отже, із (29) випливає:

$$A_1 - \frac{A_2}{r_2^2} = 0. \quad (30)$$

На межі між пружною та пластичною областями значення радіального та колового навантажень, визначені за співвідношеннями (23) і (29), а також (24) і (28), повинні збігатися, отже:

$$A_1 - \frac{A_2}{r_s^2} - C = 0, \quad (31)$$

$$A_1 + \frac{A_2}{r_s^2} - C = 1. \quad (32)$$

Останні три співвідношення є системою трьох лінійних неоднорідних рівнянь відносно невідомих A_1 , A_2 , C . Для дослідження існування розв'язку цієї системи обчислимо її визначник:

$$\begin{vmatrix} 1 - \frac{1}{r_2^2} & 0 \\ 1 - \frac{1}{r_s^2} & -1 \\ 1 - \frac{1}{r_s^2} & -1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 - \frac{1}{r_2^2} & 0 \\ 0 - \frac{2}{r_s^2} & -1 \\ 1 - \frac{1}{r_s^2} & -1 \end{vmatrix} = (-1) \begin{vmatrix} 1 - \frac{1}{r_2^2} \\ 0 - \frac{2}{r_s^2} \end{vmatrix} = \frac{2}{r_s^2} \neq 0 \text{ при } r_1 \leq r_s \leq r_2. \quad (33)$$

Для обчислення визначника використали метод за нулення: елементи третього рядка помножили на (-1) та додали до відповідних елементів другого рядка. Оскільки визначник відмінний від нуля, система має розв'язок. Отримаємо такий розв'язок:

$$eqs := A_1 - \frac{A_2}{r_2^2} = 0, A_1 - \frac{A_2}{r_s^2} - C = 0, A_1 + \frac{A_2}{r_s^2} - C = 1;$$

$$\text{solve}(\{eqs\}, \{A_1, A_2, C\})$$

$$\left\{ A_2 = \frac{1}{2} r_s^2, C = \frac{1}{2} \frac{-r_s^2 + r_2^2}{r_2^2}, A_1 = \frac{1}{2} \frac{r_s^2}{r_2^2} \right\}. \quad (34)$$

Щоб отримати залежність радіуса межі, що відділяє пружну та пластичну області, від прикладеного тиску підставимо в рівняння (27) зойно отримане значення сталої C :

$$p = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(\ln \left(\frac{r_s}{r_1} \right) - \frac{1}{2} \frac{r_s^2 - r_2^2}{r_2^2} \right). \quad (35)$$

Із цього рівняння неможливо явно визначити радіус r_s , проте для заданого співвідношення k_{12}

$$0 < k_{12} = \frac{r_1}{r_2} < 1 \quad (36)$$

можна отримувати явні залежності відносного тиску $\frac{p}{\sigma_s}$ від відносного радіуса вказаної межі $\frac{r_1}{r_2} \leq k_{1s} = \frac{r_1}{r_s} \leq 1$:

$$\frac{p}{\sigma_s} = \frac{\sqrt{3}}{3} \left(1 - 2 \ln(k_{1s}) - \left(\frac{k_{12}}{k_{1s}} \right)^2 \right). \quad (37)$$

Побудуємо графіки таких залежностей (Рис. 2):

```
> a0:=0.1:an:=0.9:N:=25;
[seq(a0+(an-a0)*si/N,si=0..N)];
sq:=seq([k1s,pss(i,k1s),k1s=i..1],i in [seq(a0+(an-a0)*si/N,si=0..N)]);
plot([t,pss(t,t),t=a0..an],[an,pss(t,an),t=a0..an],sq,k1s=a0..an,color=[blue$3,black$N],thickness=[2$3,1$N]);
```

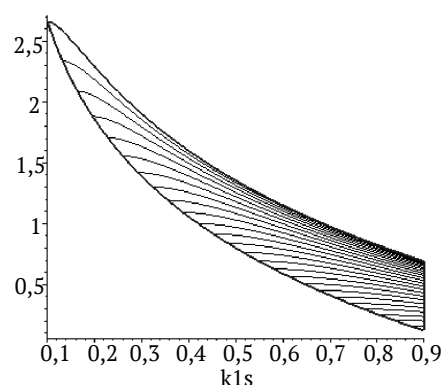


Рисунок 2. Графік залежностей відносного тиску від відносного радіуса

Джерело: розроблено авторами

З урахуванням знайдених параметрів (34) запишемо на основі (28), (29), (3), (10) формули для напружень та показника напруженого стану в пружній області:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(\frac{r_s}{r_2} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{r_2}{r} \right)^2 \right) \\ \sigma_\varphi &= \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(\frac{r_s}{r_2} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{r_2}{r} \right)^2 \right) \\ \sigma_z &= \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(\frac{r_s}{r_2} \right)^2 \\ \eta &= \sqrt{3} \left(\frac{r}{r_2} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad r_s \leq r \leq r_2 \quad (38)$$

та на основі (23), (24), (25), (22) – в пластичній області:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(2 \ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + \left(\frac{r_s}{r_2} \right)^2 - 1 \right) \\ \sigma_\varphi &= \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(2 \ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + \left(\frac{r_s}{r_2} \right)^2 + 1 \right) \\ \sigma_z &= \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \left(2 \ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + \left(\frac{r_s}{r_2} \right)^2 \right) \\ \eta &= \sqrt{3} \left(2 \ln \left(\frac{r}{r_s} \right) + \left(\frac{r_s}{r_2} \right)^2 \right) \end{aligned} \right\} r_1 \leq r \leq r_s. \quad (39)$$

На Рисунку 3 наведено графіки зміни компонент напружень та показника напруженого стану в пружній та пластичних областях по товщині труби. Криві, зі значенням $\frac{r_s}{r_2} = 1$, відповідають величині граничного тиску, коли вичерпується несуча здатність труби (пластична область поширюється на всю товщину). Максимальність колових напружень на зовнішній поверхні труби в літературі трактується як ознака достовірності теоретичного розв'язку експериментальним даним Бріджмена, згідно з якими руйнування матеріалу товстостінної труби, що навантажена внутрішнім тиском, починається із зовнішньої поверхні.

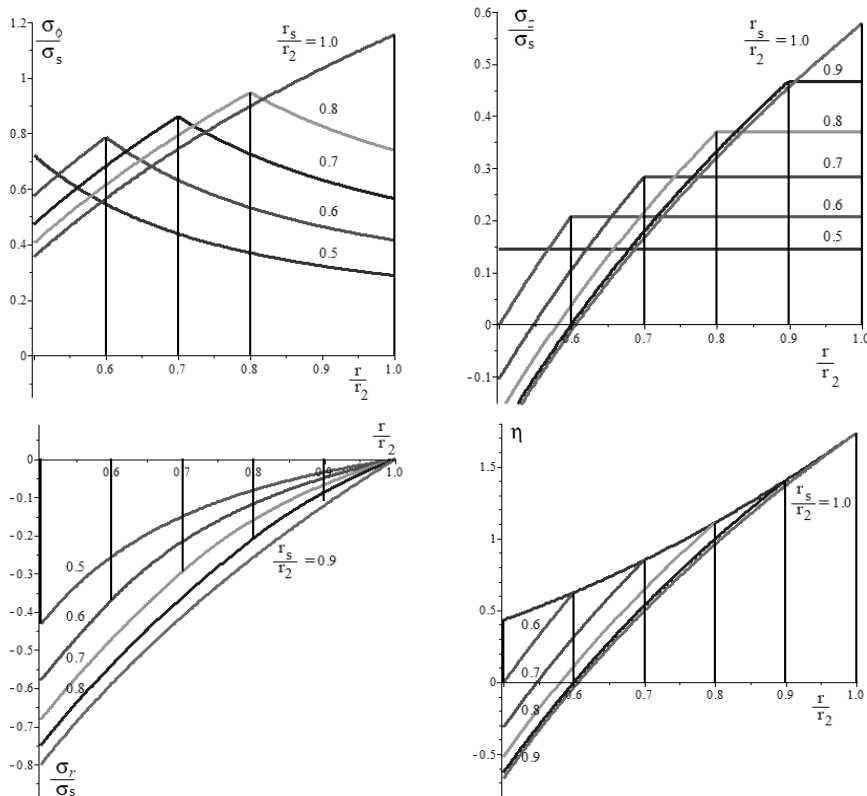


Рисунок 3. Залежності нормованих напружень $\frac{\sigma_\varphi}{\sigma_s}$, $\frac{\sigma_z}{\sigma_s}$, $\frac{\sigma_r}{\sigma_s}$ та показника напруженого стану від відношення $\frac{r}{r_2}$ за різних значень $\frac{r_s}{r_2}$

Примітки: значення $\frac{r_s}{r_2}$ для кожної кривої дорівнюють абсцисам вертикальних ліній для розрахунків за співвідношеннями (38) та (39) прийнято $r_1 = 0.5$; $r_2 = 1$

Джерело: розроблено авторами

Результати дослідження свідчать, що закономірності зміни показника напруженого стану удосконалюють наведене обґрунтування, оскільки з позицій теорії деформовності матеріалів при холодному деформуванні граничні деформації матеріала звичайно зменшуються з ростом показника напруженого стану, найбільші значення якого мають місце в точках зовнішньої поверхні.

Висновки

Удосконалено теоретичне обґрунтування відомих експериментальних закономірностей, встановлених у досліджах Бріджмена. Зокрема, підтверджено, що під час

навантаження товстостінних труб внутрішнім тиском руйнування починається із зовнішньої поверхні. Традиційне пояснення цього явища, засноване лише на максимальних значеннях напружень у точках зовнішньої поверхні, є неповним, оскільки не враховує впливу граничних пластичних деформацій, що значною мірою залежать від показника напруженого стану. Авторами вперше запропоновано використати показник напруженого стану для аналізу вказаних експериментальних закономірностей, встановлених у досліджах Бріджмена, що дозволило повніше врахувати можливі механізми руйнування. У роботі отримано та досліджено аналітичні

формули для обчислення показника напруженого стану в пружній та пластичній областях по товщині труби. Встановлено, що максимальні значення цього показника спостерігаються на зовнішній поверхні труби.

Це узгоджується з експериментальними даними та відомими емпіричними залежностями, згідно з якими гранична пластична деформація матеріалів зменшується зі збільшенням значень показника напруженого стану.

Список використаної літератури

- [1] Park, S.J., Cerik, B.C., & Choung, J. (2020). Comparative study on ductile fracture prediction of high-tensile strength marine structural steels. *Ships and Offshore Structures*, 15(sup1), S208-S219. doi: 10.1080/17445302.2020.1743552.
- [2] Can Cerik, B., Lee, K., Park, S.-J., & Choung, J. (2019). Simulation of ship collision and grounding damage using Hosford-Coulomb fracture model for shell elements. *Ocean Engineering*, 173, 415-432. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.004.
- [3] Can Cerik, B., Ringsberg, J.W., & Choung, J. (2019). Revisiting MARSTRUCT benchmark study on side-shell collision with a combined localized necking and stress-state dependent ductile fracture model. *Ocean Engineering*, 187, article number 106173. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106173.
- [4] Chenxu, Z., Lei, M., Jinquan, Z., Ruinian, J., & Zhe, J. (2021). Ductile fracture characterization of A36 steel and comparative study of phenomenological models. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(1), article number 4020421, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003543.
- [5] Qin, S., & Beese, A.M. (2021). Identification of stress state dependent fracture micromechanisms in DP600 through representative volume element modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 194, article number 106209. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106209.
- [6] Noura, M., Oliveira, M.C., Khalfallah, A., Alves, J.L., & Menezes, L.F. (2023). Comparative fracture prediction study for two materials under a wide range of stress states using seven uncoupled models. *Engineering Fracture Mechanics*, 279, article number 108952. doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108952.
- [7] Mykhalevych, V.M. (1998). *Tensor models of damage accumulation*. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia.
- [8] Mykhalevych, V.M., Dobranyuk, Yu.V., & Tyutyunnyk, O.I. (2024). *Models of damage accumulation in isotropic materials during cold two-stage deformation*. Vinnytsia: VNTU.
- [9] Grushko, O.V., Ogorodnikov, V.A., & Slobodyanyuk, Yu.O. (2019). Deformability of low-carbon wire during its multi-stage cold drawing. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 3, 103-110. doi: 10.31649/1997-9266-2019-144-3-103-110.
- [10] Sivak, R.I., Ogorodnikov, V.A., & Arkhipova, T.F. (2022). *Nonmonotonic plastic deformation in metal forming processes*. Vinnytsia: VNAU.
- [11] Matviychuk, V., Mikhalevich, V., & Shtuts, A. (2023). Analysis of stress-strain state (sss) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Vibrations in Engineering and Technology*, 1(108), 63-72. doi: 10.37128/2306-8744-2023-1-7.
- [12] Sukhorukov, S.I., Kotsiubivska, K.I., & Syvak, I.O. (2009). Estimation of the deformability of workpieces during transverse wedge rolling. *Scientific Notes*, 25, 272-275.
- [13] Mykhalevych, V.M., Dobranyuk, Yu.V., Tyutyunnyk, O.I., & Kolisnyk, M.A. (2024). Linear and nonlinear models in the theory of damage summation. *Materials Working by Pressure: Collection of Scientific Works*, 1(53), 100-108. doi: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)100.
- [14] Mykhalevych, V., Dobraniuk, Y., Matviichuk, V., Kraievskyi, V., Tiutiunnyk O., Smailova, S., & Kozbakova, A. (2023). A comparative study of various models of equivalent plastic strain to fracture. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 13(1), 64-70. doi: 10.35784/iapgos.3496.
- [15] Mykhalevych, V.M., & Dobranyuk, Y.V. (2013). *Modeling of elastically deformed and limit states of the surface of cylindrical specimens under end compression*. Vinnytsia: VNTU.
- [16] Mykhalevych, V.M., Dobranyuk, Y.V., & Kraevsky, O.V. (2018). Comparative study of models of limit plastic deformations. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 2(8), 56-64.
- [17] Mozharovskiy, M.S. (2022). *Theory of elasticity, plasticity and creep*. Kyiv: Vyscha shkola.

Volodymyr Mykhalevych

Doctor of Technical Sciences, Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>

Oleksandr Hrushko

Doctor of Technical Sciences, Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5551-375X>

Yurii Dobraniuk

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6387-6331>

Oksana Tiutiunnyk

PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8544-4246>

Stressed state of a thick-walled pipe under the action of internal pressure and axial force

Abstract. A classical problem of determining the stress state of a thick-walled pipe with fixed bottoms under the action of internal pressure and the axial force generated by it is considered. Under these conditions, the axial strain is zero. The scheme of a perfectly plastic body is accepted. Information Maple technologies for all key stages of solving this problem have been developed. In order to analyse the pipe material for plastic deformation without fracture, the basic differential equation of the problem is formulated and solved with respect to the stress state index, which is equal to the ratio of the first invariant of the stress tensor to the stress intensity. It is shown that the boundary conditions lead to a system of three linear inhomogeneous equations with respect to unknown parameters of the stress equations. It is determined that this system always has a solution, since the determinant of the system matrix is inversely proportional to the square of the radius of the boundary separating the plastic and elastic regions of the pipe and is always different from zero. It is shown that the equation that establishes the relationship between the applied pressure and the radius of the boundary between the plastic and elastic regions cannot be solved directly with respect to an unknown radius. However, it is advisable to use it in a form solved with respect to pressure. The calculated distributions of stress components normalised by the yield strength along the pipe thickness are consistent with the literature data, which confirm that the maximum values of the circumferential load are observed on the outer surface. This is interpreted as a sign of the reliability of the theoretical solution to Bridgman's experimental data, according to which the material fracture of a thick-walled pipe loaded with internal pressure begins from the outer surface. The regularities of changes in the stress state index obtained in this work improve the above justification, since from the standpoint of the theory of deformability of materials during cold deformation, the ultimate deformations of the material usually decrease with the growth of the stress state index, the highest values of which occur at the points of the outer surface and reach the value $\sqrt{3}$

Keywords: thick-walled pipe; uniform pressure; stress state; indicator of the stress state

Maksym Omelian*

Postgraduate Student

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

46001, 56 Ruska Str., Ternopil, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0008-7501-5318>

Method of finite element modelling of the stress-strain state parameters of a flat truss with parallel belts

Abstract. The purpose of the study was to create a method for modelling the stress-strain state of a flat truss with parallel belts using multi-package software based on the finite element method. It was established that the software complexes LIRA-CAD 2016 R5 and ANSYS Workbench 14.5 are the most effective for calculating the parameters of the stress-strain state of flat trusses, since they provide high modelling efficiency due to the developed functionality and adaptability to engineering analysis tasks. In the course of the study, the capabilities and interfaces of these software environments were analysed, and simulations were performed for a truss with a triangular grid and dimensions of 18,000×3,600 mm, made of VCt3ps structural steel. Geometric and finite element models of trusses in the media of the identified calculation complexes were developed. For modelling, elements made of rolled corners with a cross-section of 100×100×10 mm were used, and nodal kerchiefs were made of steel sheet with a thickness of 10 mm. For the truss model, ANSYS Workbench 14.5 created a finite element grid with size sampling, in particular for styles, which provides more accurate determination of the parameters of the stress-strain state of SSS in critical zones of the truss. In LIRA-CAD 2016 R5, the truss model was divided into 10x10 mm elements. The proposed method included two main stages: at the first stage, a model was created to determine the stress-strain state of the truss and the environment of the LIRA-CAD 2016 R5 software suite, at the second stage, the results obtained were analysed in the environment of the ANSYS Workbench 14.5 calculation complex to optimise the design parameters. The use of this technique can significantly reduce the time required for design and calculations, which helps to increase the efficiency of designing trusses with parallel belts. The practical value of the development lies in the possibility of optimising the shapes and sizes of cross-sections of elements, which positively affects the economic efficiency of the designed trusses, reducing material costs and ensuring the durability of structures

Keywords: computer simulation, optimisation, rod structures, engineering analysis, variational calculation methods

Introduction

Flat trusses are widely used in various branches of the national economy. Most often, such structures are used in the construction of industrial and public structures, bridge crossings. However, along with this, flat trusses, in particular those with parallel belts, have found application in the transport sector, agricultural engineering, etc. The use of such flat trusses is conditioned by the variety of geometric shapes, a significant degree of automation in manufacturing. In this regard, the issue of reducing the complexity of

designing and reducing the metal consumption of trusses with parallel belts is relevant.

S. López *et al.* (2022) presented a methodology for identifying key events leading to progressive destruction on truss-type bridges. The methodology includes a new database that collects detailed information about initial damage and its spread, and the consequences of the collapse. The methodology was implemented by collecting information from 25 case studies presented in the literature. The results

Suggested Citation:

Omelian, M. (2024). Method of finite element modelling of the stress-strain state parameters of a flat truss with parallel belts. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 99-108. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.99.

*Corresponding author



revealed the most frequent initial constituted damage state or failure (ICDS) leading to progressive destruction.

Two variants of the algorithm, such as GSSA and GSSB, were proposed to optimise the dimensions of four high-dimensional steel truss samples in the studies by A. Ahrari *et al.* (2020), S.K. Azad & S. Aminbakhsh (2021), H. Cao *et al.* (2023), namely: a single-layer bulb dome of 2,075 elements, a two-layer open dome of 2,688 elements, a two-layer comb dome of 6,000 elements and a two-layer lattice of 15,048 elements in accordance with the AISC-LRFD specification. The obtained numerical results indicate the effectiveness of GSSA and GSSB in working with high-size samples of large-sized steel trusses.

A.A. Mousavi *et al.* (2020; 2022) proposed a method for empirical mode decomposition using the adaptive noise method to determine the presence, location, and severity of damage for a steel truss bridge model. The developed laboratory model was exposed to disturbances, which helped to obtain experimental data. Using the technique, four key signal characteristics were identified: energy, instantaneous amplitude, phase, and instantaneous frequency, which became the basis for qualitative and quantitative damage assessment. To increase the sensitivity of the method to damage detection, improved indices have been developed that combine statistical characteristics of time signals, such as kurtosis and entropy, with energy and instantaneous amplitude parameters. The experimental results demonstrated the high efficiency and sensitivity of the proposed approach, which is superior to existing methods of empirical decomposition of modes in the tasks of detecting, localising, and assessing the severity of damage.

The paper by F. Parisi *et al.* (2022) described a method for detecting and localising damage in steel truss railway bridges using machine learning algorithms. This approach allows automatically analysing raw signals from strain sensors without the need for pretreatment or feature isolation. The results showed that the proposed approach can detect damage with an accuracy of up to 93%, which makes it an effective tool for monitoring the condition of structures.

W. Wu *et al.* (2022) proposed a linear model for predicting the corrosion of truss structures based on the concept of linear cumulative damage to miners to solve the difficulties of conducting accelerated corrosion tests. In addition, an equivalent fatigue test has been developed in combination with a corrosion prediction model. A model for predicting fatigue damage based on corrosion factors was developed and the law of fatigue damage and degradation of structural rigidity in a corrosive environment was determined.

In the study by G. Weng *et al.* (2020) to detect stresses in steel structures and elements using existing magnetism, a magnetic stress sensing system was developed that includes a magnetic flux induction coil, a magnetic flux measurement device, a load device, and data acquisition software. In addition, a practical formula for determining stresses was obtained through experiments. On this basis, a typical model of the steel truss structure of the Bailey beam was designed and manufactured under various operating conditions.

M. Hohol *et al.* (2020) performed structural and parametric synthesis of steel combined trusses with a span of 30 m to minimise mass and potential energy. It was shown that the maximum load-bearing capacity of the structure was achieved by applying the criterion of rational design for strength. It was established that the use of combined trusses instead of conventional ones provides significant metal savings, reduces the complexity of manufacturing, and reduces installation time.

The main stages of strengthening steel beams of a sloping roof for a typical metal frame with initial geometric imperfections according to the deformed scheme were considered by S. Hudz *et al.* (2019) based on a new approach to the analysis of internal force factors, the features of the working conditions of a beam under the joint action of transverse bending in two planes and bending torsion resulting from the eccentricity of load stacking were found and described.

Based on this, it is relevant to search for a reliable method for modelling the parameters of the stress-strain state (SSS) of a flat truss with parallel belts, which will give full information about the distribution and magnitude of stresses, the value and nature of deformations depending on the acting external forces. The purpose of the study was to develop a methodology for modelling the SSS of a flat truss with parallel belts using multi-package software tools based on the finite element method (FEM). Objectives of the study: to determine multi-package software tools suitable for calculating the SSS parameters of flat trusses with parallel belts and to analyse the environments of detected software tools suitable for calculating the SSS parameters of flat trusses with parallel belts; to develop a full-size finite element model of a flat truss with parallel belts in the environment of detected software tools. The scientific originality lies in the fact that a two-stage method for modelling the SSS parameters of a flat truss with parallel belts using multi-package software tools based on the finite element method is proposed.

Materials and Methods

The research methodology was based on calculation complexes that work using the finite element method. This universal variational approach is used to solve the most complex problems, in particular, in the mechanics of deformed solids, fracture mechanics, and applied mechanics. The main idea of this method (Hrebenuk & Homeniuk, 2022) was to divide the continuous volume of a real construct into subunits consisting of finite but small elements called finite elements (FE). Within each such element, the desired function can be replaced with an approximate one. This allows representing any quantity that continuously changes in the volume of a body in the form of a discrete model consisting of a set of piecewise continuous functions. Each of these functions was defined within the corresponding sub-domain, providing an accurate approximation for analysing the actual construct. The finite element method in the current

problem was implemented based on the displacement method – functions approximate movements within finite elements.

To calculate the parameters of the stress-strain state (SSS) of flat trusses with parallel belts, software tools were defined: LIRA-CAD 2016 R5 at the first stage and ANSYS Workbench 14.5 at the second stage, respectively. The finite element truss model corresponded to the parameters of a real truss with geometric dimensions of 18,000×3,600 mm. Truss material – VSt3ps steel, the physical and mechanical properties of which included the elastic modulus: $E = 2.06 \times 10^5$ MPa and density $\rho = 7,800$ kg/m³. The truss elements had the following characteristics: the profile of braces and belts – rolled corners 100×100×10 mm, kerchiefs are made of steel sheet with a thickness of 10 mm.

At the first stage of modelling in the LIRA-CAD 2016 R5 environment, a three-dimensional rod geometric model of the truss was created, the physical and mechanical characteristics of materials were set, a finite element grid with an element size of 10×10 mm was formed, and loads were applied. The truss was loaded with a concentrated force of $P = 10$ kN, evenly distributed between two upper belt nodes $P/2 = 5$ kN per node. Calculations were performed using the finite element method, but the kerchiefs in the nodes were not modelled, which was considered in further analysis. At this stage, data on stresses, deformations, and internal forces in the truss elements were obtained.

The second stage involved modelling in the ANSYS Workbench 14.5 environment, where the geometric truss model was built in the Design Modeler module, taking into consideration styles. Similarly to the first stage, the characteristics of materials and loads were set, and a more detailed finite element grid was formed. This helped to increase the accuracy of calculations and consider the nodal features of the design.

Comparison of the results of the two modelling stages allowed evaluating the accuracy and efficiency of the applied software packages. The results included stress distribution, strain shapes, and identification of critical structural zones. The methodology proved that the combination of engineering solutions with modern software tools ensures the efficiency of design and calculations, optimisation of geometric parameters of truss elements, and high accuracy of stress-strain state analysis.

Description of the LIRA-CAD 2016 R5 settlement complex

The LIRA-CAD software package is a modern representative of the Ukrainian software of the LIRA family. LIRA-CAD 2016 R5 (Ukraine) is a multifunctional software package for designing and calculating machine-building and building structures for various purposes (Strelets-Streletsky *et al.*, 2019). The programme allows performing calculations for static and dynamic loads using the finite element method as a basis. Various connected modules (processors) provide the ability to select and check cross-sections of steel and reinforced concrete structures, model the ground, calculate bridges and analyse the behaviour of buildings during installation, etc. The LIRA-CAD PC consists of several interconnected information systems. The organisation of relationships between these systems ensures the manufacturability of working with the complex so that the complex itself guides the user – from creating a calculation model to designing elements. The main graphics system is the VISOR-CAD system (Fig. 1.), a single graphical environment that has a large set of features and functions for forming adequate finite element and super-element models of calculated objects. VISOR-CAD allows conducting a detailed visual survey of the created models and their correction, describing the physical and mechanical properties of materials.

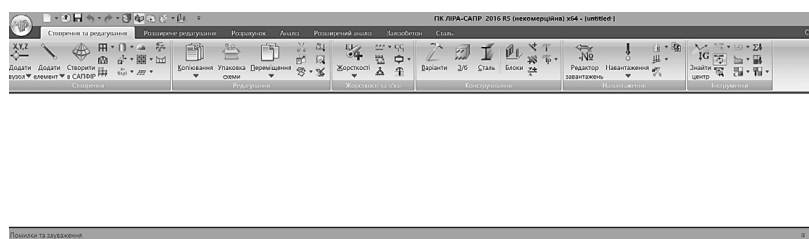


Figure 1. LIRA-CAD 2016 R5 graphics environment window

Source: E. Strelets-Streletsky *et al.* (2019)

In the same environment, relationships and loads were set, and relationships between different loads were assigned to determine their most dangerous combinations. To calculate the created model, a linear calculation processor was selected, which implements the calculation of linearly deformed structures for static and dynamic impacts. The LIRA-CAD PC includes several calculation processors. All of them were designed to determine the stress-strain state of the structure based on the finite element method in displacements. Calculation processors implement modern

advanced methods for solving systems of equations, which have high speed and allow solving systems with a very large number of unknowns. The linear processor was designed to solve problems describing the operation of the material of structures in a linear-elastic formulation. A nonlinear processor allows solving problems related to the physical nonlinearity of a material in the framework of nonlinear elasticity theory and in elastic-plastic formulation (concrete, reinforced concrete, steel concrete, metal, soil). Such problems were solved using the step-by-step

and step-by-iterative methods. The nonlinear processor allows solving problems related to geometric nonlinearity (shrouds, large-span coatings, membranes), and structural nonlinearity (contact problems, one-way connections, friction). The library of nonlinear finite elements also includes elements that allow simultaneous accounting of physical and geometric nonlinearities. When calculating nonlinear problems using the step method, the load step was automatically selected based on its history. Calculation processors contained an extensive library of finite elements, which makes it possible to create adequate calculation models with almost no restrictions on describing the real properties of the calculated objects. The software environment of the LIRA-CAD PC provides an opportunity to model complex structures, determine their stress-strain state using linear and nonlinear processors that consider various types of loads, dynamic influences, physical, geometric, and structural nonlinearities.

Description of the methodology of the ANSYS Workbench calculation complex 14.5

The ANSYS Workbench 14.5 PC used the finite element method for mathematical modelling, combining the versatility of algorithms for various tasks with efficient computer implementation of calculations. The problem was solved using the finite element method in the ANSYS software

suite in three stages. At the first stage, the foundations of the finite element model of the object under study were formed. This step included the following steps:

- ◆ determination of the physical type of the problem (solid state mechanics, heat transfer, hydrodynamics, etc.) and appropriate programme settings;
- ◆ selection of the type of finite element depending on the size and characteristics of the object, with the ability to set element properties;
- ◆ selection of the object's material and specification of its properties (volume weight, tensile strength, yield strength, Poisson's ratio, etc.), which can be entered manually or imported from the ANSYS material library. Properties determine the material model (linear-elastic, elastic-plastic, bilinear, etc.), which affects the choice of equations for the finite element method;
- ◆ creating a geometric solid-state model of an object (3D model) performed in the PREP7 module in classical ANSYS and in the Design Modeler module in Workbench (Fig. 3). The geometric model can also be exported from any CAD package;
- ◆ geometric model was divided into finite elements, with the ability to configure grid parameters.

This step forms a complete mathematical and physical model of the object, which was crucial for obtaining accurate and reliable results in the next stages of modelling.

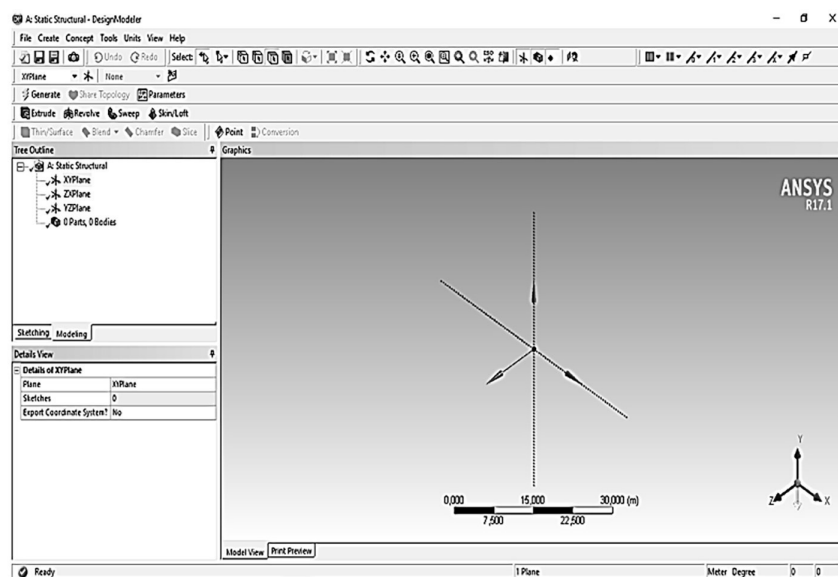


Figure 2. Design Modeler module window in ANSYS Workbench 14.5

Source: L. Danylchenko (2021)

The second step – applying physical conditions and solving the problem – consists of three main steps:

- ◆ setting boundary conditions (forces, displacements, connections, etc.);
- ◆ selecting the type of analysis (static, dynamic, modal, etc.) and the method for solving equations and parameters of computational procedures (number of load steps, iterations, etc.);

◆ solving system of equations by the finite element method. As a result, a file was created with a vector of the found degrees of freedom (nodal displacements, temperatures, etc.).

The described step was necessary for direct numerical analysis of the model using the finite element method. It allows forming a mathematical statement of the problem, considering the physical conditions and load

parameters, and getting results that characterise the behaviour of the structure.

The third step was to analyse the results obtained. Physical quantities calculated using the finite element method (displacement, deformation, stress, temperature, etc.) are displayed in the ANSYS Gui as images, tables, graphs, or animations (Danylchenko, 2021). The information provided at this stage provided an understanding of the operation of the structure as a whole, and its individual components. This allows drawing conclusions about the effectiveness of constructive decisions made.

Results

Example of developing a flat truss model with parallel belts

A truss with parallel belts and a triangular lattice was used for finite element modelling (Fig. 3) and geometric dimensions of 18,000x3,600 mm. Truss material – VSt3ps steel, corresponding physical and mechanical properties imported from the VDt3ps steel material model. Elastic modulus of steel $E = 2.06 \cdot 10^5$ MPa, density $\rho = 7,800$ kg/m³. Profile of braces and belts – rolled corners with a cross-section of 100x100x10 mm. Kerchiefs in knots are made of 10 mm thick steel sheet.

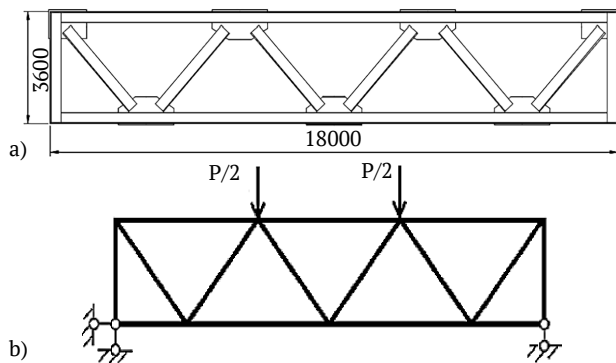


Figure 3. Graphical diagram of the truss

Notes: a) truss grid diagram; b) truss load diagram

Source: compiled by the author

The truss is loaded with an external total load in the form of a concentrated force $P = 10$ kN. The force P (10 kN) is distributed between two nodes on the upper truss belt. Thus, each of these nodes accounts for half of the total force, i.e., $P/2 = 10 \text{ kN}/2 = 5$ kN.

At the first stage, geometric and finite element models were constructed using these parameters in the LIRA-CAD 2016 R5 PC (Fig. 4). Based on the calculation the internal forces arising in the structural elements due to the external force $P/2$ applied at the corresponding nodes were determined, as well as the cross-sectional dimensions of the truss elements resulting from the action of these forces. This information allows adjusting, if necessary, the previously specified cross-section dimensions in the truss elements. The importance of the obtained data lies in the fact that they allow carrying out a general assessment of the

stress-strain state of the structure, determining the forces in its elements, and clarifying the dimensions of cross-sections. These results are crucial for further import of the model into ANSYS Workbench 14.5. Skipping this stage may result in incorrect truss design and errors in subsequent analysis stages.

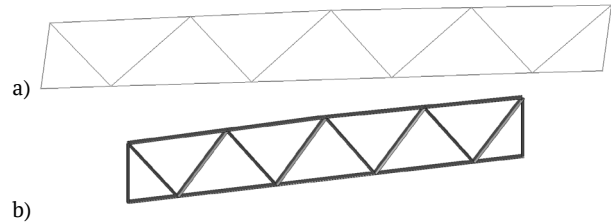


Figure 4. Truss model in the LIRA-CAD environment 2016 R5

Notes: a) geometric model; b) finite element grid model

Source: compiled by the author

At the second stage, in the environment of the ANSYS Workbench 14.5 software suite, the calculation data was imported from the LIRA-CAD 2016 R5 PC and the geometric and finite element model of a full-size truss was rebuilt, followed by a division into a finite element grid (Fig. 4). The shapes of cross-sections of braces, belts, and support posts are displayed.

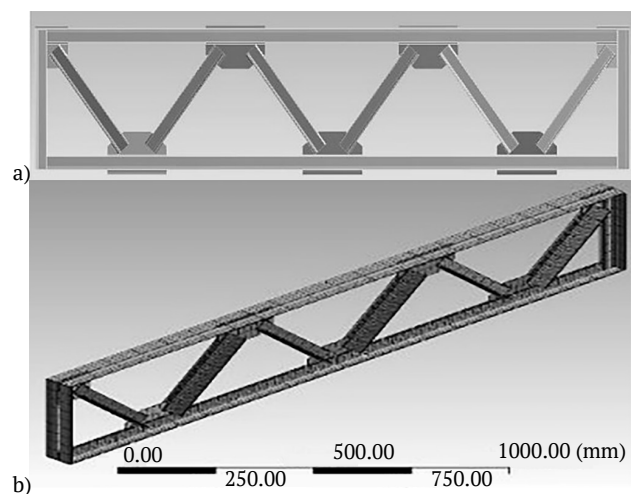


Figure 5. Truss model in the ANSYS Workbench 14.5 environment

Notes: a) CAD – geometric model; b) FEM – finite element grid model

Source: developed by author

The three-dimensional geometric structure of the truss, which was developed in the Design Modeler module, is shown. This model is the basis for further analysis and reflects the geometric parameters of the object. The result of splitting the geometric model into finite elements is also shown. This mesh model is used to perform finite element calculations (FEA). The figure illustrates the transition from CAD modelling to the FEM analysis stage, emphasising the importance of the

accuracy of constructing a geometric model and the quality of grid creation to ensure the reliability of calculations. The current stage is important for analysing the stress-strain state, since the calculation results in the stress distribution in the cross-sections taken at the first

stage (Fig. 5). The ANSYS PC does not programmatically provide cross-section selection functions, unlike the LIRA-CAD PC, but the ANSYS PC allows assessing the stress-strain state more locally, in particular, identifying places of stress concentrations.

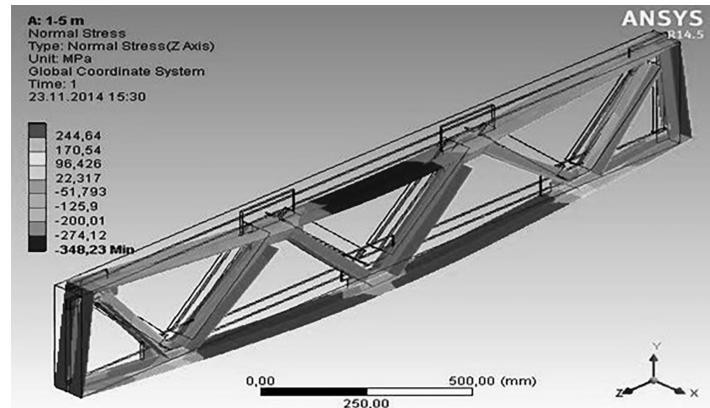


Figure 6. Distribution of normal stresses

Source: developed by author

The finite element grid in ANSYS is created with dimensions of 10x10 mm, and the mesh in the shapes is discrete. In the LIRA-CAD 2016 R5 PC, the finite element grid was created with similar parameters, with the exception of styles. The stages of truss modelling in the LIRA-CAD 2016 R5 software environment, which is widely used for engineering analysis of building structures, are demonstrated. At the first stage, a basic three-dimensional model of the truss is created, which accurately reflects its geometric parameters, in particular, the length, height, and shape of elements. The geometric model is formed in accordance with the specified design characteristics and is the basis for further analysis. A finite element grid model is obtained by dividing the truss geometry into finite elements. The grid model is a key step in applying the finite element method, since it allows translating a physical problem into a discrete form suitable for numerical solution. The model is divided into elements based on the geometric complexity of the object and the required accuracy of calculations.

The truss geometry is divided into finite elements, which provides discretisation of the physical problem for its numerical solution. Loads at the current stage were set similarly to the calculation in the LIRA PC, in the form of a concentrated force $P = 10$ kN distributed between two nodes on the upper truss belt, so each of these nodes accounts for half of the total force, i.e., $P/2 = 10 \text{ kN}/2 = 5$ kN. The grid is constructed considering the geometric complexity of the

design and the requirements for the accuracy of calculations, which is key for the effective application of the finite element method. Based on the import of cross-sections and geometry of the CE truss model from the LIRA CAD, the calculation is performed in ANSYS Workbench 14.5, which results in graphic materials with a set of information about the stress distribution in individual truss elements and in characteristic places (nodes, places of load application).

The developed method offers two stages of finite element modelling of the parameters of the stress-strain state of a flat truss with parallel belts. The first stage includes creating a geometric rod model in the environment of the LIRA-CAD 2016 R5 software package, setting cross-sections and physical and mechanical characteristics of materials, applying loads, and further calculation using the finite element method. The external load is a concentrated force $P = 10$ kN. The force from $P/2$ is applied in two truss nodes, which are located on the upper belts. As a result, in the first iteration, a set of data was obtained in tabular form. The Table 1 contains the results of estimating the percentage exhaustion of the stability of elements relative to the OY and OZ axes, the stability of the compressed wall and compressed belt, and the exhaustion of the load-bearing capacity by groups of limit states. The percentage of exhaustion of local stability is indicated separately. These data allow comprehensively assessing the effectiveness of selecting the cross-section of individual structural elements.

Table 1. Result of checking the specified cross-sections of truss elements in the LIRA CAD

Element	OY ₁ %	OZ ₁ %	SW %	SB %	1LS %	2LS %	L.S.
10	2	2	0	46	2	0	46
10	1	1	0	46	1	0	46
11	2	2	0	46	2	0	46
11	1	1	0	46	1	0	46

Continued Table 1.

Element	OY ₁ %	OZ ₁ %	SW %	SB %	1LS %	2LS %	L.S.
12	0	0	0	0	2	0	0
12	0	0	0	0	2	0	0
13	1	1	0	46	1	0	46
13	1	1	0	46	1	0	46
14	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	46	0	0	46
15	0	0	0	46	0	0	46
16	0	0	0	46	0	0	46
16	0	0	0	46	0	0	46
17	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0
18	1	1	0	46	1	0	46
18	1	1	0	46	1	0	46
19	0	0	0	0	2	0	0
19	0	0	0	0	2	0	0
1	3	3	0	46	3	0	46
1	3	3	0	46	3	0	46
2	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0
5	3	3	0	46	3	0	46
5	3	3	0	46	3	0	46
6	2	2	0	46	2	0	46
6	2	2	0	46	2	0	46
7	4	4	0	46	4	0	46
7	4	4	0	46	4	0	46
8	4	4	0	46	4	0	46
8	4	4	0	46	4	0	46
9	2	2	0	46	2	0	46
9	2	24	0	46	2	0	46

Notes: OY₁ % – percentage of stability exhaustion along the Y-axis; OZ₁ % – percentage of exhaustion of stability along the Z-axis; SW % – percentage of exhaustion of stability of the compressed wall; SB % – percentage of exhaustion of stability of the compressed belt; 1LS % – percentage of exhaustion of load-bearing capacity for the 1st group of limit states; 2LS % – percentage of exhaustion of load-bearing capacity for the 2nd group of limit states; L.S. – percentage of exhaustion of local stability

Source: developed by the author

The second stage involves importing calculated data from the LIRA CAD and then rebuilding the geometric model in ANSYS Workbench 14.5, followed by setting cross-sections and physical and mechanical characteristics of materials, applying loads and further calculation. At both stages, the physical and mechanical characteristics of the materials, the shape and dimensions of the cross-sections of the truss elements were identical. As a result, the design and calculation of flat trusses with parallel belts becomes more efficient both in terms of time spent and as a result of the efficient arrangement of elements with the required cross-sectional dimensions.

Discussion

The finite element method is a widely used tool in the design and analysis of various structures, in particular trusses. The study by Y. Shved *et al.* (2020) presented a method for

determining durability using SOLIDWORKS PC, which allows effectively assessing the reliability of structures. Although this method was based on different software, the results obtained in this paper provide important comparisons regarding the durability of steel trusses. They point out the importance of detecting fatigue cracks, especially in K-shaped nodes on the upper chord of the truss, which is a critical factor in the operation of structures. According to the results of verification, the indicators of fatigue damage were accurate with an error of only 5.7%. This indicates the high reliability of the method used for long-term monitoring of the state of trusses. However, the use of SolidWorks for these calculations has its limitations, especially in modelling complex loads and material properties, where more powerful software tools such as ANSYS can show better results.

The study by M. Basara *et al.* (2021) applied a comprehensive approach that includes both a semi-natural

experiment and computer modelling in the ANSYS Workbench environment. Experimental studies of the durability of a rectangular welded truss have confirmed the importance of accurate visualisation of fatigue damage, in particular, in K-shaped nodes, where there is also a decrease in the load-bearing capacity of the structure. Compared to the method proposed by Y. Shved *et al.* (2020), it was found that the use of combined methods allows for more accurate results, although the error in comparison with a semi-natural experiment does not exceed 5.7%. In addition, M. Basara *et al.* (2021) demonstrated that combining real-world tests with numerical methods allows for more accurate predictions, which is important for the practical assessment of structural reliability.

Y. Kovalchuk *et al.* (2023) proposed a new approach to determining the behaviour of welded structures under thermomechanical influences, which achieves high reliability of results due to computer modelling. In particular, it was found that the research results follow a normal distribution with minimal deviations for tensile strength and fluidity (2.1% and 2.6%, respectively). This approach has shown high accuracy and allows more accurately considering the effect of thermomechanical loads on structures, which is important for accurate forecasting of their operational life under conditions of high temperatures and variable loads.

The study by H. Liu *et al.* (2024) presented an innovative approach by applying a deep reinforcement learning method to update steel truss models. This allows integrating the long-term memory network (LSTM) with the deep deterministic policy gradient (DDPG) algorithm, which increases the efficiency of the algorithm in real-world operating conditions. The results obtained using the NF-LSTM-DDPG algorithm were significantly more accurate, with an average relative error of 14.15% and more reliable indicators of changes in the elastic modulus compared to other methods. This study provides important guidance for further improvement of real-world truss modelling and monitoring techniques, particularly for adaptive systems to detect potential damage that may occur over a long period of operation.

The algorithm proposed by N. Khodadadi & S. Mirjalili (2022) generalised normal distribution optimisation (GNDO) used to design truss structures with optimal weight. The ability of the proposed algorithm to deal with such problems is investigated. To evaluate the GNDO algorithm, three reference problems for optimising trusses with frequency constraints were considered. Numerical data show that GNDO is more reliable, stable, and efficient for structural optimisation problems than other meta-heuristic algorithms. J. Pierzan *et al.* (2021) presented a modified coyote optimisation algorithm (MCOA), which has the advantage of using chaotic sequences to improve solutions and avoid local minima, and adaptive parameter updates. These improvements allow the algorithm to effectively solve problems of optimising the weight and stability of metal structures. M. Azizi *et al.* (2022) considered the optimisation of lattice trusses using the Chaos Game

Optimisation (CGO) algorithm, which showed high efficiency for multi-element structures. A list of other algorithms and parameters for optimising steel structures was given in the studies by A. Kaveh *et al.* (2021), T.N. Huynh *et al.* (2021). G. Caredda *et al.* (2022) considered an adaptive differential evolution (DE) algorithm for truss optimisation by integrating the Q-learning method. This approach is known as q-learning DE (qlDE).

In general, the results of the above-mentioned studies confirm the effectiveness of using ITU to investigate the durability of steel trusses, which allows increasing the accuracy of forecasting and adaptability to real changes in loads and operating conditions. This allows getting more accurate results, which are important for the durability and safety of steel structures in real-world conditions. Moreover, the use of multi-stage methods with multi-package software based on the finite element method has not become widespread. Thus, the method proposed in this study included two main stages of determining the SSS parameters: at the first stage, a model was created to determine the stress-strain state of the truss and the environment of the LIRA-CAD 2016 R5 software suite, and at the second stage, the results obtained to optimise the design parameters were analysed in the environment of the ANSYS Workbench 14.5 calculation complex.

Conclusions

The study examined the method of modelling the parameters of the stress-strain state of a flat truss with parallel belts using multipack software based on the finite element method. The author managed to achieve this goal by developing a two-stage methodology that allows optimising design parameters and increasing the efficiency of designing such structures.

In the course of the study, the functionality of the LIRA-CAD 2016 R5 and ANSYS Workbench 14.5 software complexes were analysed. Geometric and finite element models of a truss with a triangular grid and dimensions of 18,000×3,600 mm, made of structural steel, were developed. At the first stage of the methodology, a basic truss model was created in LIRA-CAD 2016 R5 for preliminary analysis of the stress-strain state. The second stage involved refining the results and optimising the design parameters in the ANSYS Workbench 14.5 environment. The proposed method creates prerequisites for reducing the complexity of design and calculations, ensuring the accuracy of determining the parameters of stresses and deformations of trusses. The practical value of the technique lies in the possibility of optimising the shapes and sizes of cross-sections of truss elements, which creates the basis for reducing material costs and increasing the economic efficiency of structures.

The developed technique is important for studying the stress-strain state of flat trusses, taking into consideration the influence of force factors and ensuring the reliability of structures. It can be used to analyse and optimise other types of structures using multi-package software.

A promising area of further research is the expansion of the methodology to more complex types of structures, the investigation of truss behaviour under nonlinear conditions, and the integration of artificial intelligence algorithms for automating parameter optimisation.

None.

None.

Acknowledgements

Conflict of Interest

References

- [1] Ahrari, A., Atai, A.A., & Deb, K. (2020). A customized bilevel optimization approach for solving large-scale truss design problems. *Engineering Optimization*, 52(12), 2062-2079. doi: 10.1080/0305215X.2020.1740690.
- [2] Azad, S.K., & Aminbakhsh, S. (2021). High-dimensional optimization of large-scale steel truss structures using guided stochastic search. *Structures*, 33, 1439-1456. doi: 10.1016/j.istruc.2021.05.035.
- [3] Azizi, M., Aickelin, U., Khorshidi, H.A., & Shishehgarhaneh, M.B. (2022). Shape and size optimization of truss structures by Chaos game optimization considering frequency constraints. *Journal of Advanced Research*, 41, 89-100. doi: 10.1016/j.jare.2022.01.002.
- [4] Basara, M., Kovalchuk, Y., & Shynhera, N. (2021). Durability of a welded truss under cyclic loads. *Innovative Solution in Modern Science*, 5(41), 147-158. doi: 10.26886/2414-634X.5(41)2020.11.
- [5] Cao, H., Sun, W., Chen, Y., Kong, F., & Feng, L. (2023). Sizing and shape optimization of truss employing a hybrid constraint-handling technique and manta ray foraging optimization. *Expert Systems with Applications*, 213(B), article number 118999. doi: 10.1016/j.eswa.2022.118999.
- [6] Caredda, G., Porcu, M. C., Buitrago, M., Bertolesi, E., & Adam, J.M. (2022). Analysing local failure scenarios to assess the robustness of steel truss-type bridges. *Engineering Structures*, 262, article number 114341. doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114341.
- [7] Danylchenko, L. (2021). *Methodical workshop on the topic: "Engineering analysis in Ansys Workbench" in the discipline: "Computer modelling of materials processing processes" for practical classes and independent work of applicants for the educational level of Doctor of Philosophy in speciality 131 "Applied Mechanics"*. Ternopil: Ternopil Ivan Pului National Technical University.
- [8] Parisi, F., Mangini, A.M., Fanti, M.P., & Adam, J.M. (2022). Automated location of steel truss bridge damage using machine learning and raw strain sensor data. *Automation in Construction*, 138, article number 104249. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104249.
- [9] Hohol, M., Gasii, G., Pents, V., & Sydorak, D. (2020). Structural-parametric synthesis of steel combined trusses. In V. Onyshchenko, G. Mammadova, S. Sivitska & A. Gasimov (Eds.), *Proceedings of the 3rd international conference on building innovations. ICBI 2020. Lecture notes in civil engineering* (Vol. 181, pp. 163-171). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-85043-2_16.
- [10] Hrebenuk, S., & Homeniuk, S. (2022). *Numerical methods for solving mechanical problems*. Zaporizhzhia: ZNU.
- [11] Hudz, S., Storozhenko, L., Gasii, G., & Hasii, O. (2019). Features of operation and design of steel sloping roof purlins. In V. Onyshchenko, G. Mammadova, S. Sivitska & A. Gasimov (Eds.) *Proceedings of the 2nd international conference on building innovations. ICBI 2019. Lecture notes in civil engineering* (Vol. 73, pp. 65-73). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-030-42939-3_8.
- [12] Huynh, T.N., Do, D.T., & Lee, J. (2021). Q-Learning-based parameter control in differential evolution for structural optimization. *Applied Soft Computing*, 107, article number 107464. doi: 10.1016/j.asoc.2021.107464.
- [13] Kaveh, A., Khodadadi, N., & Talatahari, S. (2021). A comparative study for the optimal design of steel structures using CSS and ACSS algorithms. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 11(1), 31-54.
- [14] Khodadadi, N., & Mirjalili, S. (2022). Truss optimization with natural frequency constraints using generalized normal distribution optimization. *Applied Intelligence*, 52, 10384-10397. doi: 10.1007/s10489-021-03051-5.
- [15] Kovalchuk, Y., Shynhera, N., & Shved, Y. (2023). Formation of input information arrays for computer simulation of welded trusses behavior under thermal force effects. *Scientific Journal of TNTU*, 110(2), 118-124. doi: 10.33108/visnyk_tntu2023.02.118.
- [16] Liu, H., Yang, Z., Zhou, T., Wang, L., & Chen, Z. (2024). Study on updating finite element model of steel truss structure based on knowledge-enhanced deep reinforcement learning. *Engineering Structures*, 316(1), article number 118576. doi: 10.1016/j.engstruct.2024.118576.
- [17] López, S., Makoond, N., Sánchez-Rodríguez, A. & Adam, J.M., & Riveiro, B. (2023). Learning from failure propagation in steel truss bridges. *Engineering Failure Analysis*, 152, article number 107488. doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107488.
- [18] Mousavi, A.A., Zhang, C., Masri, S.F., & Gholipour, G. (2020). Structural damage localization and quantification based on a CEEMDAN Hilbert transform neural network approach: A model steel truss bridge case study. *Sensors*, 20(5), article number 1271. doi: 10.3390/s20051271.
- [19] Mousavi, A.A., Zhang, C., Masri, S.F., & Gholipour, G. (2022). Structural damage detection method based on the complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise: A model steel truss bridge case study. *Structural Health Monitoring*, 21(3), 887-912. doi: 10.1177/14759217211013535.

- [20] Pierezan, J., dos Santos Coelho, L., Mariani, V.C., de Vasconcelos Segundo, E.H., & Prayogo, D. (2021). Chaotic coyote algorithm applied to truss optimization problems. *Computers & Structures*, 242, article number 106353. doi: 10.1016/j.compstruc.2020.106353.
- [21] Shved, Y., Kovalchuk, Y., Shynhera, N., & Voronchak, V. (2020). Fatigue damage of the heel joint of welded roof truss. *Scientific Journal of TNTU*, 99(3), 28-33. doi: 10.33108/visnyk_tntu2020.03.028.
- [22] Strelets-Streletsky, E., Zhuravlev, A., & Vodopyanov, R. (2019). *LIRA-CAD. Book I. Fundamentals*. Kyiv: LIRALAND.
- [23] Weng, G., Wang, J., Liu, Y., Zhu, X., & Dai, J. (2020). Magnetic stress sensing system for nondestructive stress testing of structural steel and steel truss components based on existing magnetism. *Sensors*, 20(14), article number 4043. doi: 10.3390/s20144043.
- [24] Wu, W., He, X., He, L., Wu, C., He, J., & Zhu, A. (2022). Joints fatigue damage prediction for a steel truss suspension bridge considering corrosion environment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 4879-4892. doi: 10.1007/s13369-021-06318-8.

Максим Омелян

Аспірант

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

46001, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, Україна

<https://orcid.org/0009-0008-7501-5318>

Методика скінченно-елементного моделювання параметрів напружено-деформівного стану плоскої ферми з паралельними поясами

Анотація. Мета роботи полягає у створенні методики моделювання напружено-деформованого стану плоскої ферми з паралельними поясами за допомогою мультипакетного програмного забезпечення, заснованого на методі скінченних елементів. Встановлено, що програмні комплекси ЛІРА-САПР 2016 R5 та ANSYS Workbench 14.5 є найбільш ефективними для розрахунків параметрів напружено-деформівного стану плоских ферм, оскільки забезпечують високу ефективність моделювання завдяки розвиненій функціональності та адаптованості до завдань інженерного аналізу. У процесі дослідження було здійснено аналіз можливостей та інтерфейсів зазначених програмних середовищ, а також проведено моделювання для ферми з трикутною решіткою та розмірами 18000×3600 мм, виготовленої з конструкційної сталі ВСт3пс. Розроблено геометричні та скінченно-елементні моделі ферми в середовищах виявлених розрахункових комплексів. Для моделювання застосовувалися елементи з прокатних кутників із поперечним перерізом 100×100×10 мм, а вузлові косинки були виконані зі сталевих листа товщиною 10 мм. Для моделі ферми в ANSYS Workbench 14.5 створено скінченно-елементну сітку з дискретизацією розмірів, зокрема для фасонки, що забезпечує точніше визначення параметрів напружено-деформівного стану НДС у критичних зонах ферми. В ЛІРА-САПР 2016 R5 модель ферми розбита на елементи 10х10 мм. Запропонована методика включає два основні етапи: на першому етапі створюється модель для визначення напружено-деформівного стану ферми і середовищі програмного комплексу ЛІРА-САПР 2016 R5, на другому в середовищі розрахункового комплексу ANSYS Workbench 14.5 аналізуються отримані результати для оптимізації конструктивних параметрів. Застосування цієї методики дозволяє значно скоротити час, необхідний для проектування та розрахунків, що сприяє підвищенню ефективності конструювання ферм з паралельними поясами. Практична цінність розробки полягає в можливості оптимізації форм та розмірів поперечних перерізів елементів, що позитивно впливає на економічну ефективність проєктованих ферм, знижуючи витрати на матеріали та забезпечуючи довговічність конструкцій

Ключові слова: комп'ютерна симуляція, скінченні елементи, оптимізація, стрижневі конструкції, інженерний аналіз, варіаційні методи розрахунку

В'ячеслав Павленко*

Кандидат технічних наук, доцент
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0796-4307>

Віталій Павленко

Доктор технічних наук, професор
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, вул. Вадима Манька, 17, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6871-2133>

Володимир Мануйлов

Підполковник
Національна академія Національної гвардії України
61001, майдан Захисників України, 3, м. Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7306-9138>

Володимир Кужель

Кандидат технічних наук, доцент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5646-0274>

Антоніна Буда

Кандидат технічних наук, доцент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1055-1880>

Хмарні рішення для інтеграції та аналізу даних дистанційного моніторингу транспортних засобів

Анотація. Дослідження спрямоване на розробку концепції інтелектуальної системи дистанційного моніторингу автотранспорту, що базується на інтеграції хмарних технологій та аналізі великих даних. Очікується, що результати цього дослідження стануть основою для створення нових сервісів в області автомобільної телематики та сприятимуть розвитку «розумних» міст та знайдуть широке застосування в автосервісі та транспортних компаніях, сприяючи підвищенню ефективності та надійності автопарку. Також в роботі розглядаються питання безпеки даних, ефективності передачі інформації та масштабованості рішень, що мають ключове значення для надійного функціонування систем віддаленого моніторингу. Забезпечення конфіденційності та цілісності даних є першочерговим завданням, що потребує впровадження передових методів шифрування та управління доступом. Ефективність передачі інформації відіграє вирішальну роль в умовах великої кількості даних, що надходять від транспортних засобів, а масштабованість систем дозволяє їм адаптуватися до зростаючих потреб підприємств. Перспективні системи діагностики дадуть змогу автосервісам і виробникам транспортних засобів значно підвищити ефективність обслуговування автопарків.

Suggested Citation:

Pavlenko, V., Pavlenko, V., Manuylov, V., Kuzhel, V., & Buda, A. (2024). Cloud solutions for data integration and analysis in remote vehicle monitoring. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 109-117. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.109.

*Corresponding author



Завдяки можливості віддаленого завантаження спеціалізованого програмного забезпечення, діагностика стане більш точною і оперативною. Стандартизація інтерфейсів бортових систем дасть змогу скоротити витрати на обладнання та спростити навчання персоналу. Крім того, акцент зроблено на практичних аспектах застосування хмарних технологій у реальних умовах експлуатації транспортних систем. Практичний підхід передбачає аналіз конкретних кейсів та прикладів використання хмарних платформ для моніторингу різних типів транспортних засобів. Зокрема, розглядаються питання впровадження хмарних рішень в автотранспортних підприємствах, залізничних компаніях та морських перевізниках. Висновки роботи містять рекомендації щодо впровадження та оптимізації хмарних рішень для моніторингу транспортних засобів, що дозволяють знизити витрати на обслуговування, підвищити безпеку та ефективність експлуатації транспортних систем. Об'єднання діагностичних даних з хмарними платформами для віддаленого технічного обслуговування стає відповіддю на виклики сучасного автомобільного господарства. Інтеграція цих технологічних рішень спрямована на поліпшення якості обслуговування, забезпечення безпеки експлуатації, а також зменшення часу та витрат на технічне обслуговування

Ключові слова: автотранспортні засоби; експлуатаційна надійність; запасні частини; невизначеність; ефективність; транспортний процес

Вступ

У сучасному світі розвиток хмарних технологій відкриває нові горизонти в сфері управління та моніторингу транспортних засобів. Використання хмарних рішень дозволяє значно підвищити ефективність збору, обробки та аналізу даних, що надходять від різних сенсорів та пристроїв, встановлених на транспортних засобах. Хмарні технології та Інтернет речей (IoT – Internet of Things) – це дві потужні сили, які змінюють наш світ. Хоча вони можуть існувати окремо, їхня взаємодія відкриває нові можливості. Хмари надають IoT необмежені обчислювальні ресурси, дозволяючи пристроям працювати ефективніше та інтелектуальніше. Об'єднання цих двох концепцій дозволяє створити розумні, самоорганізовані системи, які можуть оптимізувати виробничі процеси, покращити якість життя та вирішити глобальні проблеми. Синтез хмарних технологій та (IoT) відкриває нові горизонти в області обробки даних. Хмара забезпечує масштабованість та гнучкість, необхідні для обробки великих обсягів даних, які генеруються пристроями Інтернету речей. Це дозволяє створювати інтелектуальні системи, здатні самонавчатися та адаптуватися до змін. Питання застосування аналізу даних великого обсягу з використанням хмарних обчислень для розв'язання різних задач аналізу в транспортній галузі є дуже актуальним.

Для такого типу досліджень дуже слід застосовувати методи вивчення існуючих підходів до інтеграції діагностичних даних з хмарними платформами та IoT; створення прототипів системи інтеграції для перевірки

та тестування в реальних умовах; аналіз стійкості та заходів безпеки при передачі та обробці діагностичних даних у віддалених середовищах.

Розвиток сучасних мікропроцесорних технологій та електроніки сприяв активному впровадженню систем моніторингу в автомобільній галузі. Вони забезпечують контроль за переміщенням транспортних засобів та постійне відстеження їхніх параметрів. Виділяють два основні типи контролю: моніторинг параметрів та контроль технічного стану ТЗ. Головна відмінність між ними полягає у використанні інтерпретатора для аналізу параметрів у першому випадку та спеціалізованої системи прийняття рішень щодо подальшої експлуатації у другому. Впровадження таких систем сприяє підвищенню ефективності управління транспортними потоками, а також оптимізації перевезень вантажів і пасажирів [1]. Виробники та розробники подібних рішень інтегрують технології дистанційного зв'язку між транспортними засобами та операційними центрами, що забезпечує своєчасний обмін даними та підвищує надійність експлуатації транспорту [2, 3].

Одним з прикладів такої розробки є транспортно-інформаційна система Dynafleet, (система дозволяє користувачеві переглядати низку параметрів у реальному часі, включаючи поточне місцезнаходження автомобіля, споживання палива транспортним засобом, час роботи водія, викиди автомобіля та інтервали обслуговування), яка обслуговує автомобілі від компанії Volvo (Рис. 1).

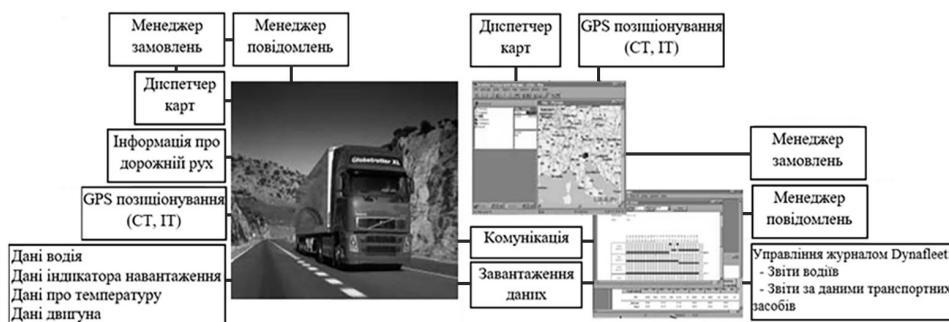


Рисунок 1. Структурна схема системи моніторингу транспорту Dynafleet

Джерело: розроблено авторами

Система Dynafleet забезпечує інтеграцію телематичних модулів, які виконують функції навігаційних приймачів. Це дає змогу зчитувати важливі параметри транспортного засобу через шину CAN, зокрема:

- ◆ частоту обертів двигуна;
- ◆ стан гальмівної системи;
- ◆ пройдений кілометраж;
- ◆ швидкість пересування;
- ◆ споживання пального.

Телематична система Dynafleet оснащена стандартним API-інтерфейсом, що дає можливість передавати зібрані дані в інші програмні платформи, наприклад, у системи логістичного управління перевезеннями. Отримана інформація надсилається оператору для подальшого аналізу ефективності експлуатації транспортного засобу, а також оцінювання якості водіння на основі даних про швидкість, витрати пального та інші показники керування.

Аналіз функціонування та розвитку інформаційно-транспортних систем моніторингу, таких як Dynafleet, дозволив виявити їхній основний недолік – відсутність оцінки ряду ключових умов експлуатації транспортних засобів. Це є важливим чинником для підвищення показників їхньої надійності та ефективності роботи.

Іноземні системи, такі як Caretrack і ruDi, забезпечують контроль технічного стану, моніторинг та управління ТЗ, які можуть функціонувати на всій території з покриттям мобільного зв'язку GSM/GPRS. Багато інших менш відомих систем також здатні працювати у великих та складних мережах, маючи розширені можливості інтерфейсу. Однак їхній головний недолік – неможливість оперативного управління експлуатацією ТЗ з урахуванням реальних дорожніх і експлуатаційних умов. Крім того, такі системи не враховують сучасні особливості експлуатації ТЗ, що, згідно з теоретичними основами технічної експлуатації автомобілів, є неприйнятним [3].

Система OnStar, розроблена компанією GM, об'єднує мобільний зв'язок, допомогу в дорозі, екстрене реагування та дистанційну діагностику, що працює на основі технології DTCs [2, 4]. Загалом, ця система надає власникам транспортних засобів широкий спектр сервісних послуг, серед яких:

- ◆ можливість проведення віддаленої діагностики технічного стану автомобіля;
- ◆ екстрений виклик сервісного центру GM або найближчих служб порятунку (швидкої допомоги, пожежної охорони, поліції тощо);
- ◆ допомога у визначенні найбільш оптимального маршруту руху;
- ◆ консультаційна підтримка водія у випадку дорожньо-транспортної пригоди;
- ◆ сприяння у розшуку викраденого автомобіля;
- ◆ додаткові технічні та інформаційні послуги.

Система дистанційної діагностики OnStar дозволяє здійснювати перевірку понад 400 кодів несправностей, що надходять від різних компонентів, підсистем і механізмів транспортного засобу.

Для моніторингу ТЗ компанія Caterpillar використовує пристрої Product Link, які забезпечують

двосторонній обмін інформацією між вбудованими системами спеціалізованої дорожньої техніки (СДТ) або транспортного засобу та операторським комп'ютером [2]. Передача даних здійснюється через інтернет-портал Dealer Storefront [2]. Повідомлення від СДТ надходять через супутникові канали зв'язку в центр управління OrbComm, після чого передаються в штаб-квартиру Caterpillar для подальшого аналізу ефективності використання техніки із застосуванням клієнтських серверів бази даних. Подібні телематичні рішення впроваджують і інші виробники ТЗ і СДТ, серед яких John Deere, Volvo та інші [5, 6].

У країнах ЄС поширена інтегрована система Mucarevent [2, 7], яка є частиною європейської мережі екстреної допомоги для транспортних засобів. Вона розроблена з урахуванням того, що штатна система бортової діагностики OBD не завжди здатна точно визначити причини несправностей, тому необхідні додаткові дані. Проект Mucarevent орієнтований на співпрацю ключових учасників ринку: офіційних та незалежних сервісних центрів, виробників автомобілів, а також компаній, що спеціалізуються на технічному обслуговуванні та ремонті транспортних засобів.

Результати

Значний обсяг даних, що генерують IoT-додатки, змушує багато компаній обирати обробку інформації у хмарних сервісах, замість розгортання власної масштабованої інфраструктури. Провідні постачальники хмарних технологій уже активно пропонують свої рішення: Microsoft представила платформу Azure IoT, тоді як Amazon Web Services пропонує широкий спектр IoT-послуг, аналогічно до Google Cloud. Технології Інтернет речей та хмарних обчислень стрімко розвиваються, кожна зі своїми особливостями. Інтернет речей базується на інтелектуальних пристроях, які функціонують у глобальній мережі та динамічному середовищі. Основною характеристикою IoT є велика кількість розподілених пристроїв із обмеженими ресурсами для зберігання та обробки даних. Такі пристрої часто стикаються з викликами, пов'язаними з продуктивністю, надійністю, безпекою та конфіденційністю. У свою чергу, хмарні обчислення працюють на основі потужної інфраструктури з практично необмеженими ресурсами для збереження та обробки даних [8].

Практичне застосування IoT та хмарних обчислень можна продемонструвати на прикладі автомобіля. Після тривалої подорожі власник повертається додому, і його транспортний засіб повідомляє про можливі несправності через індикатор на панелі приладів. Виникає питання: чи це незначна проблема, чи варто негайно звернутися до автосервісу? Провівши базову діагностику, водій виявляє потенційні неполадки у гальмівній системі, що може потребувати уваги спеціаліста.

У цьому випадку датчик розриву виявив несправність і надіслав відповідне сповіщення. Аналогічно, у транспортному засобі функціонує безліч інших сенсорів, які передають сигнали про потенційні проблеми

на центральний контролер, розташований поруч із панеллю приладів. Контролер аналізує отримані дані та в потрібний момент відображає попередження на екрані. Таким чином, як ми бачимо, декілька невеликих пристроїв синхронізовано взаємодіють для виконання завдання, яке інакше вимагало б значних зусиль.

Взаємозв'язок Інтернет речей і хмарних технологій. Сьогодні мільйони компаній і розробників займаються створенням рішень, що поєднують Інтернет речей та хмарні обчислення. Ця технологія трансформувала безліч сфер – від логістики та освіти до будівництва й архітектури. IoT сприяє спрощенню повсякденного життя, забезпечує автоматизований контроль безпеки,

діагностику несправностей, передачу даних у реальному часі, роботизацію процесів і навіть виконує завдання, які раніше потребували значних людських ресурсів.

Хмарні рішення для Інтернету речей. Хмарні платформи IoT створені для ефективного та економічно доцільного використання інфраструктури, інформаційних потоків і програмного забезпечення. Попри те, що хмарні обчислення та Інтернет речей мають певні відмінності, їх функціональні можливості доповнюють одна одну. Як показано в Таблиці 1, саме ця взаємодоповнюваність стала основним фактором, який спонукає дослідників до інтеграції хмарних технологій та Інтернету речей.

Таблиця 1. Особливості Інтернет речей та хмари

Пункти	IoT (Internet of Things)	Хмарне обчислення
Основні характеристики	IoT охоплює реальні об'єкти, які присутні повсюди у фізичному світі.	Хмарні технології забезпечують універсальний доступ до ресурсів, які існують у віртуальному середовищі.
Обчислювальна потужність	Пристрої IoT мають обмежені можливості для виконання складних обчислень.	Віртуальні обчислювальні ресурси в хмарі практично необмежені.
Обсяг зберігання даних	Місце для збереження інформації в IoT-пристроях обмежене або може бути відсутнім.	Хмарні платформи пропонують необмежені сховища для зберігання даних.
Підключення	Інтернет слугує основним каналом для об'єднання IoT-пристроїв.	Інтернет використовується для надання та доставки послуг.
Взаємодія з великими даними	IoT генерує великі обсяги інформації.	Хмара забезпечує обробку та управління великими даними.

Джерело: розроблено авторами

Поєднання хмарних технологій та Інтернету речей (IoT) є оптимальним рішенням. У стандартному впровадженні IoT діє велика кількість сенсорів (від десятків до тисяч), які збирають інформацію та передають її в централізовану систему для подальшого аналізу. Завдяки хмарним технологіям оператори мобільних мереж можуть отримувати доступ до даних датчиків із будь-якої точки світу через Інтернет. Це дозволяє їм переглядати та обробляти інформацію незалежно від місця розташування за допомогою підключених пристроїв.

Без використання хмарних технологій об'єднання даних IoT на великих територіях і різних пристроях стає набагато складнішим. Багато компаній, що працюють у сфері IoT, пропонують спеціалізовані платформи у форматі SaaS, які допомагають керівникам віддалено контролювати свої підключені пристрої та аналізувати

отримані дані. Водночас хмарні сервіси надають можливість компаніям зберігати та обробляти значні обсяги інформації з мінімальними витратами, що відкриває широкі можливості для аналізу великих даних.

Згідно з численними дослідженнями, архітектура IoT поділяється на три основні рівні: рівень застосування; рівень сприйняття; мережевий рівень. Більшість експертів вважають, що мережевий рівень відповідає хмарному середовищу, яке реалізує хмароорієнтовану архітектуру IoT, як зображено на Рисунку 2. Рівень сприйняття відповідає за ідентифікацію об'єктів і збір інформації з навколишнього середовища. Основна функція мережевого рівня полягає в передачі зібраних даних у хмару або через Інтернет. В свою чергу, рівень застосування надає користувачам інтерфейс для доступу до різноманітних сервісів.

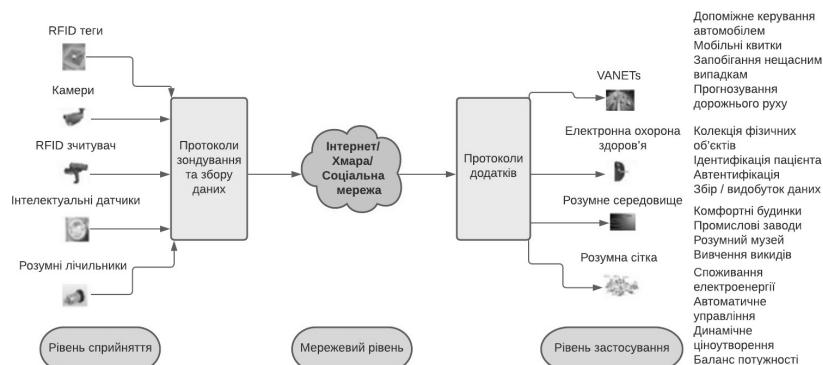


Рисунок 2. Архітектура IoT

Джерело: розроблено авторами

Інтернет речей (IoT) є однією з найперспективніших і найдинамічніших галузей інформаційних технологій на сьогодні. Концепція IoT передбачає взаємодію фізичних об'єктів («речей») з IT-системами, які збирають і обробляють дані про ці об'єкти або безпосередньо з них. Ця інформація може використовуватися для розробки різних додатків і сервісів, що прямо чи опосередковано пов'язані з цими об'єктами [9].

Сфера IoT охоплює широкий спектр застосувань, які охоплюють бізнес-сектор, державні установи та споживачів. Вона поєднує традиційно розрізнені галузі – інформаційні та операційні технології, сприяючи їхній інтеграції та розвитку.

Щоб забезпечити ефективне функціонування IoT-систем, необхідно розробляти архітектуру, принципи роботи та операційні механізми, які відповідатимуть вимогам щодо масштабованості, безпеки, надійності та конфіденційності. Серед основних сфер застосування технологій IoT можна виділити:

- ◆ промисловість і виробництво – контроль і управління промисловим обладнанням, оптимізація виробничих процесів на «розумних» фабриках;
- ◆ автоматизація будівель – інтегровані системи управління інженерними мережами будівель, що забезпечують безперебійну роботу всіх систем;
- ◆ інтелектуальні транспортні системи – технології управління дорожнім і залізничним транспортом для підвищення безпеки та ефективності перевезень;
- ◆ підключені автомобілі – системи, що надають водіям інформацію про дорожню ситуацію, а також «чорні ящики» для аналізу ризиків і визначення страхових тарифів;
- ◆ розумні міста – автоматизований моніторинг і контроль міських систем для підвищення ефективності управління та покращення якості життя мешканців;
- ◆ споживчі застосунки – сервіси на базі смартфонів та носимих пристроїв для покращення комфорту та персоналізації послуг;
- ◆ медицина – дистанційне спостереження за станом здоров'я пацієнтів, а також можливість віддаленого лікування;
- ◆ розумний дім – автономне керування житловими приміщеннями, включаючи контроль кліматичних систем, управління побутовими пристроями та автоматизацію закупівель витратних матеріалів, зокрема продуктів харчування.

Основою технології IoT є електронні пристрої, які взаємодіють із фізичним середовищем, зокрема:

- ◆ датчики, що збирають інформацію про об'єкти та активність людей. Вони можуть мати різні форми: термометри та акселерометри фіксують числові показники, тоді як камери та мікрофони генерують аудіо- та відеопотоки, що містять складнішу інформацію. Також до IoT-систем входять маяки та датчики вантажів;
- ◆ виконавчі механізми, які впливають на фізичні об'єкти. Це можуть бути, наприклад, реле для керування обладнанням (обігрівачі, виробничі деталі) або дисплеї, які надають інформацію водіям та операторам.

Основні аспекти IoT-систем, що впливають на їхню архітектуру та реалізацію:

◆ масштабованість – стосується кількості підключених датчиків і виконавчих механізмів, обсягу даних, швидкості їхнього обміну, а також необхідної обчислювальної потужності;

◆ обробка великих даних – сучасні IoT-рішення потребують аналізу величезних масивів інформації. Поєднання різних джерел даних для отримання нових знань є ключовою характеристикою таких систем;

◆ хмарні обчислення – IoT-системи часто використовують хмарні платформи для зберігання та обробки даних, що забезпечує гнучкість і масштабованість аналітичних процесів;

◆ реальний час – IoT-рішення функціонують у режимі реального часу, що вимагає швидкої обробки інформації та оперативного реагування на події;

◆ неоднорідність – IoT включає широкий спектр пристроїв, мереж і компонентів. Для забезпечення зв'язку між ними використовуються IoT-шлюзи;

◆ безпека та конфіденційність – розподілені IoT-системи потребують надійного захисту, який має відповідати масштабованим і динамічним вимогам;

◆ відповідність стандартам – для успішного функціонування IoT-рішень необхідно дотримуватися нормативних вимог і галузевих стандартів;

◆ інтеграція – IoT-системи повинні взаємодіяти з уже існуючими технологічними та корпоративними рішеннями, такими як виробничі лінії, автомобільні системи управління, бази даних тощо.

Розуміння архітектури IoT передбачає знання мобільних пристроїв, веб-хостингу, роботи з великими даними та аналітичних можливостей. Кожне рішення IoT може включати п'ять ключових доменів:

◆ користувацький рівень не прив'язаний до жодного конкретного мережевого домену. Він може бути частиною будь-якого з них або знаходитися поза їхніми межами. Цей рівень містить користувачів IoT та їхні додатки;

◆ домен безконтактної мережі охоплює мережеві можливості, які зазвичай розширюють загальнодоступний мережевий простір. До цього домену належать пристрої (зокрема датчики, приводи, прошивки та керуючі агенти), а також фізичні об'єкти, які взаємодіють із мережею;

◆ домен загальнодоступної мережі включає джерела даних, що підтримують всю архітектуру IoT. Це можуть бути як традиційні корпоративні системи, так і нові джерела даних, отримані через IoT-пристрої. У цьому домені також відбувається взаємодія з іншими хмарними платформами;

◆ хмарний домен постачальника об'єднує дані з пристроїв, хмарних сервісів та інших джерел (наприклад, погодних служб). Використовуючи технології потокової обробки та інтеграції, хмара аналізує, фільтрує та трансформує ці дані в режимі реального часу. Також тут здійснюється їх збереження для подальшого аналізу;

◆ рівень доставки результатів забезпечує передачу обробленої інформації користувачам та додаткам. Він використовує трансформаційні механізми та підключені компоненти для безпечного обміну повідомленнями.

Однією з ключових особливостей IoT-систем є застосування логіки управління на різних рівнях ієрархії залежно від часових рамок і оброблюваних даних. Підсистеми управління та безпеки покривають усі рівні архітектури, забезпечуючи контроль і виконання політик для всіх даних та додатків. Крім того, проводиться моніторинг відповідності стандартам для перевірки ефективності контрольних механізмів [10].

Фізична сутність – це реальний об'єкт, який представляє інтерес і може бути підданий вимірюванню або керуванню за допомогою виконавчих механізмів. Вона є «річчю» в Інтернеті речей. Наприклад, у логістичній системі посилки виступають фізичними об'єктами, які можуть бути оснащені датчиками для моніторингу та ідентифікації, зокрема за допомогою RFID-міток або зчитувачів штрих-кодів. Водночас, пристрої для зчитування RFID-міток є окремими елементами системи, тоді як сама посилка залишається фізичним об'єктом.

Пристрій містить один або кілька датчиків, а також модуль для підключення до мережі, що дозволяє інтегрувати його в IoT-систему. У деяких випадках пристрій сам є фізичною сутністю, яку контролюють датчики, наприклад, акселерометр у смартфоні. Основні компоненти пристрою включають:

- ◆ датчик/виконавчий механізм – датчики реєструють певні параметри навколишнього середовища та перетворюють їх у цифровий формат, тоді як виконавчі механізми здійснюють певні дії у відповідь на ці дані;
- ◆ агент – забезпечує можливість дистанційного керування пристроєм, підтримує протоколи управління та може використовуватися в системах керування IoT;
- ◆ прошивка – програмне забезпечення, що відповідає за контроль і моніторинг роботи пристрою. Наприклад, у побутовій електроніці прошивка забезпечує управління пристроєм на низькому рівні;
- ◆ мережеве підключення – забезпечує зв'язок пристрою з IoT-системою. Зазвичай це локальна мережа з низьким енергоспоживанням, яка дозволяє підключити пристрій до шлюзу IoT.

Інтерфейс користувача – забезпечує взаємодію користувачів із додатками, датчиками, агентами та виконавчими механізмами. Однак деякі пристрої можуть не мати безпосереднього інтерфейсу, і вся взаємодія здійснюється через віддалене управління за допомогою мережевих технологій.

IoT Gateway – виступає як інтерфейс для підключення одного чи кількох пристроїв до загальнодоступної мережі, зазвичай Інтернету. Часто пристрої мають обмежене мережеве підключення і не можуть безпосередньо підключатися до Інтернету. Це може бути через обмеження енергоспоживання або інші фактори, які обмежують використання потужних мереж. Локальна мережа дає можливість пристроям обмінюватися даними з шлюзом IoT, який потім забезпечує зв'язок із загальнодоступною мережею. IoT Gateway також може виконувати додаткові функції, такі як фільтрація та обробка даних, надсилання і отримання команд з Інтернету та запуск локальної логіки додатків або служб.

Громадська мережа – включає в себе широкі мережі (зазвичай Інтернет), хмарні системи та крайові послуги. Peer Cloud – це хмарні системи сторонніх розробників, які надають послуги з передачі даних та підтримки можливостей IoT платформ. Такі хмари сприяють передачі даних у системах IoT та можуть надавати можливості, необхідні для роботи IoT. Наприклад, в системах, як Smart Cities, можуть бути задіяні поєднання кількох менших систем IoT, кожна з яких підтримує пристрої, програми та послуги, що взаємодіють через однорангові хмарні сервіси. Це дозволяє створювати складніші та масштабніші рішення.

Послуги Edge – забезпечують безпечну передачу даних з Інтернету в хмару постачальника та на підприємство. Вони також підтримують програми для кінцевих користувачів.

Провайдер Хмари – надає основні програми IoT та супутні сервіси, такі як зберігання даних пристроїв, аналітику, управління процесами в системі IoT, а також створення візуалізацій даних. Хмарне середовище забезпечує масштабованість і еластичність для роботи з великими обсягами даних і вимогами до швидкості обробки.

Трансформація та підключення IoT – забезпечують безпечне з'єднання між пристроями IoT. Цей компонент повинен бути здатним обробляти та маршрутизувати великі обсяги даних до потрібних компонентів в системі IoT.

Логіка додатків – це основні елементи програми, які зазвичай відповідають за взаємодію з IoT-даними пристроїв, виконання різних служб і підтримку програм для кінцевих користувачів. Логіка програми може включати робочі процеси, а також логіку управління, яка визначає, як використовувати виконавчі механізми для впливу на фізичні сутності в системах IoT, що містять такі механізми.

Візуалізація – надає користувачам можливість досліджувати та взаємодіяти з даними, які зберігаються в сховищах, а також з результатами аналітики в інсайт-додатках або корпоративних програмах. Візуалізація включає інтерфейс користувача для кінцевих користувачів, адміністративний інтерфейс, а також інформаційні панелі як підкомпоненти.

Інтерфейс кінцевого користувача – дозволяє взаємодіяти з корпоративними програмами, переглядати результати аналітики та виконувати інші операції. Цей інтерфейс включає як внутрішні, так і мобільні інтерфейси, орієнтовані на споживача.

Адміністративний інтерфейс – забезпечує доступ адміністраторам до показників, моніторинг даних та їх обробку.

Інформаційна панель – дозволяє користувачам переглядати різноманітні звіти. Інтерфейс адміністратора та інформаційна панель є внутрішніми інтерфейсами користувача.

Аналітика – полягає в знаходженні і передачі значущих патернів інформації з IoT-даних для опису, прогнозування та покращення ефективності бізнес-процесів. Сховище даних для аналітики підтримує роботу

з різними типами джерел даних (старими, новими та потоковими), корпоративними програмами, очищеними та довідковими даними, а також результатами потокової аналітики. Основні можливості аналітики включають: дослідження та архівування (для зберігання і аналізу великих обсягів даних за допомогою різних інструментів), глибоку аналітику та моделювання (застосування статистичних моделей для обробки великих масивів даних, включаючи неструктуровані і слабоструктуровані), інтерактивний аналіз та звітність (для відповіді на запитання бізнесу та операцій з великими даними), а також каталог даних.

Управління процесами – це діяльність, що охоплює планування, розробку, впровадження та моніторинг виконання бізнес-процесів. Система IoT може підтримувати управління процесами в теперішньому часі.

Сховище даних пристроїв – зберігає дані, що надходять від IoT-пристроїв, що дозволяє інтегрувати ці дані з процесами та програмами в рамках системи IoT. Оскільки пристрої можуть генерувати величезний обсяг даних у реальному часі, сховище даних повинно бути гнучким і здатним до масштабування.

Управління API – публікує каталоги та оновлює API для широкого кола середовищ розгортання. Це дозволяє розробникам та кінцевим користувачам швидко створювати рішення шляхом відкриття та повторного використання існуючих даних, аналітики та сервісів.

Управління пристроями – забезпечує ефективне та безпечне підключення пристроїв до хмарної платформи. Це включає в себе реєстрацію пристроїв, віддалене адміністрування, оновлення програмного забезпечення, дистанційне керування та контроль пристроїв.

Реєстр пристроїв – зберігає інформацію про пристрої, з якими система IoT може взаємодіяти, контролювати та керувати ними. Для підключення та керування пристроями до системи IoT їх, ймовірно, потрібно буде попередньо зареєструвати. Оскільки в розгортаннях IoT може бути велика кількість пристроїв, масштабованість реєстру є важливою.

Служба ідентифікації пристроїв – забезпечує надійну ідентифікацію пристроїв перед наданням їм доступу до системи та програм IoT. Ідентифікація допомагає зменшити ризики, пов'язані з підробленими пристроями чи серверами.

Безпека та конфіденційність – в рамках розгортань IoT необхідно враховувати як безпеку інформаційних технологій (ІТ), так і елементів технології операцій (ОТ). Увага до безпеки залежить від середовища застосування, структури бізнесу та оцінки ризику. Оцінка ризику включає аналіз потенційних загроз та атак, а також витрат, що можуть бути пов'язані з такими інцидентами. Крім того, підключення ІТ-систем до фізичних систем потребує врахування впливу безпеки IoT, щоб гарантувати, що процеси можуть бути розгорнуті та керовані таким чином, щоб система залишалася безпечною навіть при відключенні від інших частин розгортання.

Захист даних. Дані, що зберігаються на пристроях, передаються через загальнодоступні мережі, хмару

постачальника та корпоративні мережі, повинні бути захищені від несанкціонованого доступу та використання. Для цього застосовуються різні методи, зокрема, використання кількох рівнів захисту для боротьби з різними типами загроз або ізоляції даних від різних компонентів системи. Захист лінії зв'язку може бути доповнений шифруванням на рівні поля даних і підписанням, здійснюваним безпосередньо на пристрої, що гарантує наскрізний захист зв'язку. Дані, що знаходяться в спокої, можуть бути зашифровані в базі даних, на дисках або носіях для запобігання витокам і неправомірному використанню. Розширене збирання даних також вимагає додаткової уваги до конфіденційності, що включає розподіл, редагування та обробку даних. Особливо важливо враховувати, чи включаються в систему IoT особисті дані, що може тягнути за собою юридичні та нормативні вимоги, що часто називаються «конфіденційністю». Якщо є можливість ідентифікації пристроїв або даних з конкретною особою, ці дані можуть вважатися ідентифікаційними. Сукупні дані можуть бути використані для встановлення особи, до якої вони належать.

Моніторинг, аналіз і реагування на безпеку. У кожній системі має бути вбудований моніторинг для виявлення активних атак у реальному часі. Зважаючи на масштаб IoT-систем, кількість пристроїв і обсяг оброблюваної інформації, автоматизовані системи повинні бути здатні реагувати на відомі атаки та виявляти підозрілу поведінку. Реакція на атаки може включати тимчасову ізоляцію, карантин або вилучення частин системи IoT, а також формальні процеси для усунення виявлених вразливостей. Як і в ІТ-безпеці, виявлені уразливості повинні бути розкриті, щоб зацікавлені сторони могли вжити заходів з пом'якшення наслідків, зміни конфігурацій і своєчасного оновлення систем. Атаки можуть мати різні форми, зокрема, ін'єкцію фальшивих або хибних даних датчиків для маніпулювання автоматизованими системами, що приймають рішення.

Управління життєвим циклом IoT-системи є складним процесом, який охоплює управління ідентичністю, пристроями, ланцюгами постачання, розробку програмного забезпечення, а також управління змінами в уже розгорнутих системах. Всі ці елементи повинні враховувати безпеку для запобігання атакам, від шкідливих до ефективного управління криптографічними ключами. Код, ключі та фізичні компоненти повинні бути перевірені на всіх етапах – від закупівлі до встановлення на пристроях і шлюзах IoT. Система повинна також підтримувати можливість безпечного оновлення окремих компонентів для виправлення вразливостей і впровадження функціональних покращень протягом усього життєвого циклу. Аналогічні принципи безпеки застосовуються й до конфіденційності та захисту даних.

Висновки

Дослідження, проведене в роботі, демонструє, що Інтернет речей (IoT) стає все більш поширеною обчислювальною технологією, що вимагає великих обсягів зберігання даних та потужних можливостей для їх

обробки. Інтеграція хмарних технологій з IoT дозволяє обробляти та передавати різноманітні дані за кілька секунд в будь-яку точку світу, що є значною перевагою для суспільства, а також для автомобільної галузі. Об'єднання цих технологій створює синергію, оскільки вони доповнюють одна одну в різних аспектах функціональності. У роботі підкреслено важливість створення хмарного підходу до IoT. Обговорюється архітектура IoT на основі хмари, різноманітні сценарії застосування, а також проблеми, які виникають при інтеграції цих

технологій. Протягом наступних років буде розроблено багато IoT-систем, що охоплюють різні сфери, зокрема й автомобільну галузь. Такі системи складаються з численних компонентів, кожен з яких має свої власні виклики. Аспекти масштабування, швидкості, безпеки та конфіденційності в системах IoT потребують особливої уваги. Підхід, викладений у цій роботі, забезпечує надійну основу для розуміння систем IoT і вирішення різних завдань систематично та логічно, що має бути застосовано при експлуатації автомобілів.

Список використаної літератури

- [1] Volkov, V.P., Mateychik, V.P., Komov, P.B., Gritsuk, I.V., Smeshek, M., Volkova, T.V., & Tsyuman, M.P. (2015). *Intelligent transport monitoring systems*. Kharkiv: NAHU.
- [2] Volkov, V.P., Mateychik, V.P., Nikonov, O.Ya., Komov, P.B., Gritsuk, I.V., Volkov, Yu.V., & Komov E.A. (2013). *Integration of technical operation of vehicles into structures and processes of intelligent transport systems*. Donetsk: Publishing house "Knowledge".
- [3] Vasylyshyn, P.A., Redchuk, A.V., & Palamar, A.M. (2020). *Information and measuring system for monitoring the condition of vehicles using Internet of Things technology*. In *Proceedings of the VIII scientific and technical conference "Information models, systems and technologies"* (pp. 97). Ternopil: TNTU.
- [4] Kashkanov, A.A., Kuzhel, V.P., & Hrysyuk, O.G. (2010). *Information computer systems of road transport*. Vinnytsia: VNTU.
- [5] Volkov, V.P., Nikonov, O.Ya., & Volkov, Yu.V. (2014). *Methods of technical control of wheeled vehicles reliability*. *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko*, 151, 124-128.
- [6] Prilepsky, Yu.V., Hrytsuk, I.V., & Rybalko, I.F. (2012). *Development of an automatic control system for heat accumulation and pre-starting heating of an internal combustion engine*. *Scientific Works of the Donetsk National Technical University. Series: Computing and Automation*, 23, 43-48.
- [7] Volkov, V.P., Hrytsuk, I.V., Komov, A.P., & Volkov, Yu.V. (2014). *Features of monitoring and determining the status of vehicle malfunctions as part of the on-board information and diagnostic complex*. *Bulletin of the National Transport University*, 30(1). 51-62.
- [8] Zheng, X., Chen, W., Wang, P., Shen, D., Chen, S., Wang, X., & Yang, L. (2016). Big data for social transportation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(3), 620-630. doi: 10.1109/TITS.2015.2480157.
- [9] Fabbiani, E., Vidal, P., Massobrio, R. & Nesmachnow, S. (2016). Distributed Big Data analysis for mobility estimation in Intelligent Transportation Systems. In C. Barrios Hernández, I. Gitler & J. Klapp (Eds.), *High performance computing. CARLA 2016. Communications in computer and information science* (Vol. 697, pp. 146-160). Cham: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-57972-6_11.
- [10] Buyya, R., Broberg, J., & Goscinski, A.M. (2011). *Cloud computing principles and paradigms*. New York: Wiley Publishing.

Viacheslav Pavlenko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kharkiv National Automobile and Highway University
61002, 25 Yaroslav Mudryi Str., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0796-4307>

Vitaliy Pavlenko

Doctor of Technical Sciences, Professor
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
61070, 17 Vadym Manko Str., Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6871-2133>

Volodymyr Manuylov

Lieutenant-colonel
National Academy of the National Guard of Ukraine
61001, 3 Maidan Zahisnykiv Ukrainy, Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7306-9138>

Volodymyr Kuzhel

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5646-0274>

Antonina Buda

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1055-1880>

Cloud solutions for data integration and analysis in remote vehicle monitoring

Abstract. The research work is aimed at studying, developing and optimising a system for integrating diagnostic data with cloud platforms to implement remote monitoring of motor vehicles. The results of this research will not only help to increase the efficiency and availability of vehicle maintenance, but also identify new areas of development in the field of transport technology and cloud technologies. The paper also addresses the issues of data security, information transfer efficiency, and scalability of solutions, which are key to the reliable operation of remote monitoring systems. Ensuring the confidentiality and integrity of data is a top priority, requiring the implementation of advanced encryption and access control methods. The efficiency of information transmission plays a crucial role in the face of a large amount of data coming from vehicles, and the scalability of the systems allows them to adapt to the growing needs of enterprises. Future systems will allow, if necessary, downloading specialized diagnostic methods for troubleshooting from a remote service centre; standardization of functionality and interfaces of on-board vehicle monitoring systems of different manufacturers to reduce the range of test and diagnostic equipment. In addition, the emphasis is placed on the practical aspects of applying cloud technologies in real-world transportation systems. The practical approach involves analysing specific cases and examples of the use of cloud platforms for monitoring various types of vehicles. In particular, the paper considers the implementation of cloud solutions in road transport companies, railway companies and sea carriers. The conclusions of the paper include recommendations for the implementation and optimisation of cloud-based solutions for vehicle monitoring, which can reduce maintenance costs, improve the safety and efficiency of transport systems. Combining diagnostic data with cloud-based platforms for remote maintenance is becoming a response to the challenges of the modern automotive industry. The integration of these technological solutions is aimed at improving the quality of service, ensuring operational safety, and reducing maintenance time and costs

Keywords: cloud technology; data analysis; vehicles; Internet of Things; information transfer; cloud environment; intelligent transportation systems

Ivan Riasnyi*

Master

Institute of Naval Forces of the National University "Odesa Maritime Academy"

65029, 8 Didrichson Str., Odesa, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0008-4992-880X>

Anton Ivanenko

Bachelor

Institute of Naval Forces of the National University "Odesa Maritime Academy"

65029, 8 Didrichson Str., Odesa, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0000-8780-5730>

Improving ship manoeuvring accuracy in shallow water: The role of navigation equipment and hull design

Abstract. The study was conducted to analyse the impact of modern navigation equipment and ship hull design on improving the accuracy of manoeuvring in shallow water. The study used methods of analysis and comparison of the effectiveness of modern navigation equipment, evaluation of ship hull design solutions, and integration of these technologies to improve the accuracy of manoeuvring in shallow water. It was found that the use of modern dynamic positioning (DP) systems and high-precision navigation equipment, such as satellite systems and electronic mapping systems, significantly improves the accuracy of ship manoeuvring in shallow water. Ships with a flat hull and minimal draft were found to have better manoeuvrability compared to traditional designs. Optimisation of the bow shape and the use of stabilisers can reduce water resistance and improve handling. The use of highly sensitive steering systems improves steering precision in limited spaces. It was concluded that the integration of these technologies can significantly improve the safety of navigation in shallow water. It was also found that high-resolution radars and automatic identification systems effectively reduce the risk of collisions when manoeuvring in narrow channels and ports. In addition, vessels with an improved hull design were found to have reduced hydrodynamic resistance, which helps to reduce fuel consumption in shallow water. The study provided practical recommendations for implementing modern navigation systems and improving ship hull design, which increases the accuracy of manoeuvring in shallow water and improves navigation safety. Overall, the results confirmed the importance of integrating navigation technologies with hull design solutions to improve the efficiency and safety of navigation

Keywords: dynamic positioning systems; bow shape optimisation; design solutions; collision risk; hydrodynamic resistance

Introduction

In modern navigation, the accuracy of ship manoeuvring in shallow water is critical to ensuring the safety and efficiency of operations in narrow channels and coastal areas. Shallow water presents particular challenges for ship drivers, as the limited depth of the water can lead to increased hydrodynamic resistance and difficulty controlling the vessel.

In this context, the role of modern navigation equipment and optimised hull design becomes particularly relevant. The use of advanced technologies such as dynamic positioning systems (DP), Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS) can significantly improve manoeuvring

Suggested Citation:

Riasnyi, I., & Ivanenko, A. (2024). Improving ship manoeuvring accuracy in shallow water: The role of navigation equipment and hull design. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 118-129. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.118.

*Corresponding author



accuracy, reduce the risk of collisions and ensure more efficient use of water space. In addition, improvements in the design of the ship's hull, including optimising the shape of the bow and using stabilisers, help to reduce hydrodynamic resistance and improve handling.

Managing vessels in shallow water is a complex task that requires improved navigation and design solutions to ensure accurate manoeuvring. The problem of manoeuvring accuracy in conditions of limited space and water depth has been considered in numerous studies. X. Zhang *et al.* (2021) emphasised the importance of implementing automated navigation systems to improve manoeuvring in conditions of limited depth. The researchers emphasised that these systems minimised the impact of the human factor, which is especially important in difficult shallow water conditions. Y. An *et al.* (2021) investigated the effect of ship design on their ability to manoeuvre in conditions of limited depth. They showed that optimising the shape of the hull reduced water resistance and improved ship efficiency, but did not sufficiently consider the impact of such innovations on fuel consumption and environmental aspects. R. Okuda *et al.* (2022) investigated the impact of ship design on their ability to manoeuvre in shallow water. They proved that hulls with reduced draft and optimised shape reduced water resistance, which improved the efficiency of ships.

Design solutions for improving the stability of vessels during manoeuvring in shallow waters were investigated by M. Maljković *et al.* (2024). The researchers confirmed that such solutions are effective and significantly improve the handling of ships. The role of intelligent control systems in performing complex manoeuvres with minimal errors in unstable conditions was confirmed by H. Zhou *et al.* (2022). The researchers noted that these systems reduce the load on the crew and increase the accuracy of manoeuvring. International standards in navigation technologies that provide a single platform for innovation, according to J.H. Lim *et al.* (2023), are important for the development of shipbuilding. This was also confirmed by A. Oruc *et al.* (2022), drawing attention to the fact that standardisation allows for more efficient integration of new control and navigation systems. O.P. Igbinenikaro *et al.* (2024) added that combining engineering solutions with new technologies is key to ensuring the safety of navigation in shallow water conditions. S. Zhang *et al.* (2023), X. Wang & E.H. Xu (2022) also stressed the importance of innovations in hull design to improve manoeuvrability and reduce the risk of running aground.

The purpose of the study was to find out how the latest navigation devices and the shape of the ship help ships to navigate more accurately in shallow water. Research objectives:

1. To analyse the effectiveness of modern navigation systems, such as GNSS and ECDIS, in improving the accuracy

of ship manoeuvring in shallow water and their impact on reducing the risk of collisions and improving safety.

2. To investigate the impact of optimising the design of the hull of ships, including stabilisers and improving the shape of the bow, on reducing hydrodynamic resistance and improving manoeuvrability in limited conditions.

3. To evaluate the economic aspects of introducing new navigation and design technologies, in particular, their effectiveness in reducing fuel consumption and improving the overall efficiency of navigation in shallow water.

Materials and Methods

The study analysed key aspects of both navigation equipment and hull design to determine the most effective technologies and design solutions that affect the manoeuvrability and safety of navigation in limited spaces. The main components of navigation equipment that have been evaluated are GNSS, such as the Global Positioning System (GPS) and the BeiDou Navigation Satellite System (BDS), which provide accurate positioning of ships in narrow water spaces. The analysis included comparison of the accuracy of various satellite systems in real-world navigation conditions. ECDIS was examined in terms of its ability to integrate depth, obstacle and channel marking data to help avoid underwater threats and provide detailed electronic charts. The Automatic Identification System (AIS) was considered in terms of their effectiveness in tracking the position of neighbouring vessels and avoiding collisions, especially in narrow channels and port areas. High-resolution radars were evaluated for their ability to detect underwater objects and coastlines, especially in low visibility and shallow water conditions. DP systems have been investigated in terms of their functionality in maintaining a fixed ship position in shallow water without using an anchor, which reduces the risk of damage to the sea floor.

Research on ship hull design has focused on several aspects that affect manoeuvrability in shallow water. The efficiency of using wide and flat hulls to reduce the ship's draft and increase its stability in shallow water was evaluated, and the influence of various hull shapes on water resistance was studied. The effect of stabilisers on the ship's hull on improving handling and reducing drift was studied, and the effectiveness of different types of stabilisers was compared. The analysis of the bow shape of the ship concerned the effect of the optimised shape on reducing hydrodynamic resistance, and the effectiveness of various design solutions in improving handling in shallow water was evaluated. Research on modern high-sensitivity steering systems has covered their ability to perform precise manoeuvres in narrow and limited conditions, and the efficiency of using two steering blades or steering machines. The following equations were used in the study:

1. Equation for determining GPS accuracy (1):

$$\text{Accuracy} = \sqrt{(\text{GPS Error}_{\text{horizontal}})^2 + (\text{GPS Error}_{\text{vertical}})^2}, \quad (1)$$

where *GPS Error_{horizontal}* – horizontal error of GPS; *GPS Error_{vertical}* – vertical error of GPS.

2. Equation for determining ship draft (auxiliary equation for stability) (2):

$$\text{Draft} = \frac{W}{\rho \times A}, \quad (2)$$

where W – ship weight; ρ – water density; A – cross-sectional area of the hull at water level.

3. Equation for calculating the stabiliser moment (3):

$$M = C_d \times \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A, \quad (3)$$

where M – moment of stabilisation; C_d – stabiliser resistance coefficient; V – ship velocity; A – stabiliser area.

4. Equation for calculating water resistance (4):

$$R = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A \times C_d, \quad (4)$$

where R – water resistance; A – surface area in contact with water; C_d – resistance coefficient.

5. Equation for calculating the moment of force required for steering (5):

$$M = \frac{F \times d}{\sin(\theta)}, \quad (5)$$

where M – moment of force; F – force on the steering system; d – distance to the point of force application; θ – steering angle.

An important aspect of the study was the integration of navigation equipment with the hull design. The analysis included how data from radars and ECDIS can be used to automatically adjust the position of the ship's hull, which helps to reduce the impact of hydrodynamic forces. Ways to improve the efficiency of DP systems in vessels with improved hull design were evaluated. Thus, the study included a comprehensive analysis of modern navigation equipment and design solutions to improve the accuracy of manoeuvring vessels in shallow water, which allows ensuring the efficiency and safety of navigation in conditions of limited space.

Results and Discussion

GNSS systems, particularly GPS, BDS, and Galileo, play a critical role in modern marine navigation, ensuring precise ship positioning even under challenging conditions (Wang *et al.*, 2023). GPS and BDS use satellite signals to determine the exact location of an object on Earth. Both systems provide data that is critical to the safety and effectiveness of maritime operations. Due to the high accuracy of GPS and BDS positioning, ship drivers can accurately track the movement of their vessels and monitor their position in real time, which is especially important in confined spaces where even a small deviation from the course can cause danger. The positioning accuracy that these systems provide is based on the use of signals coming from satellites located in Earth orbit. The signals of GPS satellites

and the BDS system have a high resolution, which allows achieving accuracy within a few meters or even centimetres when using additional correction technologies.

Galileo, the European GNSS, offers several advantages, including high accuracy and dual-frequency capabilities, which improve performance in environments prone to signal disruptions. Its open service provides positioning precision within one meter, while additional correction through the European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) can enhance accuracy to the centimetre level. Galileo's use in maritime operations is essential for navigation in confined areas like coastal waters, narrow channels, and rivers, where even minor course deviations can lead to accidents. By integrating with GPS and BDS, Galileo enhances redundancy and availability, ensuring continuous positioning, especially in urban or obstructed environments where signals from other systems might falter. The system's resilience and advanced features, such as better multipath mitigation, make it a reliable solution for real-time vessel tracking and manoeuvring in both open seas and complex waterways. These GNSS technologies significantly reduce the risks associated with human navigation errors, supporting safe and efficient maritime operations under various environmental conditions.

The use of GNSS in navigation offers several advantages, such as reducing reliance on traditional tools like maps and compasses, which may not meet the precision required by modern navigation systems. Additionally, GNSS integrates seamlessly with other navigation and safety tools, such as ECDIS and automatic identification systems, enhancing the efficiency and safety of maritime operations.

However, despite the high accuracy of GNSS, there are some limitations and problems that need to be considered. Satellite signals can be exposed to atmospheric and environmental conditions, which can reduce positioning accuracy. In conditions of limited space, such as port zones or narrow channels, signal problems may occur due to reflection or blocking of satellite signals. Therefore, it is important to have additional systems and technologies that can complement and support GNSS accuracy. The positioning accuracy determine using equation (1). For example, if the horizontal error is 2 metres and the vertical error is 3 metres, then:

$$\text{Accuracy} = \sqrt{(2)^2 + (3)^2} = 3.6.$$

This result show that the positioning accuracy reached a fairly significant level, which can be critical in narrow water spaces, where even minor deviations could lead to danger. The results of the positioning accuracy calculation for the above systems are presented in Table 1.

Table 1. GNSS positioning accuracy

System	Overall error (metres)	Vertical error (metres)	Accuracy (metres)
GPS	2	3	3.6
BDS	2	3	3.6
Galileo	1.2	2.0	2.4

Source: compiled by the authors based on A. Kumar *et al.* (2021)

Since the positioning accuracy values for GPS and BDS are identical in the table (horizontal error: 2 m, vertical error: 3 m, total accuracy: 3.6 m), any differences observed in real-world conditions would arise from operational factors. These may include differences in satellite geometry, atmospheric interference, or variations in signal correction models. However, under ideal conditions, both systems perform similarly, as reflected in the provided data. Galileo demonstrates superior performance, with accuracy of 2.4 meters, emphasizing the value of adopting advanced satellite navigation technologies. Galileo has shown the best results, highlighting the importance of using the latest technologies to ensure maximum accuracy in confined spaces. This was also investigated by H. Ge *et al.* (2022), where results confirmed that GNSS such as GPS and Galileo significantly improved positioning accuracy by providing coordinate detection with an accuracy of several centimetres. This is especially important for accurate navigation management, reducing navigation errors, and monitoring geospatial data. Y. Li *et al.* (2022) also showed that the latest satellite systems play a critical role in ship manoeuvring, especially in challenging environments. They facilitate accurate tracking of the ship's position and route adjustment in real time, which reduces the risk of collisions and improves the safety of sea transportation. It is worth noting that the constant development of satellite technologies and the introduction of new generations of GNSS constantly improves their accuracy and reliability. Thus, modern vessels can get even more detailed information about their location and surrounding objects, which is especially important for operations in difficult conditions, such as coasts or narrow channels. In addition, the integration of GNSS with other navigation and management systems provides an integrated approach to ship management, which significantly increases the overall safety and efficiency of maritime transportation.

ECDIS is a revolutionary achievement in the field of maritime navigation, significantly improving the safety and efficiency of maritime operations (Pan *et al.*, 2021). They are integrated platforms that provide detailed display of navigation maps, supplemented with up-to-date information about water depth, obstacles and channel markings. Due to this, ECDIS helps ship drivers to avoid underwater threats and ensures more accurate and safe manoeuvring of ships. The main advantage of ECDIS is their ability to integrate different data from different sources into a single mapping system. This allows ship drivers to get comprehensive information about the navigation environment in real time. ECDIS provide accurate water depth data, which is crucial for ships manoeuvring in shallow water or in waters with uneven terrain. Integrating this data helps to reduce the risk of colliding with underwater objects or decreasing depth that can cause accidents. In addition to depth data, ECDIS also provides information about various obstacles such as underwater rocks, reefs, and even artificial structures that can affect ship safety. This helps to avoid potentially dangerous areas and plan the route based on existing obstacles. ECDIS systems also

include channel marking data, allowing for more accurate navigation in narrow and difficult waters where traditional navigation maps may be less convenient. Due to the ability to constantly update data, ECDIS provides ship drivers with up-to-date information, which is an important aspect for manoeuvring in rapidly changing conditions. For example, when passing through a storm or in low visibility conditions, ECDIS can provide timely data on changes in the navigation environment, allowing ship drivers to quickly respond to new challenges.

However, despite its many advantages, ECDIS also has some limitations. One of them is a dependence on the quality of input data: inaccuracies in navigation maps or lack of updating information can lead to errors in positioning and route planning. In addition, ECDIS systems require proper maintenance and regular updating of map data to ensure their accuracy and efficiency.

A study of ECDIS has shown that these systems play a critical role in ensuring the safety of shipping in shallow waters. Integration of depth, interference, and channel marking data allows creating detailed electronic maps that significantly reduce the risk of collisions with underwater objects. These results confirm the need to use advanced ECDIS for navigation in challenging environments. S. Blindheim & T. Johansen (2021) concluded that ECDIS are essential for navigation safety by providing accurate information about navigation conditions and helping to avoid collisions with underwater obstacles. Due to integration with other systems, such as radars and GPS, ECDIS allows creating a comprehensive picture of ship traffic, which increases the level of safety. W. Khawaja *et al.* (2022) found that integrating ECDIS with monitoring systems helps to reduce the risk of underwater threats such as rocks or sunken ships. The system analyses data in real time, issuing a warning that allows the crew to respond to danger in a timely manner. These results support the above study, as they demonstrate a link between the use of ECDIS and the reduction of accidents in shipping. In particular, the integration of ECDIS with other navigation technologies significantly improves the accuracy and safety of ship traffic, which confirms the effectiveness of these systems in preventing collisions and preventing underwater threats.

Automatic identification systems are an important achievement in maritime navigation, which significantly improves the safety of navigation, especially in narrow channels and port areas (Arditiya *et al.*, 2023). The main purpose of AIS is to automatically track the relative position of ships and prevent possible collisions, which is critical in situations where accurate navigation and timely response are crucial for safety. AIS systems work by transmitting and receiving radio signals that contain important information about a ship, such as its location, speed, course, ship type, and other navigation data. Each vessel equipped with AIS transmits this data on a regular basis, which allows all ships within the range of the system to receive information about other vessels in the area. This technology helps to avoid possible collisions by providing ship drivers with up-to-date information about the

location of neighbouring ships. In narrow channels and ports where manoeuvring space is limited, automatic identification systems are an extremely useful tool. The system allows accurately tracking the movement of ships, which helps to avoid situations where two vessels may be on cross courses, which increases the risk of collisions. The information provided by AIS also allows for better manoeuvre planning, reducing the chance of accidents and simplifying the process of entering and exiting ports.

This highlights the importance of integrating AIS into the overall navigation system to improve situational awareness on the water. H. Rong *et al.* (2022) also found that automatic identification systems improve the safety of navigation by providing real-time information about the location, course, and speed of ships. This helps the crew to predict trajectories and adjust their course in time to avoid collisions, especially in conditions of poor visibility. In turn, M. Kang *et al.* (2022) concluded that AIS is particularly effective in narrow channels where space is limited and traffic is heavy. The system allows coordinating ship manoeuvres in real time, reducing the risk of accidents and facilitating the passage of difficult sections.

However, despite its many advantages, AIS has some limitations. For example, the system may be less efficient in conditions of poor visibility or in cases where AIS signals overlap or degrade. In addition, AIS can be exposed to cybersecurity threats because data is transmitted over open radio channels, which can make the system vulnerable to malicious attacks. Simultaneously one of the key features of automatic identification systems is its ability to integrate with other navigation systems, such as ECDIS and radar systems. This allows creating comprehensive navigation platforms that provide a comprehensive overview of the situation on the water. For example, the combination of an automatic identification system with ECDIS allows ship drivers not only to see the location of other ships, but also to get information about their routes, which makes it easier to plan their own route and increases overall safety.

In the context of modern navigation technologies, high-resolution radars are indispensable tools for improving the safety and accuracy of ship manoeuvring, especially in difficult navigation conditions, such as limited water areas and shallow waters. Their use allows ship drivers to detect objects that cannot be captured visually or using conventional navigation systems (Yang *et al.*, 2021). High-resolution radars are capable of detecting details over long distances and with high accuracy, which is especially important for safe manoeuvring of ships in difficult conditions. In a confined space environment where every inch of space matters, the ability to clearly identify obstacles, such as underwater objects, rocks, or other ships, is crucial to avoid collisions and ensure safe passage. These radar systems use powerful radio waves to scan the surrounding area. High resolution provides a detailed image of the environment in real time, which helps ship drivers to quickly respond to hazards. For example, in shallow water, where the water depth can change rapidly and underwater objects

can be virtually invisible, high-resolution radar can detect these objects in advance, avoiding potentially dangerous situations. Another important feature of high-precision radars is their ability to operate in poor visibility conditions, such as fog, rain, or at night. In such situations, when vision is significantly limited, radar can become the only source of information about the environment, providing ship drivers with a clear picture of the situation. This is especially important for ensuring security in ports and narrow channels, where bad weather conditions can further complicate manoeuvring. High-resolution radars also integrate with other navigation systems, such as ECDIS and automatic identification systems, creating a comprehensive picture of the navigation situation. This allows ship drivers to receive synchronised information, which contributes to accurate route planning and optimal manoeuvring. Integrating radars with other systems also increases their efficiency, ensuring more accurate detection and avoidance of possible obstacles.

However, despite their many advantages, high-resolution radars also have some limitations. The cost of such systems can be significant, and there is also a need for regular maintenance to ensure their proper operation. In conditions of heavy traffic, the system can be overloaded with a large number of signals, which can make it difficult to interpret the received data.

Evaluation of high-resolution radars has confirmed their effectiveness in detecting underwater objects and coastlines, especially in low visibility and shallow water conditions. Radar systems have been found to be able to significantly improve manoeuvring accuracy by providing detailed information about the environment, which is especially important in cases where visibility is limited by weather conditions.

X. Bai *et al.* (2022) also conducted a study that confirmed that high-resolution radars play a key role in manoeuvring ships in conditions of limited visibility, such as fog or night. They allow clearly displaying even small objects, which helps the crew to quickly respond to changes in the environment, providing more accurate manoeuvres and reducing the risk of collisions. S. Chen *et al.* (2022) also found that these radars improve visibility by distinguishing details that are not visible on traditional systems. This gives the crew a clearer view of the environment and allows them to perform manoeuvres more safely. Comparing the data obtained in the course of research, it can be concluded that the use of modern navigation technologies, such as high-resolution radars and ECDIS, significantly increases the level of safety of navigation. These technologies provide a more accurate display of the environment, which allows the crew to respond more quickly to potential threats. Such systems also help to reduce the impact of the human factor, minimising errors that can occur due to limited visibility or difficult weather conditions.

DP systems are among the most innovative and critical technologies in modern navigation (Li *et al.*, 2022). They allow vessels to maintain a precise position or perform precise manoeuvring in shallow water without using an

anchor, which is an important factor for ensuring safety and efficiency in confined spaces. Traditionally, anchors have been used to maintain a fixed ship position, which can be problematic in shallow water where there is a risk of damage to the sea floor or aquatic vegetation. Setting and lifting an anchor in such conditions is a complex and often dangerous process that can also have a negative impact on the bottom ecosystem. This is where DP systems come to the rescue, which allows avoiding these problems.

DP systems use a combination of different technologies to precisely control the ship's position. The main component of such systems is the integration of data from navigation systems such as GNSS, radars, gyroscopes, and other sensors. This data is processed using powerful computers that automatically adjust the operation of the ship's propellers and rudders to maintain the exact location of the ship at a given point. One of the key advantages of DP systems is their ability to provide stability and positioning accuracy even in conditions of high waves and strong currents. This is especially important when performing tasks such as installing offshore platforms, conducting scientific research, or performing operations in ports and shallow waters. Due to the use of DP systems, the vessel can remain in a precise position without the need for heavy anchors, which avoids possible damage or contamination of the bottom. DP systems also contribute to increased security in confined spaces. In particular, in ports and narrow channels where manoeuvring can be difficult and risky, positioning accuracy is ensured by automatic correction of the ship's movement. This reduces the risk of collisions with other vessels or structures, and also reduces the likelihood of accidents.

However, DP systems are not flawless. They require regular maintenance and inspection to ensure their reliability and accuracy. In addition, the high cost of such systems can be a significant limitation for some ship owners or operators. The cost of installing and operating DP systems can be high, which requires careful planning and budget. An important part of the research and implementation of DP systems is also the development of new technologies to improve their accuracy and functionality. For example, integration with new sensors and improved algorithms can help to reduce the impact of external factors, such as sea currents or winds, on positioning accuracy.

These systems are effective for maintaining a fixed position of the ship in shallow water without using an anchor. This reduces the risk of damage to the sea floor and ensures accurate manoeuvring in confined spaces. The high functionality of DP systems underlines their importance in modern navigation solutions for vessels operating in difficult conditions. X. Gao *et al.* (2021) concluded that DP systems are critical for keeping ships in place without using anchors, compensating for the effects of wind and currents. They provide precise positioning during complex operations such as drilling or rescue operations, even in adverse weather conditions. J. Kim & H. Park (2022) found that DP's benefits for precise manoeuvring include improved ship control in confined spaces, which reduces the risk of accidents

and optimises fuel costs. This makes DP indispensable for operations that require high accuracy and security. When analysing the results of the study, it is evident that the use of DP systems significantly improves the accuracy and safety of navigation operations. These systems ensure stable position retention even in difficult conditions, minimising the human factor and reducing the risk of accidents.

The design of the ship's hull also plays a crucial role in improving manoeuvrability in shallow water. Manoeuvring in shallow water is one of the most difficult tasks in navigation (Ghazali *et al.*, 2024). In such conditions, the draft of the vessel and the shape of its hull are key factors for ensuring safety and efficiency. Reducing ship draught is critical to successfully performing tasks in confined waters where water depth is insufficient for traditional ship designs. A vessel's draft is defined as the vertical distance between the water line and the lowest part of the hull that touches the bottom of the vessel. It is an important indicator that affects the ability of a vessel to manoeuvre in conditions of limited water depth. In cases where the water depth is minimal, a large draft can lead to the fact that the ship's hull rests on the bottom, which causes not only the risk of damage, but also complicates manoeuvring. Reducing submersion is achieved by using enclosures with a large width and a flat design. The wide hull provides a larger area, distributing the weight of the ship over a larger bottom area. This reduces the pressure on the bottom and allows the vessel to maintain stability when moving in conditions of limited water depth. The flat hull design helps to reduce the overall water resistance that occurs when the ship moves.

The ship's draft was calculated using the equation (2). If, ship weight $W = 10,000$ kg, water density (approximately $1,000 \text{ kg/m}^3$ for fresh water), and cross-sectional area $A = 50 \text{ m}^2$:

$$\text{Draft} = \frac{10,000}{1,000 \times 50} = 0.2 \text{ (m)}.$$

These data indicate that a draft of two-tenths of a meter is normal under certain conditions. At depths less than one meter, the risk of grounding increases significantly, and even small deviations in positioning accuracy can lead to dangerous situations. The draft norms for ships depend on the type and purpose, and generally, for safe manoeuvring, recommended depths should be at least twice the ship's draft. This calculation shows that the low vessel's draft allows avoiding bottom engorgement in shallow water conditions and maintaining vessel stability. In addition, the shape of the hull affects the hydrodynamic characteristics of the vessel. Modern ships for manoeuvring in shallow water are designed considering the features of the environment and specific operating conditions. Flat hulls with a larger width and lower draft can reduce the turbulence of the water surrounding the ship and improve its manoeuvrability. Reducing precipitation is also important to ensure the stability of the vessel. In shallow water, any immersion of a ship in water can lead to instability, especially in strong currents or waves. Ships with lower draft are less likely to

roll over or lose stability when water conditions change.

However, achieving optimal precipitation is not directly related to the width of the hull. The design of the hull should also consider its structural integrity and load capacity. An increase in width can have a positive impact on the total amount of cargo a vessel can carry, which must be taken into account when designing structures. Reducing precipitation also includes the use of special design solutions, such as weight distribution on the hull and improving ballasting systems. The weight distribution ensures an even distribution of the load on the hull, which helps maintain the stability of the vessel in conditions of limited water depth. An important part of designing shallow water vessels is also consideration of possible changes in water depth. In some cases, the depth may vary depending on seasonal fluctuations or other factors. Therefore, the design of the hull must be adaptive to ensure effective manoeuvring in various conditions.

To ensure safe and efficient operation of the vessel in difficult navigational conditions in shallow water, the stabiliser system on the vessel is of great importance. The wing system, or fins, is one of the innovative technologies that significantly affect the improvement of ship manoeuvrability, especially in difficult water conditions (Song *et al.*, 2022). Fins are special stabilisers that are attached to the ship's hull and are used to improve its handling and reduce drift. These technologies are critical to ensuring the accuracy of the ship's movement, especially when manoeuvring in cramped conditions or in strong currents.

One of the main functions of fins is to ensure the stability of the ship. They work as additional elements that create additional forces that help to compensate for dynamic loads that occur during the movement of the ship. The wing effect provided by fins reduces the rotation and tilt of the vessel, which is especially important in conditions of wind loads or waves. This allows maintaining the stability and accuracy of the ship's course, which is critical for safe manoeuvring. Fins are used to ensure the safety of navigation, especially in conditions of limited space. These devices effectively counteract ship drift caused by external factors, allowing the ship driver to more accurately control the course and reduce the risk of collisions. It is important to note that the effectiveness of fins depends on their design characteristics, such as shape, size, and location. Modern fins have various designs that can be adapted to specific operating conditions. For example, some fins are designed to increase efficiency at certain vessel speeds or when manoeuvring in strong currents. This allows them to be adapted to the specific needs of the vessel and ensure maximum efficiency. The design of the fin system also involves integration with other ship control systems, such as steering systems or DP systems. The integration of these systems allows creating more complete solutions to improve the ship's manoeuvrability. For example, data from the fin system can be used to automatically adjust the ship's course, which ensures more accurate and safe

manoeuvring. Analysis of the effectiveness of fins shows that their implementation can significantly improve the management characteristics of the vessel.

In this context, it is important to calculate the stabilising moment of the stabiliser on the vessel. This calculation helps to minimise the vessel's lateral tilt (roll) and reduce its pitching, and improve the vessel's handling. The stabiliser stabilisation moment was calculated using the equation (3). For example, if resistance coefficient = 1.0, stabiliser area $A = 2 \text{ m}^2$, ship speed $V = 10 \text{ m/s}$:

$$M = 1 \times \frac{1}{2} \times 1,000 \times (10)^2 \times 2 = 100,000 \text{ (Nm)}$$

The number in the stabilising torque means the amount of force generated by the stabiliser to counteract the roll or pitch of the vessel. The obtained value of the stabilising moment is quite high. This means that this vessel is very stable with such parameters, even in strong waves or gusts of wind. Tests and real-world operating conditions confirm that vessels with installed fins demonstrate improved stability, reduced drift and higher manoeuvre accuracy. This not only improves shipping safety, but also increases the efficiency of ship operations by reducing energy and fuel costs.

Another critical aspect of a ship's design that directly affects its hydrodynamic characteristics and, consequently, its overall manoeuvrability, especially in shallow water, is the shape of the bow (Ntouras *et al.*, 2022). Optimising the bow of a ship can significantly reduce water resistance, which is key to improving handling and ensuring efficient navigation in confined spaces. When designing the bow of a ship, the main goal is to reduce the hydrodynamic resistance that occurs when moving through water. Water resistance consists of two main components: wave resistance and friction resistance. To achieve minimal wave resistance, it is important to optimise the shape of the bow in such a way as to ensure a smooth passage of water around the ship's hull. This reduces the turbulence and wave currents, which usually contribute to an increase in resistance. One of the most effective shapes for the bow of a ship is a shape that resembles an underwater profile or a blunted cone. This shape allows reducing the resistive resistance and improve the distribution of water throughout the housing. In particular, bows that have an elongated and narrowed shape help to reduce drag at high speeds, but for shallow water, it may be advisable to use flatter or rounded shapes that reduce the tendency to sink. Reducing the depth of water under the hull also plays an important role in determining the optimal shape of the bow.

Calculations of water resistance were conducted for both bow shapes using the equation (4). The shape of the bow directly influences water resistance in the following ways. *Elliptical bow shape* – minimises resistance by promoting better water flow around the hull, reducing turbulence and creating a smoother transition from the bow to the hull, which is crucial for high speeds. *Flat or rounded*

bow shape can decrease the tendency to sink in shallow water, but they may increase drag at high speeds. Calculation of water resistance of a ship with different types of bow under the same conditions. The parameters were selected based on typical values for ships.

Elliptical bow: drag coefficient = 0.8; cross-sectional area $A = 2 \text{ m}^2$; speed $V = 15 \text{ m/s}$.

$$F_d = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A \times V^2;$$

$$F_d = \frac{1}{2} \times 1,000 \times 0.8 \times 2 \times 15^2 = 9,000 \text{ (N)}.$$

Flat or rounded bow: drag coefficient (C_d): 1.2; cross-sectional area (A): 2 m^2 ; speed (V): 15 m/s .

$$F_d = \frac{1}{2} \times 1,000 \times 1.2 \times 2 \times 15^2 = 13,500 \text{ (N)}.$$

The elliptical bow shape results in a drag of 9,000 N, while the flat or rounded bow yields a drag of 13,500 N. This indicates that the elliptical shape is more efficient for high-speed navigation, whereas the flat or rounded shape may be preferable in shallow water to reduce the risk of sinking.

When the vessel moves in shallow water, the reduced water depth changes the hydrodynamic conditions, which can lead to increased drag and poor manoeuvrability. Changes in the hydrodynamic characteristics of the vessel with a decrease in the depth of water under the hull are also associated with priming effects. When the bow of a vessel rises out of the water or partially rises through shallow water, it can lead to significant changes in the distribution of water around the hull. In such cases, optimised bow shapes can reduce unwanted changes in support that occur in close contact with the bottom. Studies of the different shapes of the ship's bow in shallow water show that specially designed profiles can significantly improve handling. For example, the bow of vessels with progressive expansion or undulating shapes can reduce drag and increase the efficiency of movement in conditions of limited space. Innovative developments include the use of hydrodynamic models to create bows that optimally combine aerodynamic and hydrodynamic characteristics.

The steering system is one of the main elements affecting a ship's manoeuvrability, especially in confined spaces such as narrow channels and port areas (Zhang, 2021). Modern ships are equipped with highly sensitive steering systems that allow achieving the accuracy of manoeuvres necessary for safe and efficient handling. The heart of the steering system is the steering blades or steering machines that are responsible for changing the direction of movement of the ship. Depending on the design and requirements of the vessel, different types of steering systems can be used. Modern steering systems include hydraulic, electric, or combined mechanisms that provide precise and sensitive control. One of the key innovations is the use of two steering blades or steering machines. This configuration significantly increases the

manoeuvrability of the vessel, as it allows for more accurate and faster course corrections. Two steering blades located on both sides of the stern section of the vessel provide a symmetrical distribution of forces, which reduces the negative impact of waves and currents on the accuracy of manoeuvring. This is especially important when operating a vessel in narrow channels or when performing complex manoeuvres in limited conditions. Two-blade steering systems also provide better stability of the vessel during manoeuvring. In high-speed conditions or when making sharp turns, using two steering blades helps to reduce the impact of inertial forces that occur when changing direction. This makes it easier for ship drivers to maintain their course and avoid unwanted deviations. In addition, modern steering systems can be equipped with additional features, such as automatic course adjustment and remote control. Automatic steering systems integrated with other navigation technologies, such as DP or ECDIS systems, allow automating the manoeuvring process and reducing the load on the crew.

In this context, it is important to calculate the steering torque of a ship. Understanding the torque helps determine how efficiently a vessel can manoeuvre in confined conditions. The moment of force plays a crucial role in precise steering. A higher moment of force enables better control over the rudder, facilitating sharper turns and enhanced responsiveness, which are essential for navigating in narrow or congested waterways. The moment of force required for steering calculate using the equation (5). For example, force $F = 5,000 \text{ N}$, distance $d = 2 \text{ m}$, angle $\theta = 30^\circ$:

$$M = \frac{5,000 \times 2}{\sin(30^\circ)} = 20,000 \text{ (Nm)}.$$

Overall, the calculation illustrates the relationship between force, distance, and angle in generating a steering moment. This understanding is essential for optimising steering systems and enhancing the manoeuvrability of vessels, particularly in challenging navigational environments.

The efficiency of steering systems is closely linked to the ship's hull design and stability. For high-speed vessels with a V-shaped hull, a modern steering machine is most effective due to its high force capability and quick response, allowing for precise manoeuvring. In shallow water, flat bottom hull designs benefit from either a single steering blade or two steering blades. The two-blade system enhances stability and control compared to a single blade. For larger ships with a round bottom hull, a two-blade system provides better lateral control and reduced drag.

In summary, the modern steering machine is optimal for high-speed V-shaped hulls, while two steering blades are best for flat bottom hulls in shallow water. A single blade is adequate for simpler designs but less effective for maintaining course. The parameters in Table 2 should be correlated with specific hull designs for a comprehensive understanding of steering efficiency, considering factors like water depth and vessel speed.

Table 2. Steering system parameters

Steering system type	Force (N)	Distance (m)	Rotation angle (degrees)	Moment of force (Nm)	Remarks
One steering blade	5,000	2	30	20,000	Basic control; less stable
Two steering blades	5,000	2	30	20,000	Improved stability and control.
Modern steering machine	6,000	1.5	45	60,000	Superior performance for high-speed

Source: compiled by the authors based on K. Otsubo & K. Ishida (2021)

In shallow water, where changes in water depth can significantly impact hydrodynamic performance, the design of the steering system must compensate for these variations to ensure stable control. Table 2 shows that the parameters for the one steering blade and two steering blades systems are identical; both provide a force of 5,000 N, with a distance of 2 m, a rotation angle of 30 degrees, and a moment of force of 20,000 Nm. This similarity indicates that, at least in this context, both systems offer the same performance.

However, the two-blade system can be advantageous due to its increased surface area, which provides better lateral control and stability, especially when maneuvering in tight spaces or during sudden directional changes. The presence of two blades helps distribute forces more evenly, reducing the likelihood of cavitation and improving overall responsiveness.

In contrast, the modern steering machine shows superior performance with a force of 6,000 N, a shorter distance of 1.5 m, a larger rotation angle of 45 degrees, and a moment of force of 60,000 Nm. This indicates that the modern steering machine is capable of generating more power and achieving more significant rotation in less distance, which is particularly beneficial for high-speed maneuvers or navigating complex waterways. The modern steering machine surpasses both systems in force output and efficiency, making it the preferred choice for high-performance vessels, especially in challenging navigation conditions.

One of the most pressing challenges in the development of steering systems is to achieve a balance between control sensitivity and mechanical strength. Shallow water conditions and high loads can cause additional stress on the steering elements, which requires the use of innovative materials and structures that can withstand such loads. To improve the accuracy of manoeuvring in shallow water, it is also important to integrate navigation equipment with the hull design. For example, data from radar or ECDIS can be used to automatically adjust the hull position, which helps to reduce the impact of hydrodynamic forces that occur in shallow water (Orlando *et al.*, 2021). In addition, ships with an improved hull design can use DP systems more efficiently. Evaluation of hull design solutions showed that the use of wide and flat hulls reduces the ship's draft, increasing its stability in shallow water. The integration of stabilisers and the optimised shape of the ship's bow also contribute to improved handling. It is revealed that modern steering systems with high sensitivity allow for precise manoeuvres

in cramped conditions, which confirms the importance of combining modern navigation technologies with a thoughtful hull design to achieve maximum efficiency in ship manoeuvring in shallow water.

Conclusions

Research on improving the accuracy of ship manoeuvring in shallow water has confirmed the significant impact of both navigation equipment and hull design on the efficiency and safety of navigation in confined spaces. GNSS, such as GPS and BDS, have demonstrated their critical role in ensuring accurate positioning of ships, especially in narrow areas of water where even minor deviations can lead to danger.

ECDIS has proven to be indispensable for integrating depth, interference, and channel marking data, which significantly helps to avoid underwater threats and provides a detailed display of the navigation situation. This, in turn, improves the accuracy of navigation solutions and increases the safety of navigation. Automatic identification systems have shown their effectiveness in tracking the position of neighbouring ships and avoiding collisions, which is especially important in narrow channels and port areas where the concentration of ships can be high. High-resolution radars provided critical visibility of underwater objects and coastlines, which is necessary for accurate manoeuvring in low visibility and shallow water conditions.

DP systems have demonstrated their ability to maintain a fixed ship position without using an anchor, which reduces the risk of damage to the sea floor and allows for more precise manoeuvring in shallow water. Analysis of hull design solutions confirmed that wide and flat hulls, optimised bow shapes and state-of-the-art steering systems significantly improve the manoeuvrability and stability of vessels, which contributes to more efficient handling in shallow water. The results of the study highlight the importance of integrating navigation technologies with design innovations to ensure the safety and accuracy of ship manoeuvring in difficult conditions.

To further improve ship manoeuvring in shallow water, it is necessary to investigate the impact of integrating the latest navigation technologies with innovative hull designs on long-term reliability and efficiency under various operating conditions. A limitation of the study was the lack of consideration of the impact of extreme weather conditions on the efficiency of navigation equipment and the design of ship hulls.

Acknowledgements

None.

Conflict of Interest

None.

References

- [1] An, Y., Yu, J., & Zhang, J. (2021). Autonomous sailboat design: A review from the performance perspective. *Ocean Engineering*, 238, article number 109753. doi: [10.1016/j.oceaneng.2021.109753](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109753).
- [2] Arditiya, A., Wibowo, A., Wangloan, E.H., Junanton, R., & Siahaan, D.H. (2023). Automatic identification system (AIS) in the Mahakam River ship to prevent accident to zero accident. *AIP Conference Proceedings*, 2706, article number 020188. doi: [10.1063/5.0121469](https://doi.org/10.1063/5.0121469).
- [3] Bai, X., Zhang, Y., & Liu, S. (2022). High-resolution radar imaging of off-grid maneuvering targets based on parametric sparse Bayesian learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, article number 5112611. doi: [10.1109/TGRS.2022.3169206](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3169206).
- [4] Blindheim, S., & Johansen, T.A. (2021). Electronic navigational charts for visualization, simulation, and autonomous ship control. *IEEE Access*, 10, 3716-3737. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3139767](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3139767).
- [5] Chen, S., Feng, C., Huang, Y., Chen, X., & Li, F. (2022). Small target detection in X-band sea clutter using the visibility graph. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, article number 5115011. doi: [10.1109/TGRS.2022.3186283](https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3186283).
- [6] Gao, X., Bai, W., Li, T., Yuan, L.E., & Long, Y. (2021). Broad learning system-based adaptive optimal control design for dynamic positioning of marine vessels. *Nonlinear Dynamics*, 105, 1593-1609. doi: [10.1007/s11071-021-06634-6](https://doi.org/10.1007/s11071-021-06634-6).
- [7] Ge, H., Li, B., Jia, S., Nie, L., Wu, T., Yang, Z., Shang, J., Zheng, Y., & Ge, M. (2022). LEO enhanced global navigation satellite system (LeGNSS): Progress, opportunities, and challenges. *Geo-spatial Information Science*, 25(1), 1-13. doi: [10.1080/10095020.2021.1978277](https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1978277).
- [8] Ghazali, M.H., Satar, M.H., & Rahiman, W. (2024). Unmanned surface vehicles: From a hull design perspective. *Ocean Engineering*, 312, article number 118977. doi: [10.1016/j.oceaneng.2024.118977](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118977).
- [9] Igbinenikaro, O.P., Adekoya, O.O., & Etukudoh, E.A. (2024). A comparative review of subsea navigation technologies in offshore engineering projects. *International Journal of Frontiers in Engineering and Technology Research*, 6(2), 19-034. doi: [10.53294/ijfetr.2024.6.2.0031](https://doi.org/10.53294/ijfetr.2024.6.2.0031).
- [10] Kang, M.J., Zohoori, S., Hamidi, M., & Wu, X. (2022). Study of narrow waterways congestion based on automatic identification system (AIS) data: A case study of Houston Ship Channel. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 7(6), 578-595. doi: [10.1016/j.joes.2021.10.010](https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.10.010).
- [11] Khawaja, W., Semkin, V., Ratyal, N.I., Yaqoob, Q., Gul, J., & Guvenc, I. (2022). Threats from and countermeasures for unmanned aerial and underwater vehicles. *Sensors*, 22(10), article number 3896. doi: [10.3390/s22103896](https://doi.org/10.3390/s22103896).
- [12] Kim, J.M., & Park, H.R. (2022). Application of a dynamic positioning system to a maritime autonomous surface ship (MASS). *Journal of Navigation and Port Research*, 46(5), 435-440. doi: [10.5394/KINPR.2022.46.5.435](https://doi.org/10.5394/KINPR.2022.46.5.435).
- [13] Kumar, A., Kumar, S., Lal, P., Saikia, P., Srivastava, P.K., & Petropoulos, G.P. (2021). Introduction to GPS/GNSS technology. In G.P. Petropoulos & P.K. Srivastava (Eds.), *GPS and GNSS technology in geosciences* (pp. 3-20). London: Elsevier. doi: [10.1016/B978-0-12-818617-6.00001-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818617-6.00001-9).
- [14] Li, H., Chen, H., Gao, N., Ait-Ahmed, N., Charpentier, J.F., & Benbouzid, M. (2022). Ship dynamic positioning control based on active disturbance rejection control. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), article number 865. doi: [10.3390/jmse10070865](https://doi.org/10.3390/jmse10070865).
- [15] Li, Y., Yan, S., & Gong, J. (2022). SNR improvement for maneuvering ship using weak echo under the condition of BeiDou GEO satellites. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 1256-1271. doi: [10.1109/JSTARS.2022.3142768](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3142768).
- [16] Lim, J.H., Kim, J.H., & Huh, J.H. (2023). Recent trends and proposed response strategies of international standards related to shipbuilding equipment big data integration platform. *Quality & Quantity*, 57(1), 863-884. doi: [10.1007/s11135-022-01382-0](https://doi.org/10.1007/s11135-022-01382-0).
- [17] Maljković, M., Pavić, I., Meštrović, T., & Perković, M. (2024). Ship maneuvering in shallow and narrow waters: Predictive methods and model development review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(8), article number 1450. doi: [10.3390/jmse12081450](https://doi.org/10.3390/jmse12081450).
- [18] Ntouras, D., Papadakis, G., & Belibassakis, K. (2022). Ship bow wings with application to trim and resistance control in calm water and in waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4), article number 492. doi: [10.3390/jmse10040492](https://doi.org/10.3390/jmse10040492).
- [19] Okuda, R., Yasukawa, H., Sano, M., Hirata, N., Yoshimura, Y., Furukawa, Y., & Matsuda, A. (2022). Maneuvering simulations of twin-propeller and twin-rudder ship in shallow water using equivalent single rudder model. *Journal of Marine Science and Technology*, 27(2), 948-970. doi: [10.1007/s00773-022-00881-x](https://doi.org/10.1007/s00773-022-00881-x).

- [20] Orlandi, A., Cappugi, A., Mari, R., Pasi, F., & Ortolani, A. (2021). Meteorological navigation by integrating metocean forecast data and ship performance models into an ecdis-like e-navigation prototype interface. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(5), article number 502. doi: [10.3390/jmse9050502](https://doi.org/10.3390/jmse9050502).
- [21] Oruc, A., Gkioulos, V., & Katsikas, S. (2022). Towards a cyber-physical range for the integrated navigation system (INS). *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), article number 107. doi: [10.3390/jmse10010107](https://doi.org/10.3390/jmse10010107).
- [22] Otsubo, K., & Ishida, K. (2021). Study on parameter identification methods for steering control in model experiments. In *Proceedings of the 31st international ocean and polar engineering conference*. Retrieved from <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE21/All-ISOPE21/464717>.
- [23] Pan, N., Bai, X., Jiang, X., Ma, S., & Peng, Y. (2021). Research on ship navigation electronic chart system based on computer big data accurate positioning. In *Proceedings of the international conference on artificial intelligence and computer applications* (pp. 852-857). Dalian: IEEE. doi: [10.1109/ICAICA52286.2021.9498111](https://doi.org/10.1109/ICAICA52286.2021.9498111).
- [24] Rong, H., Teixeira, A.P., & Soares, C.G. (2022). Ship collision avoidance behaviour recognition and analysis based on AIS data. *Ocean Engineering*, 245, article number 110479. doi: [10.1016/j.oceaneng.2021.110479](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110479).
- [25] Song, C., Zhang, X., & Zhang, G. (2022). Nonlinear innovation-based maneuverability prediction for marine vehicles using an improved forgetting mechanism. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), article number 1210. doi: [10.3390/jmse10091210](https://doi.org/10.3390/jmse10091210).
- [26] Wang, S., Zhang, Y., Zhang, X., & Gao, Z. (2023). A novel maritime autonomous navigation decision-making system: Modeling, integration, and real ship trial. *Expert Systems with Applications*, 222, article number 119825. doi: [10.1016/j.eswa.2023.119825](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119825).
- [27] Wang, X.Z., & Xu, E.H. (2022). Ship structural design. In W. Cui, S. Fu & Z. Hu (Eds.), *Encyclopedia of ocean engineering* (pp. 1669-1679). Singapore: Springer. doi: [10.1007/978-981-10-6946-8_38](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6946-8_38).
- [28] Yang, H., Wang, Q., Li, H., Fang, F., Montenegro-Marin, C.E., & Kadry, S.N. (2021). Maritime moving object localization and detection using global navigation smart radar system. *Soft Computing*, 25(18), 11965-11974. doi: [10.1007/s00500-021-05625-4](https://doi.org/10.1007/s00500-021-05625-4).
- [29] Zhang, D. (2021). Optimization design of ship rudder steering stability optimization control system: modelling and computer simulations. In *Proceedings of the international conference on electronics, communication and aerospace technology* (pp. 984-987). Coimbatore: Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi: [10.1109/ICECA52323.2021.9675871](https://doi.org/10.1109/ICECA52323.2021.9675871).
- [30] Zhang, S., Wu, Q., Liu, J., He, Y., & Li, S. (2023). State-of-the-art review and future perspectives on maneuvering modeling for automatic ship berthing. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), article number 1824. doi: [10.3390/jmse11091824](https://doi.org/10.3390/jmse11091824).
- [31] Zhang, X., Wang, C., Jiang, L., An, L., & Yang, R. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*, 235, article number 109380. doi: [10.1016/j.oceaneng.2021.109380](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380).
- [32] Zhou, H., Zhou, A., Li, T., Chen, D., Peeta, S., & Laval, J. (2022). Significance of low-level control to string stability under adaptive cruise control: Algorithms, theory and experiments. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 140, article number 103697. doi: [10.1016/j.trc.2022.103697](https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103697).

Іван Рясний

Магістр

Інститут Військово-морських Сил Національного університету “Одеська морська академія”

65029, вул. Дідріхсона 8, м. Одеса, Україна

<https://orcid.org/0009-0008-4992-880X>

Антон Іваненко

Бакалавр

Інститут Військово-морських Сил Національного університету “Одеська морська академія”

65029, вул. Дідріхсона 8, м. Одеса, Україна

<https://orcid.org/0009-0000-8780-5730>

Підвищення точності маневрування суден на мілководді: роль навігаційного обладнання та дизайн корпусу

Анотація. Дослідження проведено для аналізу впливу сучасного навігаційного обладнання та дизайну корпусу суден на підвищення точності маневрування в умовах мілководдя. У дослідженні використовувалися методи аналізу та порівняння ефективності сучасного навігаційного обладнання, оцінювання конструктивних рішень дизайну корпусу суден, а також інтеграції цих технологій для покращення точності маневрування на мілководді. Було встановлено, що використання сучасних систем динамічного позиціонування та високоточного навігаційного обладнання, таких як супутникові системи та електронні картографічні системи, значно підвищує точність маневрування суден на мілководді. Виявлено, що кораблі з плоским корпусом та мінімальною осадкою мають кращу маневреність у порівнянні з традиційними конструкціями. Оптимізація форми носа та застосування стабілізаторів дозволяють зменшити опір воді й покращити керованість. Використання високочутливих рульових систем підвищує точність руху в обмежених умовах. Зроблено висновок, що інтеграція цих технологій дозволяє значно покращити безпеку судноплавства на мілководді. Дослідження також показало, що радари з високою роздільною здатністю та автоматичні ідентифікаційні системи ефективно знижують ризик зіткнень під час маневрування у вузьких каналах і портах. Крім того, було виявлено, що судна з покращеним дизайном корпусу мають знижений гідродинамічний опір, що сприяє зменшенню витрат палива на мілководді. За результатами дослідження були надані практичні рекомендації з впровадження сучасних навігаційних систем і вдосконалення дизайну корпусу суден, що підвищує точність маневрування на мілководді та покращує безпеку судноплавства. Загалом, результати дослідження підтвердили важливість інтеграції навігаційних технологій із конструктивними рішеннями корпусу для підвищення ефективності та безпеки судноплавства

Ключові слова: системи динамічного позиціонування; оптимізація форми носа; конструктивні рішення; ризик зіткнень; гідродинамічний опір

Andriy Slabkyi*

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9284-2296>

Serhii Kotyk

Postgraduate Student
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0000-9396-7189>

Innovative technologies in the study of mechanical properties of materials

Abstract. The article provides an overview of modern innovative technologies used to study the mechanical properties of materials using universal breaking machines. The focus is on the integration of machine vision technologies, machine learning algorithms and high-speed stereoscopy, which provide new capabilities for analysing the behaviour of materials during static and dynamic loads. An important aspect of the research is the improvement of traditional test methods through the introduction of innovative components: high-speed cameras that allow recording material deformations with microsecond precision; stereoscopic systems that create three-dimensional models of material behaviour under load; as well as lighting devices that provide uniform illumination of the test object. These technologies are synchronized with powerful computing modules capable of analysing large amounts of data in real time. The authors emphasise that the integration of computer vision and machine learning algorithms can significantly reduce the impact of the human factor on research results. Automated analysis systems are able to accurately detect and classify defects, simulate types of failures and predict the behaviour of materials under various loading conditions. Examples of the use of such systems in the study of complex composites, metal alloys and the latest polymers are also given. Additionally, innovative approaches to the creation of dynamic loads that allow testing for impact strength and endurance are considered. The article shows how automated test process management systems increase research efficiency by providing greater accuracy, repeatability of results, and faster data processing. The practical significance of the described developments lies in their wide application in industries where the study of the mechanical properties of materials is critical, such as aircraft construction, mechanical engineering, energy and construction. A high level of automation and accuracy of tests, provided by the introduction of modern technologies, allows setting new standards for the quality of research and creates prospects for the further development of materials science. Thus, the presented approach to improving universal breaking machines contributes to increasing the accuracy of measurements, expanding the functionality of traditional test systems and creating more efficient methods for studying materials

Keywords: universal breaking machines, machine vision, pulse loading, prediction of the behaviour of materials, optical measurement systems, machine learning algorithms, visualisation of deformations

Suggested Citation:

Slabkyi, A., & Kotyk, S. (2024). Innovative technologies in the study of mechanical properties of materials. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 130-134. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.130.

*Corresponding author



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Introduction

Modern trends in the field of materials science demonstrate the rapid development of technologies aimed at improving the mechanical properties of materials, as well as improving the methods of their research. The relevance of this topic is determined by the increasing demands on the quality of materials in various industries, including mechanical engineering, construction, automotive, and aviation. Within the framework of this study, special attention is paid to innovative approaches presented in the works of leading scientists. In particular, the article [1] examines trends in improving the mechanical properties of materials created by the additive manufacturing method. The main emphasis is placed on the use of metal, ceramic and polymer materials, which, thanks to this technology, obtain much better characteristics. This study shows the prospects of additive manufacturing in the context of ensuring high mechanical parameters of products.

Another important study presented [2] focuses on the experimental study of the effect of vibration on the mechanical properties of parts made by extrusion of materials. The use of high-frequency vibrations made it possible to significantly increase strength and reduce stress in the material. This approach expands the possibilities of additive manufacturing by adding tools to improve the quality of the final product.

In addition, the article [3] discusses an innovative non-contact method for estimating the strain distribution using digital image correlation (DIC) and laser speckle pattern. This method provides high accuracy in determining local deformations and allows you to obtain data in real time without physical interference with the test process. The application of this approach significantly expands the possibilities of testing in materials science, making them more efficient and accurate.

In this way, these studies demonstrate how modern technologies can be integrated into the study of the mechanical properties of materials. This article will consider the further development of these ideas in the context of the introduction of innovative approaches to working with universal breaking machines and the use of machine vision for the analysis of deformation processes.

Results

Continuing the ideas presented in the studies reviewed, our work focuses on integrating machine vision and automated data acquisition systems to improve test accuracy. The use of high-speed cameras in combination with computer vision algorithms makes it possible to obtain three-dimensional models of deformations in real time and investigate the process of material shaping, deformation, crack formation, etc. [4, 5].

The integration of vibration technologies, as shown in the paper [6], can be applied to reduce residual stresses in the materials being tested. The addition of such modules to modern universal breaking machines will provide better quality results and allow for more repeatability of research.

In addition, the introduction of digital image correlation [7] opens up new perspectives for non-contact deformation analysis. This method avoids the impact of contact devices on the sample, which is especially important when testing thin-walled or brittle materials.

Analysing traditional methods and means of studying the characteristics of materials of machine parts and structures, such as static tensile or compression load, it is advisable to single out the main components of such systems.

Load sensors – installed in the machine to accurately measure the applied load. The accuracy of the sensors is critical in determining the strength of the material [8]:

- ◆ Extensometers. Measure the deformation of the sample under load. Extensometers can be contact (mechanical or electronic) or non-contact (optical systems). Contact extensometers are attached to the specimen and record elongations, while non-contact extensometers use lasers or cameras to track deformations [9].

- ◆ Data collection and processing system. Includes software for real-time recording of load and strain readings. The data are analysed to plot stress-strain, determine the modulus of elasticity, yield strength and other parameters. This software also allows you to store, analyse, and visualize test results [10].

Measuring systems used in widely used test benches cannot be adapted to ensure the required test accuracy due to the high transience of processes during pulse and high-speed dynamic load studies.

Pulsed material testing equipment creates significant loads in a short period of time, requiring high-precision data collection and analysis. In such studies, the use of machine vision opens up new opportunities for observation and analysis of materials [11].

Modern machine vision systems significantly improve the quality of tests, as they allow you to analyse the behaviour of materials during fast-moving deformation processes that occur under the influence of impulse loads. Traditional measurement methods often have difficulty accurately capturing rapid changes in material, while machine vision provides high speed and accuracy in image acquisition [12].

The integration of machine vision into pulse equipment provides the possibility of detailed analysis of fast-moving processes, such as deformations and destruction of materials under the influence of impulse loads. This requires building a dedicated module that can efficiently capture images at high speeds and process them in real-time. A machine vision-based measurement system should consist of the following components.

1. Camera systems – high-speed cameras with a shooting frequency of 10,000-1,000,000 frames per second (FPS) to capture fleeting changes. Pulse tests, such as shocks or explosive loads, require the capture of events lasting only milliseconds. High-speed cameras (e.g., up to a million frames per second) can capture these short-lived processes, allowing researchers to see how material breaks down or changes under load. This technology is indispensable

for analysing the dynamics of crack propagation or instantaneous deformations [6]. For three-dimensional modelling of strain, it is advisable to use stereoscopic cameras, with the help of which you can create three-dimensional models of strains in real time. This allows you to investigate how a material responds to impulse loads in all three dimensions, which is important for materials with anisotropic properties. Three-dimensional visualization helps to better understand the behaviour of the material and allows for a deeper analysis of fracture processes [9]. The location of the chambers needs to provide coverage of the entire test area and the viewing angles required for analysis from different positions. Thanks to the use of high-resolution cameras, it is possible to detect microcracks or changes in surface texture that occur under the influence of pulse load. For example, when examining the impact strength of a material, it is important to identify the slightest initial defects that can lead to failure. Optical systems detect these changes even before they become noticeable in any other way [10].

2. Lighting system – pulsed LEDs or laser light sources that provide short-term and bright lighting for high-quality capture of frames without blurring. The lighting system must have a lighting synchronization system with the cameras to ensure the best image quality at high speeds [11].

3. Compute unit for image processing – processor or graphics processing unit (GPU) for fast processing of large numbers of frames in real time. Since pulse tests generate huge amounts of data in a very short time, it is important to use software that can process this data in real-time. Machine vision, combined with computer vision algorithms, allows for automatic analysis of the resulting images to identify key parameters such as deformation rate, crack propagation, and overall material behavior [12].

Computer vision algorithms including: detection of deformations and displacements: analysis of shifts and changes in material structure based on sequences of frames. Specialised machine learning algorithms can process and analyse the resulting images, providing accurate determination of deformation parameters and anomaly detection. This allows you to better predict the behavior of the material under load and makes the research process more efficient. Algorithms can also be used to classify types of fractures and analyse the nature of cracks [13]. Thanks to machine vision, it is possible to automate the process of detecting defects in samples after testing. This technology is able not only to record changes, but also to distinguish between types of deformations and damage, helping researchers make more informed decisions about further analysis or adjustment of materials.

Three-dimensional modeling of deformations using stereoscopic cameras allows for accurate analysis of changes in the structure of materials under load. The cameras capture synchronous images that are processed to create a 3D model of warps in all directions (X, Y, Z). It is a high-precision non-contact method that provides detailed analysis of complex deformations, particularly in composite

materials. Such a system provides an in-depth understanding of the behaviour of materials, including in real time.

Interfaces with machine learning tools are integrated into data collection and analysis systems, which allows you to automate the processing of large amounts of information. They are able to classify types of fractures, such as ruptures, cracks or plastic deformations, based on pre-trained models. Also, these interfaces predict the behaviour of materials using algorithms that detect hidden patterns in the data. This improves the accuracy of estimates and allows you to predict material properties in difficult conditions.

4. Data collection and synchronisation system – this is a face for communication with pulse equipment: synchronization of the moment of shooting cameras with pulse load. A synchronisation controller to control the camera, lighting and computing unit system, ensuring the correct interaction of all components.

5. Data analysis and visualisation software is a user interface for adjusting test parameters such as frame rate and light intensity. Module for real-time visualisation of analysis results, including three-dimensional deformation models. An automatic reporting system that stores the collected data generates reports and visualisations for further analysis.

Figure 1 presents a schematic functional diagram of a measuring system based on machine vision for the study of impulse loads on testing machines.

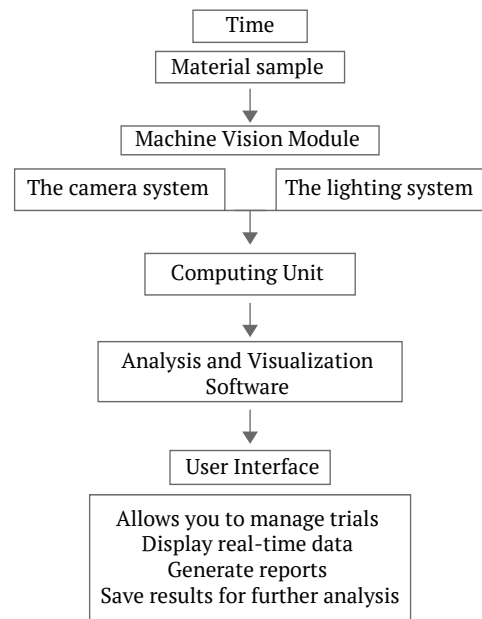


Figure 1. Schematic functional diagram of a measuring system based on machine vision for the study of impulse loads on testing machines

Source: developed by the authors

On the proposed functional diagram, the following structural elements can be distinguished:

1. Test stand. The module integrates with the test stand, where the sample is subjected to a pulse load.
2. Machine vision module:

- ◆ the camera system captures the deformations of the sample at high speed;

- ◆ the lighting system provides optimal lighting for high-quality image capture.

3. Computing unit: processes the obtained images, performs analysis and simulation in real time.

4. Analysis and visualization software: conducts automatic analysis and creates three-dimensional models of deformations.

5. User interface: allows you to manage trials, display real-time data, generate reports, and save results for further analysis.

Conclusions

The introduction of innovative technologies in the study of mechanical properties of materials opens up new opportunities for improving the accuracy and information

content of tests. The use of machine vision, high-speed cameras and machine learning tools allows you to automate the processes of data collection and analysis, reducing the impact of human error and providing detailed control of deformations in real time. This greatly expands the possibilities of studying complex and composite materials.

The integration of such systems into test equipment contributes to a deeper understanding of the behaviour of materials under dynamic loads, allowing you to predict their strength and reliability in difficult conditions. The results obtained not only improve the quality of experimental research, but also provide practical solutions for industries where high accuracy and efficiency are required. Future research may focus on improving analysis algorithms and integrating even more sensitive data acquisition systems, allowing for an even better understanding of material properties and predicting their behaviour in challenging operational environments.

References

- [1] García-Collado, A., Dorado-Vicente, R., Romero, P.E., & Gupta, M.K. (2023). Recent trends on the mechanical properties of additive manufacturing. *Applied Sciences*, 13(12), article number 7067. doi: 10.3390/app13127067.
- [2] Jiang, S., Dong, T., Zhan, Y., Dai, W., & Zhan, M. (2021). Experimental study on improving the mechanical properties of material extrusion rapid prototyping polylactic acid parts by applied vibration. *Applied Sciences*, 11(4), article number 1820. doi: 10.3390/app11041820.
- [3] Mashiwa, N., Furushima, T., & Manabe, K. (2017). Novel non-contact evaluation of strain distribution using digital image correlation with laser speckle pattern of low carbon steel sheet. *Procedia Engineering*, 184, 16-21. doi: 10.1016/j.PROENG.2017.04.065.
- [4] Amini, A., & Haghpanahi, M. (2020). *Machine learning for material design and engineering applications*. Hoboken: Wiley-Blackwell.
- [5] Singh, B., & Chattopadhyay, S. (2022). *Advanced materials and technologies in industry*. Berlin: Springer.
- [6] Chien, C.F., & Li, W.L. (2021). *Artificial intelligence in materials science and engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- [7] Wu, P., & Liu, Y. (2020). *Artificial intelligence for materials science and engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- [8] Suryawanshi, R.D., & Patel, V.P. (2021). *Machine learning in materials science: Fundamentals and applications*. Boca Raton: CRC Press.
- [9] Zhu, Y., & Liang, Y. (2019). *Computational materials science: From basic principles to state-of-the-art applications*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [10] Hoffmann, M.J., & Dieringa, H. (2018). *Materials science and technology: The key to innovation*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [11] Jha, S.K., & Sharma, P. (2022). *Advanced smart materials for energy and environmental sustainability*. Amsterdam: Elsevier.
- [12] Evans, J.R., & Oliver, A.C. (2021). *Emerging materials science and technologies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [13] Kumar, R., & Singh, R. (2023). *Applications of artificial intelligence in materials science and engineering*. Berlin: Springer Nature.

Андрій Слабкий

Кандидат технічних наук, доцент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9284-2296>

Сергій Котик

Аспірант
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0009-0000-9396-7189>

Інноваційні технології у дослідженні механічних властивостей матеріалів

Анотація. У статті представлено огляд сучасних інноваційних технологій, що використовуються для дослідження механічних властивостей матеріалів за допомогою універсальних розривних машин. Основну увагу приділено інтеграції технологій машинного зору, алгоритмів машинного навчання та високошвидкісної стереоскопії, які забезпечують нові можливості для аналізу поведінки матеріалів під час статичних і динамічних навантажень. Важливим аспектом дослідження було вдосконалення традиційних методів випробувань шляхом впровадження інноваційних компонентів: високошвидкісних камер, що дозволяють фіксувати деформації матеріалу з мікросекундною точністю; стереоскопічних систем, які створюють тривимірні моделі поведінки матеріалу під навантаженням; а також освітлювальних пристроїв, що забезпечують рівномірне освітлення об'єкта випробувань. Зазначені технології синхронізуються із потужними обчислювальними модулями, здатними проводити аналіз великих обсягів даних у реальному часі. Автори підкреслюють, що інтеграція алгоритмів комп'ютерного зору та машинного навчання дозволяє суттєво зменшити вплив людського фактора на результати досліджень. Автоматизовані системи аналізу здатні точно виявляти та класифікувати дефекти, моделювати типи руйнувань та прогнозувати поведінку матеріалів за різних умов навантаження. Також наведено приклади застосування таких систем у дослідженнях складних композитів, металевих сплавів і новітніх полімерів. Додатково розглянуто інноваційні підходи до створення динамічних навантажень, що дозволяють проводити випробування на ударну міцність та витривалість. У статті показано, як автоматизовані системи управління випробувальними процесами підвищують ефективність досліджень, забезпечуючи більшу точність, повторюваність результатів і пришвидшену обробку даних. Практичне значення описаних розробок полягає в їх широкому застосуванні в галузях, де вивчення механічних властивостей матеріалів є критично важливим, таких як авіабудування, машинобудування, енергетика та будівництво. Високий рівень автоматизації та точності випробувань, забезпечений впровадженням сучасних технологій, дозволяє задавати нові стандарти якості досліджень і створює перспективи для подальшого розвитку матеріалознавства. Таким чином, представлений підхід до вдосконалення універсальних розривних машин сприяє підвищенню точності вимірювань, розширенню функціональних можливостей традиційних випробувальних систем і створенню більш ефективних методів дослідження матеріалів.

Ключові слова: універсальні розривні машини, машинний зір, імпульсне навантаження, прогнозування поведінки матеріалів, оптичні системи вимірювання, алгоритми машинного навчання, візуалізація деформацій

Леонід Поліщук

Доктор технічних наук, професор
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-5916-2413>

Роман Сивак*

Доктор технічних наук, професор
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>

Богдан Резидент

Студент
Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
<https://orcid.org/0009-0009-6578-8576>

Визначення поля тиску в газостатичній опорі високошвидкісного шпиндельного вузла металорізального верстату

Анотація. Точність, швидкохідність та довговічність шпиндельних вузлів дозволяє досягати високих показників під час шліфування виробів. Використання шпиндельних вузлів на опорах кочення характеризується порівняно малою окружною швидкістю різання, що змушує вдаватися до збільшення зусилля притискання інструменту. Це призводить до спотворення геометрії виробу і до зниження якості оброблюваної поверхні. Застосування в конструкціях високошвидкісних шпиндельних вузлів гідростатичних та гідродинамічних підшипників призводить до обмеження частоти обертання шпинделя через втрати на тертя. Шпинделі на електромагнітних опорах поки не знайшли широкого застосування внаслідок складності та високої вартості шпинделів та електронних систем керування. Впровадження в конструкцію шпиндельних вузлів підшипників на газовому мастилі дозволяє підвищити жорсткість та масу шпинделя шляхом збільшення діаметра робочих шийок при одночасному підвищенні окружної швидкості. Підвищення окружної швидкості дозволяє здійснювати обробку з великими подачами, що призводить до підвищення продуктивності та покращення якості. Однак необхідно відзначити значну математичну складність опису динаміки течії газового мастила в зазорі газостатичної опори шляхом застосування класичних методів інженерної теорії потоку. Тому в статті пропонується здійснити опис течії газового мастила в зазорі опори за допомогою розв'язку крайової задачі для рівнянь Нав'є-Стокса. В результаті чисельного розв'язку отриманих рівнянь в консервативній формі отримані залежності безрозмірного тиску від відносного навантаження та коефіцієнту жорсткості. Виконано аналіз експериментальних та теоретично отриманих характеристик шпиндельного вузла і показано, що розроблена методика дозволяє з достатньою для практичного застосування точністю визначати експлуатаційні характеристики шпиндельного вузла з газопроникними шпонковими обмежувачами витрати

Ключові слова: високошвидкісний шпиндель; газовий підшипник; відносний тиск; відносне навантаження; жорсткість

Suggested Citation:

Polishchuk, L., Syvak, R., & Resident, B. (2024). Determination of the pressure field in the gasstatic support of a high-speed spindle assembly of a metal-cutting machine. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 135-141. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.135.

*Corresponding author



Вступ

Основні вимоги до шпиндельних вузлів та їх опор сформульовані в роботах [1, 2] на основі загальних вимог до металообробних верстатів. Сучасні швидкохідні та високоточні шліфувальні, розточувальні та інші верстати повинні забезпечувати точність форми робочих поверхонь, близько десятих часток мікрометра при чистоті поверхні $Ra < 0,08$ мкм. Отримання таких параметрів, чималою мірою, пов'язано з експлуатаційними якостями опор шпиндельних вузлів металообробних верстатів.

Досвід експлуатації шпиндельних вузлів шліфувальних верстатів з опорами різних типів показує, що в ряді випадків застосування газостатичних підшипників є більш бажаним, оскільки такі опори здатні за допомогою усереднювального ефекту газового шару, забезпечити точність обертання шпинделя рівну $0,02 - 0,04$ мкм [3]. Найбільш поширеним типом газостатичних опор, що застосовуються у шпиндельних вузлах, є газові підшипники з живильними отворами. Однак такі опори мають відносно невисоку несучу здатність та жорсткість мастильного шару [4].

У конструкціях високошвидкісних шпиндельних вузлів на газових опорах зазвичай застосовують підшипники з дросельними обмежувачами витрати, які, як відомо, мають порівняно невисоку несучу та демпфувальну здатність мастильного шару. Дослідження показують, що суттєво покращити вихідні характеристики

шпиндельних вузлів здатні газостатичні підшипники з частково газопроникною стінкою вкладиша, особливості роботи яких у складі шпиндельного вузла в даний час залишаються найменш вивченими.

Тому задача створення високошвидкісних шпиндельних вузлів із підшипниками на газовому мастилі, що забезпечують високі експлуатаційні характеристики є актуальною для машинобудування. Як показали дослідження, ефективним способом покращення експлуатаційних характеристик газових підшипників є застосування газопроникних газостатичних опор. Однак нині з низки причин (нестабільність розмірів вкладиша, труднощі обробки його внутрішньої поверхні тощо) газопроникні підшипники отримали обмежене застосування. У ряді робіт [5-7] показано, що найперспективнішим шляхом покращення характеристик газових опор полягає у використанні частково газопроникних газостатичних підшипників, які поєднують непроникну та пористу поверхню вкладиша. Проте доводиться констатувати, що наукові праці, присвячені дослідженню особливостей роботи шпиндельних вузлів з такими опорами, практично повністю відсутні.

Матеріали і методи

Розрахункова схема шпиндельного вузла показана на Рисунок 1.

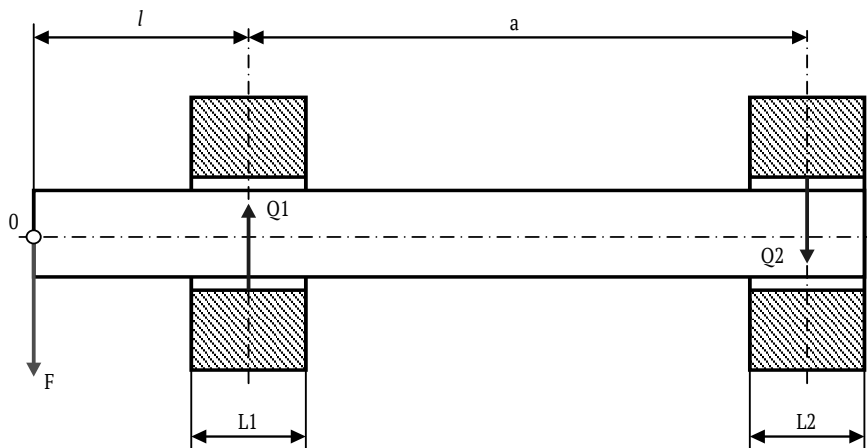


Рисунок 1. Розрахункова схема шпиндельного вузла

Джерело: розроблено авторами

Для визначення навантаження F , що сприймається інструментом, складається рівняння статки – сума проєкцій сил на вісь Y (Рис. 1), яке має вигляд:

$$\frac{F}{(p_s - p_a)L_1 D} = C_{Q_1} - C_{Q_2} \frac{\bar{L}_2}{\bar{L}_1}, \quad (1)$$

де відносно навантаження на інструменті

$$\frac{F}{(p_s - p_a)L_1 D} = \bar{F}; \quad (2)$$

p_s – абсолютний тиск подачі газу; D – діаметр підшипника;

$C_{Q_1} = \frac{Q_1}{(p_s - p_a)L_1 D}$ – коефіцієнт несучої здатності передньої опори;

$C_{Q_2} = \frac{Q_2}{(p_s - p_a)L_2 D}$ – коефіцієнт несучої здатності задньої опори;

$\bar{L}_1 = \frac{L_1}{D}$ – видовження передньої опори;

$\bar{L}_2 = \frac{L_2}{D}$ – видовження задньої опори.

Жорсткість інструменту визначається за формулою:

$$k_F = \frac{dF}{dy}, \quad (3)$$

відповідний їй коефіцієнт жорсткості дорівнює

$$k_{\bar{F}} = \frac{d\bar{F}}{d\bar{y}}, \quad (4)$$

де $\bar{y} = \frac{y}{c}$ – відносне зміщення осі інструменту.

В роботах [8, 9] показано, що для визначення безрозмірних вихідних характеристик шпіндельних вузлів (відносного навантаження $\bar{F}$ та коефіцієнта жорсткості $k_{\bar{F}}$) необхідно знати експлуатаційні характеристики газостатичних опор, значення яких повністю залежать від характеру розподілу тиску газу в зазорі підшипників. В основі розрахунку потоку газового мастила у зазорі підшипників з газопроникними обмежувачами витрати використовується система рівнянь нерозривності, руху та енергії з теорії газової динаміки.

При аналізі течії газу в зазорі підшипника прийнято фундаментальні в теорії газового мастила припущення:

1. Потік газу в пористому середовищі вважається в'язким і ламінарним. До такої течії можливо застосувати закон Дарсі, що дозволяє вважати коефіцієнт проникності пористого матеріалу kP сталим.

2. Течія мастила в зазорі підшипника ізотермічна, а саме мастило стискається та задовольняє рівнянню стану $p = \rho RT$.

3. Радіус шпинделя набагато більше товщини мастильного шару.

4. Товщина мастильного шару така, що дозволяє знехтувати течією в плівці в напрямку нормалі до стінок підшипника і вважається, що тиск у цьому напрямі незмінний.

5. Масові та інерційні сили зневажливо малі в порівнянні з силами в'язкого тертя і відновлювальною силою мастильного шару, що урівноважує зовнішнє навантаження.

6. Течія газу в зазорі підшипника – стаціонарна.

Розв'язок задачі виконано для дворядного газостатичного підшипника з газопроникними вставками.

Газ під тиском з камери нагнітання надходить через газопроникні вставки в мастильний шар підшипника. Газопроникні вставки мають форму шпонок розміром $t \times a$. У загальному випадку кількість вставок в одному ряду дорівнює $N_{\text{ст}}$. Підшипник одночасно сприймає радіальне навантаження, що викликає зсув центру шпинделя в площині, що проходить через осі шпинделя і підшипника (площина зміщення), і поздовжній момент, який призводить до перекосу осі обертання шпинделя у вертикальній площині, що проходить через вісь підшипника (площина перекосу).

У роботі [10] показано, що прийняті припущення дозволяють визначити поле тиску газу у зазорі частково газопроникного підшипника за допомогою рівняння Нав'є-Стокса. Необхідно відзначити значну математичну складність опису динаміки течії газового мастила в

зазорі газостатичної опори шляхом застосування класичних методів інженерної теорії потоку. Отже, існує необхідність розвитку математичних підходів, які забезпечують коректний феноменологічний опис течії газового мастила в зазорі опори. Таким напрямом і є розв'язок крайових задач для рівнянь Нав'є-Стокса [10]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

і рівняння нерозривності

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (7)$$

де x, y – координати; t – час; u, v – розмірні складові швидкості вздовж осей x і y відповідно; ρ і η – густина і в'язкість мастила; P – тиск мастила у зазорі опори.

Результати

Для створення математичної моделі задачі, зручної для теоретичного аналізу, а також для забезпечення загальності розв'язків, введемо наступні безрозмірні величини: $\bar{x} = \frac{x}{a}$, $\bar{y} = \frac{y}{a}$ – безрозмірні координати (де характерний розмір a – ширина каналу); $\bar{u} = \frac{u}{U_0}$, $\bar{v} = \frac{v}{U_0}$ – безрозмірні складові швидкості вздовж осей x і y (де U_0 – швидкість матеріалу у вхідному каналі опори); $\bar{P} = \frac{P}{(\rho U_0^2)}$ – безрозмірний тиск; $Re = \frac{U_0 a \rho}{\eta}$ – число Рейнольдса; $\bar{t} = \frac{t \eta}{\rho a^2}$ – безрозмірний час; $\bar{x} = Re \cdot \bar{u} \bar{t}$, $\bar{y} = Re \cdot \bar{v} \bar{t}$ – безрозмірні координати через число Рейнольдса і безрозмірні складові швидкості та часу.

Для випадку, коли $Re \ll 1$ після перетворень рівнянь (5) і (6) одержуємо такі рівняння в консервативній формі:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + Re \left[\frac{\partial(\bar{u}^2)}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} \right] = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + Re \left[\frac{\partial(\bar{v}^2)}{\partial \bar{y}} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} \right] = \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2}. \quad (9)$$

Для розв'язку рівнянь (8) і (9) застосуємо один із чисельних методів, який знайшов широке розповсюдження при розв'язку задач механіки середовищ і легко реалізується за допомогою спеціалізованої програмної системи, що заснована на методі кінцевих елементів [11]. Метод, що використовується для кінцеворізнцевої апроксимації, ґрунтується на покриванні області зазору між підшипником і шпинделем рівномірною сіткою квадратних елементів з наступною заміною шуканих функцій $\bar{u} = \bar{u}(\bar{x}, \bar{y})$, $\bar{v} = \bar{v}(\bar{x}, \bar{y})$ і $\bar{P} = \bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$ на функції вузлових аргументів.

Кінцево-різнцеві аналоги рівнянь (8), (9) мають вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{i+1,j}^{n+1} = & \bar{u}_{i+1,j} - \tau Re \frac{(\bar{u}_{i+2,j} + \bar{u}_{i+1,j})^2 - (\bar{u}_{i+1,j} + \bar{u}_{i,j})^2}{4\xi} - \\ & - \tau Re \frac{(\bar{u}_{i+1,j} + \bar{u}_{i+1,j+1}) \cdot (\bar{v}_{i+1,j+1} + \bar{v}_{i,j+1}) - (\bar{u}_{i+1,j-1} + \bar{u}_{i+1,j}) \cdot (\bar{v}_{i+1,j} + \bar{v}_{i,j})}{4\xi} - \\ & - \tau Re \frac{\bar{P}_{i+1,j} - \bar{P}_{i,j}}{\xi} + \tau \frac{\bar{u}_{i+2,j} - 2\bar{u}_{i+1,j} + \bar{u}_{i,j}}{\xi^2} + \tau \frac{\bar{u}_{i+1,j+1} - 2\bar{u}_{i+1,j} + \bar{u}_{i+1,j-1}}{\xi^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_{i,j+1}^{n+1} = & \bar{v}_{i,j+1} - \tau Re \frac{(\bar{v}_{i,j+2} + \bar{v}_{i,j+1})^2 - (\bar{v}_{i,j+1} + \bar{v}_{i,j})^2}{4\bar{\xi}} - \\ & - \tau Re \frac{(\bar{u}_{i+1,j+1} + \bar{u}_{i+1,j})(\bar{v}_{i,j+1} + \bar{v}_{i+1,j+1}) - (\bar{u}_{i,j+1} + \bar{u}_{i,j})(\bar{v}_{i-1,j+1} + \bar{v}_{i,j+1})}{4\bar{\zeta}} - \\ & - \tau Re \frac{\bar{P}_{i,j+1} - \bar{P}_{i,j}}{\bar{\zeta}} + \tau \frac{\bar{v}_{i,j+2} - 2\bar{v}_{i,j+1} + \bar{v}_{i,j}}{\bar{\zeta}^2} + \tau \frac{\bar{v}_{i+1,j+1} - 2\bar{v}_{i,j+1} + \bar{v}_{i-1,j+1}}{\bar{\zeta}^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

де $\bar{\xi}$ і $\bar{\zeta}$ – кроки координати.

Безрозмірний тиск $\bar{P} = \bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$ в будь-якому вузлі кінцево-різницевої сітки визначаємо ітераційним методом:

$$\bar{P}_{i,j}^{n+1} = \frac{\bar{P}_{i+1,j} + \bar{P}_{i-1,j} + \beta^2(\bar{P}_{i,j+1} + \bar{P}_{i,j-1}) - \bar{\xi}^2 S_{i,j}}{2(1+\beta^2)}, \quad (12)$$

$$\text{де} \quad D_{i,j} = \frac{\bar{u}_{i+1,j} - \bar{u}_{i,j}}{\bar{\xi}} + \frac{\bar{v}_{i,j+1} - \bar{v}_{i,j}}{\bar{\zeta}}; \quad (13)$$

$$D_{i,j} = \frac{\bar{u}_{i+1,j} - \bar{u}_{i,j}}{\bar{\xi}} + \frac{\bar{v}_{i,j+1} - \bar{v}_{i,j}}{\bar{\zeta}}. \quad (14)$$

Водночас необхідно відзначити, що чисельне рішення крайової задачі для рівнянь Нав'є-Стокса, записаних через змінні компоненти швидкості течії u, v і тиск P , не повною мірою враховує вплив вхідного газопроникного каналу і вимагає порівняно великого часу обчислень, оскільки чисельне рішення будується для системи двох диференціальних рівнянь у частинних похідних (8), (9).

Тому зручно проаналізувати рівняння переносу вихору і тим самим перейти до рішення одного диференціального рівняння у частинних похідних замість системи. Відповідно до методик [12, 13] виконаємо диференціювання (8) по y і (9) по x , виключимо тиск і визначимо вихор як:

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = 0. \quad (15)$$

Тоді маємо:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -u \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right). \quad (16)$$

Або в консервативній формі:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y} + \frac{\eta}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right). \quad (17)$$

Визначимо функцію потоку із співвідношень:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = u; \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v. \quad (18)$$

Тоді рівняння вихору (15) буде мати вигляд:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \zeta. \quad (19)$$

Безрозмірний вихор має вигляд

$$\bar{\zeta} = \frac{\zeta a}{u_0},$$

а безрозмірна функція потоку –

$$\bar{\psi} = \frac{\psi}{u_0 a}.$$

Тоді рівняння переносу вихору (17) буде мати вид:

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -Re \left(\frac{\partial(\bar{u}\bar{\zeta})}{\partial \bar{x}} - \frac{\partial(\bar{v}\bar{\zeta})}{\partial \bar{y}} \right) + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2}, \quad (20)$$

а рівняння функцій потоку (18) набудуть вигляд:

$$\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{y}} = \bar{u}; \quad \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}} = -\bar{v}. \quad (21)$$

Тоді вихор (15) запишеться так:

$$\bar{\zeta} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}}. \quad (22)$$

Запишемо співвідношення (20) у кінцеворізницево-му вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}_{i,j}^{n+1} = & \bar{\zeta}_{i,j}^n - \bar{\tau} Re \\ & \left(\frac{\bar{u}_{i+1,j} \bar{\zeta}_{i+1,j}^n - \bar{u}_{i-1,j} \bar{\zeta}_{i-1,j}^n}{2\bar{\xi}} + \frac{\bar{v}_{i,j+1} \bar{\zeta}_{i,j+1}^n - \bar{v}_{i,j-1} \bar{\zeta}_{i,j-1}^n}{2\bar{\zeta}} \right) + \\ & + \bar{\tau} \left(\frac{\bar{\zeta}_{i+1,j}^n - \bar{\zeta}_{i,j}^n - \bar{\zeta}_{i,j}^{n+1} + \bar{\zeta}_{i-1,j}^{n+1}}{\bar{\xi}^2} + \frac{\bar{\zeta}_{i,j+1}^n - \bar{\zeta}_{i,j}^n - \bar{\zeta}_{i,j}^{n+1} + \bar{\zeta}_{i,j-1}^{n+1}}{\bar{\zeta}^2} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Після перетворення отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}_{i,j}^{n+1} = & \bar{\zeta}_{i,j}^n - \bar{\tau} Re \\ & \left(\frac{\bar{u}_{i+1,j} \bar{\zeta}_{i+1,j}^n - \bar{u}_{i-1,j} \bar{\zeta}_{i-1,j}^n}{2\bar{\xi}} + \frac{\bar{v}_{i,j+1} \bar{\zeta}_{i,j+1}^n - \bar{v}_{i,j-1} \bar{\zeta}_{i,j-1}^n}{2\bar{\zeta}} \right) + \\ & + \bar{\tau} \left(\frac{\bar{\zeta}_{i+1,j}^n - \bar{\zeta}_{i,j}^n - \bar{\zeta}_{i,j}^{n+1} + \bar{\zeta}_{i-1,j}^{n+1}}{\bar{\xi}^2} + \frac{\bar{\zeta}_{i,j+1}^n - \bar{\zeta}_{i,j}^n - \bar{\zeta}_{i,j}^{n+1} + \bar{\zeta}_{i,j-1}^{n+1}}{\bar{\zeta}^2} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

де $\bar{\xi} = \frac{\xi}{a}$ – безрозмірний крок координати вздовж вісі x ; $\bar{\zeta} = \frac{\zeta}{a}$ – безрозмірний крок координати вздовж вісі y ; $\bar{\tau} = \frac{\Delta t \eta}{\rho a^2}$ – безрозмірний крок часу; Δt – розмірний крок часу.

Аналогічно визначимо співвідношення (20) у кінцеворізницево-му вигляді для інших значень операторів i, j .

Після диференціювання рівняння імпульсу і додавання результатів отримаємо рівняння для тиску:

$$\Delta P = -Re \left(\frac{\partial^2(\bar{u}^2)}{\partial \bar{x}^2} + 2 \frac{\partial^2(\bar{u}\bar{v})}{\partial \bar{x} \partial \bar{y}} + \frac{\partial^2(\bar{v}^2)}{\partial \bar{y}^2} + \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{t}} \right) + \left(\frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{P}}{\partial \bar{y}^2} \right), \quad (25)$$

$$\text{де} \quad D = \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} - \text{дивергенція швидкості}. \quad (26)$$

Різницеві оператори з урахуванням різницевого співвідношення

$$\frac{\partial D}{\partial \bar{t}} \Big|_{i,j} = \frac{D^{n+1} - D^n}{\bar{\tau}} \Big|_{i,j} = -\frac{D^n}{\bar{\tau}} \quad (27)$$

будуть наступні:

$$D_{i,j} = \frac{\bar{u}_{i+1,j} - \bar{u}_{i,j}}{\bar{\xi}} + \frac{\bar{v}_{i,j+1} - \bar{v}_{i,j}}{\bar{\zeta}}, \quad (28)$$

$$\begin{aligned}
S_{i,j} = & -Re \frac{(\bar{u}_{i+2,j} + \bar{u}_{i+1,j})^2 - 2(\bar{u}_{i+1,j} + \bar{u}_{i,j})^2 + (\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{i-1,j})^2}{4\bar{\zeta}^2} - Re \frac{(\bar{u}_{i+1,j} + \bar{u}_{i+1,j+1})(\bar{v}_{i+1,j+1} + \bar{v}_{i,j+1}) - (\bar{u}_{i+1,j-1} + \bar{u}_{i+1,j})(\bar{v}_{i+1,j} + \bar{v}_{i,j})}{2\bar{\zeta}\bar{\zeta}} + \\
& + Re \frac{(\bar{u}_{i,j+1} + \bar{u}_{i,j})(\bar{v}_{i-1,j+1} + \bar{v}_{i,j+1}) - (\bar{u}_{i,j-1} + \bar{u}_{i,j})(\bar{v}_{i-1,j} + \bar{v}_{i,j})}{2\bar{\zeta}\bar{\zeta}} - Re \frac{(\bar{v}_{i,j+2} + \bar{v}_{i,j+1})^2 - 2(\bar{v}_{i,j+1} + \bar{v}_{i,j})^2 + (\bar{v}_{i,j} + \bar{v}_{i,j-1})^2}{4\bar{\zeta}^2} - Re \frac{D_{i,j}}{\bar{\tau}} - \\
& - \frac{D_{i+1,j} - 2D_{i,j} + D_{i-1,j}}{\bar{\zeta}^2} - \frac{D_{i,j+1} - 2D_{i,j} + D_{i,j-1}}{\bar{\zeta}^2}.
\end{aligned} \quad (29)$$

Функцію потоку і тиск визначаємо ітераційним методом за співвідношеннями:

$$\bar{\psi}_{i,j}^{n+1} = \frac{\bar{\psi}_{i+1,j}^k + \bar{\psi}_{i-1,j}^k + \beta^2 \bar{\psi}_{i,j+1}^k + \beta^2 \bar{\psi}_{i,j-1}^k - \bar{\zeta}^2 S_{i,j}}{2(1+\beta^2)}, \quad (30)$$

$$\bar{P}_{i,j}^{n+1} = \frac{\bar{P}_{i+1,j}^n + \bar{P}_{i-1,j}^n + \beta^2 (\bar{P}_{i,j+1}^n + \bar{P}_{i,j-1}^n) - \bar{\zeta}^2 S_{i,j}}{2(1+\beta^2)}. \quad (31)$$

Оцінка достовірності результатів теоретичного розрахунку вихідних характеристик шпиндельного

вузла виконана шляхом зіставлення з дослідними даними. Експерименти проведені під час роботи опор у режимі відсутності торкання між шийкою валу і підшипником, тобто їх розділяє шар газового мастила. Вихідні характеристики шпиндельного вузла під час роботи опор у такому режимі представлені на Рисунках 2 і 3. Аналіз представлених графіків показав, що максимальна помилка у визначенні залежності безрозмірного тиску $\bar{P}$ від відносного навантаження $\bar{F}$ не перевищує 6 %, а від коефіцієнта жорсткості k_F не перевищує 10 %.

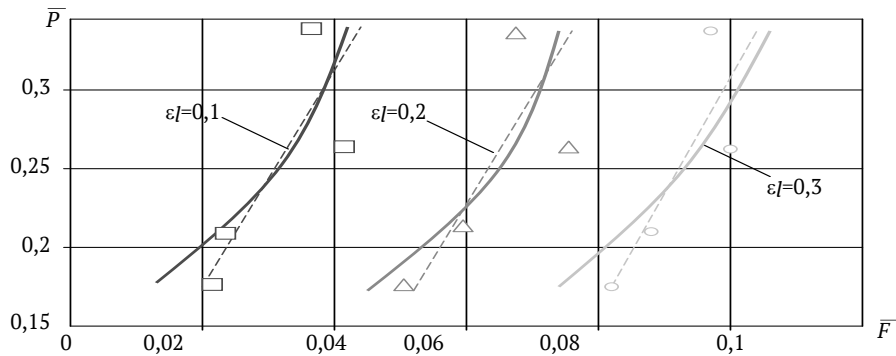


Рисунок 2. Залежність безрозмірного тиску $\bar{P} = \bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$ від відносного навантаження $\bar{F}$ та відносного ексцентриситету ϵl

Примітки: - - - - - апроксимація експериментальних даних; — — — теоретична крива
Джерело: розроблено авторами

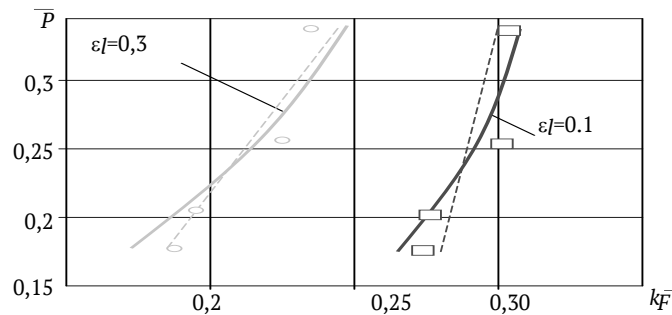


Рисунок 3. Залежність безрозмірного тиску $\bar{P} = \bar{P}(\bar{x}, \bar{y})$ від коефіцієнту жорсткості k_F та відносного ексцентриситету ϵl

Примітки: - - - - - апроксимація експериментальних даних; — — — теоретична крива)
Джерело: розроблено авторами

Дослідженнями [14, 15] встановлено, що зростання коефіцієнтів несучої здатності обумовлене, головним чином, превалюючим падінням тиску в розвантажувальній частині підшипника. При подальшому збільшенні конструктивного параметра домінуючим стає зниження тиску в навантажувальній частині підшипника, внаслідок чого коефіцієнт несучої здатності починає знижуватися. Чисельне дослідження впливу

відносного тиску нагнітання газу при роботі газових опор в режимі відсутності торкання між шийкою валу і підшипником показує, що помітного впливу на вихідні характеристики він не надає. Незначне прирощення навантаження на консолі валу та жорсткості при відносному тиску нагнітання газових опор в області великих чисел стисливості пов'язаний з посиленням ефекту мастильного клина.

Висновки

Запропоновано математичну модель течії газу в зазорі підшипників на газовому мастилі та методика розрахунку визначити поле тиску газу у зазорі частково газопроникного підшипника шпиндельного вузла. Аналіз експериментальних та теоретичних вихідних характеристик шпиндельного вузла показав, що розроблена методика дозволяє з достатньою для

практичного застосування точністю визначати експлуатаційні характеристики шпиндельного вузла з газопроникними шпонковими обмежувачами витрати. Розбіжність розрахункових та дослідних значень залежності безрозмірного тиску $\bar{P}$ від відносного навантаження $\bar{F}$ не перевищує 6 %, а від коефіцієнта жорсткості k_F не перевищує 10 %.

Список використаної літератури

- [1] Chen, S., Yang, S., Liao, Z., Cheung, C.F., Jiang, Z., & Zhang, F. (2021). Curvature effect on surface topography and uniform scallop height control in normal grinding of optical curved surface considering wheel vibration. *Optics Express*, 29(6), 8041-8063. doi: 10.1364/OE.418599.
- [2] Gupta, M.K., et al. (2021). A review on conventional and advanced minimum quantity lubrication approaches on performance measures of grinding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117, 729-750. doi: 10.1007/s00170-021-07785-x.
- [3] Chen, D., Gao, X., Zha, C., Pan, R., & Fan J. (2020). Tilt angle of hydrostatic spindle influenced by microscale effects. *Tribology Transactions*, 63, 28-37. doi: 10.1080/10402004.2019.1654053.
- [4] Zha, J., Chen, Y., Zhang, P., & Chen, R. (2020). Effect of design parameters and operational conditions on the motion accuracy of hydrostatic thrust bearing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(8), 1481-1491. doi: 10.1177/0954406219895532.
- [5] Gao, S., Shang, Y., Gao, Q., Lu, L., Zhu, M., Sun, Y., & Yu, W. (2021). CFD-based investigation on effects of orifice length-diameter ratio for the design of hydrostatic thrust bearings. *Applied Sciences*, 11(3), article number 959. doi: 10.3390/app11030959.
- [6] Zhang, H., Liu, Y., Hafezi, M., Hua, M., & Dong G. (2020). A distribution design for circular concave textures on sectorial thrust bearing pads. *Tribology International*, 149, article number 105733. doi: 10.1016/j.triboint.2019.04.017.
- [7] Cicone, T., Marinescu, A.A., & Sorohan, S. (2020). A simple analytical model for an elastohydrostatic thrust bearing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 724, article number 12041. doi: 10.1088/1757-899X/724/1/012041.
- [8] Shang, Y., Cheng, K., Ding, H., & Chen, S. (2020). Multiscale modelling and analysis on the heavy-duty hydrostatic journal bearing for a precision press machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 825, article number 12010. doi: 10.1088/1757-899X/825/1/012010.
- [9] Oliynyk, K.O. (2020). Synthesis of spindle assemblies on the basis of motor-spindles with the use of system-morphological approach. *Bulletin of the Mykhailo Ostrogradsky KrNU*, 5-6(124-125), 133-138. doi: 10.30929/1995-0519.2020.5-6.133-138.
- [10] Perig, O.V., & Golodenko, N.N. (2021). Fluid mechanics-based research into beveled punch-assisted extrusion through a T-shaped angular domain. *Kautschuk und Gummi Kunststoffe*, 74(1), 47-50.
- [11] Vitiuk, A., Polishchuk, L., Savina, N.B., Adler, O.O., Kashaganova, G., & Kumargazhanova, S. (2023). Engineering and technical assessment of the competitiveness of Ukrainian mechanical engineering enterprise based on the application of regression models. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiskathis*, 13(3), 125-128. <https://doi.org/10.35784/iapgos.5351>.
- [12] Syvak, R.I., Solona, O.V., & Zaliznyak, R.O. (2022). Peculiarities of using one- and two-dimensional finite elements in modeling the kinematics of plastic flow of metal. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 2(105), 45-51. doi: 10.37128/2306-8744-2022-2-5.
- [13] Xiong, W.L., Sun, W.B., Liu, K., Xu, M.H., & Pei, T. (2021). Active magnetic bearing technology development in high-speed motorized spindles. *Journal of Mechanical Engineering*, 57, 1-17.
- [14] Zhu, Y.T., Yao, Y.G., Huang, K., Li, D.Y., Zhang, H.T., & Zhai, D.Y. (2021). The study of influence coefficient method and its application in the dynamic balancing for high-speed spindle. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 50, 228-235.
- [15] Zhang, Y., Li, M., Yao, H., Gou, Y., & Wang, X. (2021). A modal-based balancing method for a high-speed rotor without trial weights. *Mechanical Sciences*, 12, 85-96.

Leonid Polishchuk

Doctor of Technical Sciences, Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5916-2413>

Roman Syvak

Doctor of Technical Sciences, Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7459-2585>

Bohdan Resident

Student
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0009-6578-8576>

Determination of the pressure field in the gasstatic support of a high-speed spindle assembly of a metal-cutting machine

Abstract. Accuracy, speed and durability of spindle assemblies allow to achieve high performance during grinding of products. The use of spindle assemblies on rolling bearings is characterised by a relatively low peripheral cutting speed, which forces to resort to strong pressing of the wheel. This leads to distortion of the geometry of the product and to a decrease in the quality of the ground surface. The use of hydrostatic and hydrodynamic bearings in the designs of high-speed spindle assemblies leads to a limitation of the spindle rotation frequency due to friction losses. Spindles on electromagnetic supports have not yet found wide application due to the complexity and high cost of spindles and electronic control systems. The introduction of gas-lubricated bearings into the design of spindle assemblies allows to increase the rigidity and mass of the spindle by increasing the diameter of the working journals while simultaneously increasing the peripheral speed of the tool. Increasing the peripheral speed allows grinding with high feeds, which leads to increased productivity, improved grinding quality and reduced sensitivity to imbalance of the mandrel and circle, since their mass is noticeably less than the mass of the spindle. However, it is necessary to note the significant mathematical complexity of describing the dynamics of the flow of gas lubricant in the gap of a gas-static support by using classical methods of engineering flow theory. Therefore, the article proposes to describe the flow of gas lubricant in the gap of the support by solving the boundary value problem for the Navier-Stokes equations. As a result of numerical solution of the obtained equations in conservative form, the dependences of dimensionless pressure on relative load and stiffness coefficient were obtained. The analysis of experimental and theoretical obtained characteristics of the spindle assembly was performed and it was shown that the developed method allows to determine the operational characteristics of the spindle assembly with gas-permeable key flow limiters with sufficient accuracy for practical application

Keywords: high-speed spindle; gas bearing; relative pressure; relative load; stiffness

Yevhenii Tabachkivskyi*

Master

National University "Odesa Maritime Academy"

65052, 8 Didrikhson Str., Odesa, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0005-1489-2091>

Mykhailo Bushlia

Master

National University "Odesa Maritime Academy"

65052, 8 Didrikhson Str., Odesa, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0000-4200-0904>

Innovations in observational navigation techniques for precise ship positioning

Abstract. The purpose of the study was to enhance methodologies for determining ship position, thereby increasing the accuracy and reliability of navigation. The study involves a comparative analysis of current methods for establishing navigational positions, specifically using bearing and radar data, with an assessment of the accuracy, efficiency, and reliability of each approach. Findings indicated that the precision and effectiveness of each method are heavily influenced by navigational conditions, including weather, geographical location, and vessel type. Although conventional methods remain applicable, they present limitations that may result in substantial positioning errors. In response to these limitations, new approaches are developed and tested, notably through the combined use of direction finders and radar data to improve accuracy. A comparative analysis of these innovative methods against conventional practices demonstrates enhanced accuracy and reliability under variable navigational conditions. These findings inform recommendations for refining ship positioning techniques to enhance navigational safety and optimise maritime transport operations. The recommendations emphasise advancing the use of modern technologies, such as global navigation systems and the integration of multiple data sources, to improve the dependability of navigation solutions. In addition, the adoption of automated systems for analysing and processing navigational data is advised to support timely decision-making in challenging navigational environments.

Keywords: bearings, radar data, transportation, combined use, global systems

Introduction

The field of shipbuilding and navigation has seen significant advancements, presenting professionals with new challenges in improving methods for determining vessel location, a critical component for both safety and effective management. The accuracy of navigational equipment is paramount, not only in ensuring safe passage but also in reducing environmental risks, optimising routes, and enhancing the overall safety of maritime transport. With the growth of maritime traffic and increasingly complex

environmental conditions, refining navigational methods has become a pressing issue. Precise positioning is essential for accident prevention, crew and cargo protection, and minimising environmental impact. Errors in navigational calculations can lead to serious consequences, such as collisions, grounding, or even loss of orientation at sea, posing a threat to crew safety. Consequently, the ongoing improvement of ship location methods is a vital objective for modern science and technology. Research focused on

Suggested Citation:

Tabachkivskyi, Ye., & Bushlia, M. (2024). Innovations in observational navigation techniques for precise ship positioning. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 142-152. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.142.

*Corresponding author



enhancing the accuracy and reliability of navigational systems is crucial, as it contributes to improved maritime safety and optimised transportation.

The accuracy of determining a ship's position under varying navigational conditions has been the subject of extensive study. N. Al Bitar & A. Gavrilov (2021) highlighted the importance of integrating data from multiple navigational systems to improve observational accuracy under changing navigational factors. They also noted that combining bearings and radar data could significantly reduce navigation measurement errors. Z. Hong *et al.* (2022) focused on the impact of weather conditions on navigation system accuracy, emphasising the need to adapt methods to atmospheric changes. Their study provides examples that demonstrate how different atmospheric phenomena can affect navigation results. M. Elsanhoury *et al.* (2022) developed new navigation data processing algorithms that can reduce the impact of noise and interference on location accuracy. Their approaches, based on advanced mathematical methods, demonstrated enhanced reliability of results. M.Y. Arafat *et al.* (2023) explored conventional bearing techniques, such as azimuth usage and trigonometric methods, and their limitations in modern conditions. They suggested revising the fundamental principles of navigation, including coordinate systems, compass methods, and celestial observations. Their findings indicate that new technologies could greatly enhance navigational precision and reliability. K. Naus *et al.* (2021) discussed the efficacy of radar systems combined with GPS, which allows for greater accuracy in congested maritime environments. They also noted that integrating these technologies could significantly simplify the navigation process for crews.

A. Comber *et al.* (2023) emphasised the importance of considering the geographical features of the area when choosing navigation methods. Their paper provided specific examples where conventional methods proved ineffective due to unique environmental conditions. X. Zhang *et al.* (2021) noted that modern global navigation systems significantly enhance measurement accuracy, but their use requires specialised crew training. They emphasised the need for training and drills to ensure the proper use of these technologies. C. Liu *et al.* (2022) explored the role of automated location determination in reducing human error in navigation, indicating that automation can substantially improve maritime safety by reducing risks associated with crew mistakes. M. Martelli *et al.* (2021) argued that traffic monitoring and management systems could significantly improve maritime safety. Their study demonstrated that the integration of such systems allows for efficient control of sea traffic, reducing accident risks. A.T. Hoang *et al.* (2022) stated that new technological solutions could revolutionise the conventional approach to navigation observation. They emphasised that developing new methods and tools to enhance maritime safety is an important area in marine navigation.

Despite significant efforts in this field, there are still gaps that require further examination, particularly regarding

the integration of various navigation systems and their adaptation to specific maritime conditions. The purpose of the study was to identify ways and methods to improve the accuracy and reliability of vessel positioning and assess their effectiveness compared with conventional techniques.

Materials and Methods

In this study, various vessel positioning methods were meticulously analysed to evaluate their accuracy, effectiveness, reliability, and applicability under different navigational conditions. Initially, a review of scientific literature on vessel positioning was conducted. This review provides a comprehensive overview of the available methods and technologies actively used in navigation, highlighting their advantages and disadvantages. Subsequently, data synthesis was performed to develop a clear understanding of potential ways to improve methods. Methods used include comparison, classification, analysis, modelling, structuring, and evaluation. A comparative analysis was conducted for each method based on criteria such as accuracy, reliability, cost, and applicability in different conditions. Three primary methods were investigated: the directional method, radar data, and Global Navigation Satellite Systems (GNSS).

The study analyses the directional method, which involves measuring angles to navigational landmarks, such as other vessels or coastal objects, to determine location. Observational data gathered under various weather conditions were used to assess the effectiveness of the directional method in low-visibility situations. The effectiveness of radar systems that use radio waves to detect objects on the water surface was also analysed. The accuracy of radar systems was estimated based on experimental data. In addition, the financial aspects of their installation and maintenance were examined. The study further examines global navigation satellite systems (GNSS), including GPS (USA), GLONASS (Russia), Galileo (European Union), and BeiDou (China), with an emphasis on their accuracy under different conditions. This analysis enables identification of the strengths and limitations of each system, and their ability to maintain accuracy in adverse conditions.

The study investigates the root mean square error (RMSE) dependency on the bearing difference to assess the accuracy of navigational measurements. This dependency allows for evaluation of how the angle between directions to navigational landmarks impacts the overall positioning error of a vessel. Examining this relationship contributes to improving positioning methods and enhancing the reliability of navigation procedures. A formula for RMSE was applied to quantitatively assess the accuracy of each method:

$$M_{0(miles)} = \frac{1}{\sin \theta} \cdot \sqrt{\left(\frac{D_{(miles)} \cdot m_{RPS}^0}{57.3^0}\right)^2 + m_D^2(miles)}, \quad (1)$$

where: $M_{0(miles)}$ - distance adjustment; θ - bearing difference between landmarks; D - distances from the observed position; m_{RPS}^0 - bearing measurement error; m_D - distance measurement error.

This formula facilitates evaluation of how measurement errors impact overall accuracy. Particular attention was given to the combined use of positioning methods. The integration of data from directional methods and radar systems achieves higher accuracy. Combining information from multiple sources reduces errors and improves the reliability of navigational calculations. A comparative analysis of standard navigational practices and new technologies was conducted in the final phase of the study. Field tests performed under different conditions provide a comprehensive assessment of the effectiveness of each method, enabling the formulation of recommendations for improving navigational practices.

Results

Accurate vessel positioning is critical for ensuring the safety and efficiency of maritime transport. Vessel positioning methods continue to evolve, particularly with the use of bearings and radar data. These two approaches offer the required accuracy for navigational calculations, although each has distinct characteristics, advantages, and limitations.

Bearing-based navigation is a method that relies on measuring angles relative to specific landmarks, such as navigational markers or other vessels (Blindheim & Johansen, 2021). This method enables the determination of a vessel's course and relative position. The advantages of bearing-based navigation include ease of implementation and relatively low equipment costs. However, the accuracy of this method is significantly influenced by environmental conditions, such as visibility, weather, and the quality of the landmarks used. For instance, in conditions of poor visibility or during storms, the precision of bearings may decrease, which increases navigational risks. In contrast, radar systems use radio waves to detect objects on the water's surface (Zeng *et al.*, 2023). Radar provides high accuracy and can operate effectively when bearing-based navigation becomes unreliable. This method not only determines a vessel's position but also assesses its speed and direction. However, radar systems require substantial financial investment for installation and maintenance. In addition, their effectiveness can be reduced in complex terrain or when obstacles, such as other vessels, are present.

The combined use of bearing-based methods and radar data can substantially enhance the accuracy of a vessel's location determination. For example, radar data can offer an overall view of the surrounding situation, while bearings can provide precise angular measurements to specific landmarks. This integrated approach helps to reduce the errors associated with each individual method, improving the reliability of navigational calculations. Advances in global navigation satellite systems could further enhance the precision and reliability of vessel positioning, contributing to increased safety in maritime transport and reducing navigation risks. In maritime navigation, the accuracy and efficiency of positioning methods are critical for ensuring the safety of transport and optimising routes. Various methods, including bearing-based navigation, radar,

and GNSS, demonstrate different levels of accuracy and efficiency depending on navigational conditions, such as weather, geographic location, and vessel type. Understanding these factors is crucial when selecting the optimal navigation method for specific situations.

Bearing-based navigation is one of the oldest and most widely used methods for determining a vessel's position. This method involves measuring the angle to an object (such as another vessel or a navigational marker) from a fixed point. The accuracy of bearing-based navigation heavily depends on visibility and environmental conditions. In favourable weather conditions, such as clear skies and no obstructions, bearings can provide sufficient measurement accuracy. However, in conditions of limited visibility, such as thick fog or heavy rain, the precision of bearings can decrease significantly. In such situations, visually identifying landmarks is challenging, which may lead to measurement errors. Conventional bearing methods become unreliable as reduced visibility complicates the accurate assessment of the angle of an object. Bearing-based navigation can be used in conjunction with other navigation technologies to improve accuracy. For instance, integrating data from radar systems or GNSS allows for more reliable results. This approach helps to mitigate the limitations of bearing-based methods under poor visibility conditions and ensures greater accuracy in determining a vessel's position (Alizadeh *et al.*, 2021).

Radar methods use radio waves to detect objects and exhibit several key characteristics. The operational principle of radar systems involves emitting radio waves that reflect off objects (such as ships, islands, or coastlines) and return to the receiver. By analysing the time taken for the signal to return, the system can determine the distance to the object. Radar remains effective in conditions of poor visibility, such as fog, rain, or nighttime, making it invaluable for maritime safety as it enables the detection of other vessels or obstacles when visual observation is impossible. However, while radar methods are highly useful, their accuracy can be compromised in high radio-noise environments. For instance, in urban or industrial areas, numerous electronic devices emit radio waves that can interfere with the system's correct operation, which is especially relevant for river navigation. In addition, in complex terrains such as coastal zones with numerous natural or artificial obstacles, radar signals may experience reflections and overlaps, complicating measurement accuracy. In such cases, radar systems may provide inaccurate information about object locations. Finally, the operation of radar methods requires specialised equipment, such as radar stations and receivers, which can present a barrier for smaller or older vessels that may lack the capability to install such technology. This limitation reduces their ability for precise navigational control. Consequently, while radar methods are a powerful tool in maritime navigation, they require adequate technical support and suitable conditions to ensure optimal accuracy (Asiyabi *et al.*, 2023).

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are a key tool for determining location and time in modern

navigation, providing a high level of accuracy and reliability due to their complex infrastructure, which includes several satellite networks, each with its own characteristics and advantages. GNSS comprises several key components that contribute to its high accuracy and reliability. The Global Positioning System (GPS) is the most well-known satellite navigation system, developed by the United States. It consists of a network of approximately 30 satellites orbiting Earth, providing positional and time data. The Global Navigation Satellite System (GLONASS), developed by Russia, consists of 24 satellites. GLONASS offers similar functions to GPS, enhancing navigational accuracy, especially in areas where the GPS signal may be weakened. Galileo is a European satellite navigation system under development, aiming to provide more precise and reliable positioning, particularly in urbanised and challenging natural environments. BeiDou, the Chinese satellite navigation system, offers navigation services for China and other countries, comprising 30 satellites that provide global coverage. Through the use of these systems, GNSS can deliver high measurement accuracy; however, their effectiveness can significantly diminish when signals are obstructed. For example, in urban areas, tall buildings may block direct signals, and mountainous regions may present challenges due to the terrain. In remote regions where satellite coverage is limited, accuracy may also decrease. Atmospheric conditions are also important, as they can affect the speed of signals passing through the atmosphere. Achieving maximum accuracy in navigation with GNSS requires consideration of all these factors (Rodriguez-Alvarez *et al.*, 2023).

Thus, the evaluation of the accuracy and efficiency of each method for determining a vessel's position should account for the specific navigation conditions. In each particular case, selecting the optimal method may depend on factors such as weather conditions, geographic characteristics, and the technical capabilities of the vessel. Further analysis in this field could contribute to developing new, more adaptive navigation systems capable of providing high levels of accuracy and safety in constantly changing conditions.

The main methods of vessel positioning observation include bearings taken from two or three points, bearing and distance measurement, radar data, and a cross-bearing method. Two-bearing positioning involves determining the angle to a vessel from two different points. This method requires precise knowledge of both points' coordinates and the bearing measurements. The main advantage of this method is that it provides adequate accuracy if bearings are taken from well-visible landmarks. However, its limitation lies in its dependency on good visibility and accurate bearings (Shajahan *et al.*, 2024). Using three bearings is a more reliable method, as it allows for triangulation techniques to achieve more accurate positioning. This method helps to reduce errors associated with computational deviations, but its effectiveness is limited by the visibility of landmarks. The bearing and distance method combines angle and distance measurements to a vessel, enabling precise

determination of an object's location relative to navigational landmarks. Using bearing alongside distance measurement provides a more accurate location assessment, although the precision of this method can decrease in conditions of poor visibility or when distance measurements are inaccurate (Lu *et al.*, 2023).

Radar methods represent modern observation technologies that use radio waves to detect vessels and other objects on the water's surface. This technique relies on transmitting radio signals from a transmitter to a target and analysing the reflected signals that return to the receiver. By measuring the time taken for the signal to travel, the distance to the object can be determined. Radar systems are particularly effective in low-visibility conditions, such as fog, rain, or darkness, as they are not reliant on optical conditions. In addition, these systems can operate in any weather, providing continuous monitoring of the navigational environment. However, the use of radar methods requires specialised equipment, including radars, antennas, and signal processors. Notably, the effectiveness of these systems may decrease in areas with high levels of radio noise or strong electromagnetic interference, which can distort the received data and complicate accurate object detection.

Cross-bearing is a navigation method applied from a moving platform, such as a boat or ship, to determine the angle to a stationary object, like a lighthouse or another vessel. This method allows for real-time location data of a vessel by using a compass or other navigational instruments to measure the bearing. In practice, as the vessel manoeuvres, it can continuously record the angle between its direction of movement and the direction to the stationary object. Based on these data, the location of the vessel can be calculated, although the accuracy of this method may decrease due to the movement of the platform, which introduces additional measurement errors. Cross-bearing is useful in situations where other location methods, such as conventional bearings or GPS, may be hindered by limited visibility or signal loss (Mazurek *et al.*, 2021). Each of these methods requires certain conditions and has its own advantages and limitations. However, they all share an essential factor – the need to consider both distance and angular differences between landmarks in calculations. These parameters are critical for the accuracy of navigational data, as even minor errors in determining them can lead to significant inaccuracies.

To achieve more accurate measurements, values that help reduce the radial root mean square error (RMSE) are typically used. The smaller the RMSE, the more precise the vessel's location determination will be (Liu *et al.*, 2021). Further calculations will allow for a better understanding of how measurement accuracy depends on the distance to landmarks and the angle between them. In situations where the angles between landmarks vary significantly, accuracy may improve considerably. Thus, by analysing these dependencies, the optimal conditions for selecting an observation method can be established, which will enhance the efficiency of maritime navigation. To calculate

the dependence of observed location accuracy on the angle between bearings to a landmark, the following formula (1) for determining RMSE was used. Assuming: $\theta = 30^\circ; 40^\circ; 50^\circ; 60^\circ; 70^\circ; 80^\circ; 90^\circ$; $D = 25$ miles; $m^\circ(D) = 1\%$ of $D = 0.25$;

$m^\circ(\theta) = 1^\circ$. In this case, data presented in Table 1 were obtained, and a graph illustrating the relationship between observational location accuracy and the angle between bearings on a landmark was generated (Fig. 1).

Table 1. Relationship between root mean square error and bearing difference

Bearing difference θ (degrees)	Root mean square error Mo
30	1.02
40	0.80
50	0.67
60	0.59
70	0.54
80	0.52
90	0.50

Source: created by the authors

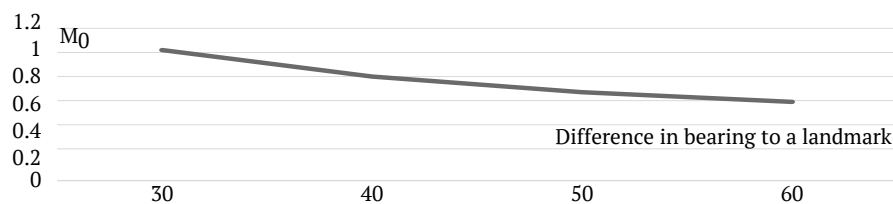


Figure 1. Graph showing the relationship between observational location accuracy and the angle between bearings on a landmark

Source: created by the authors

Based on the data obtained, it was established that an increase in the angular difference between landmarks reduces the root mean square error, thereby enhancing the accuracy of observation. Similar calculations were conducted to determine the relationship between observational accuracy and distance to the landmark.

Assuming: $\theta = 60^\circ$; $D = 1$ mile; 5 miles; 10 miles; 15 miles; 20 miles; 25 miles; 30 miles; 35 miles; 40 miles; $m^\circ(D) = 1\%$ of $D = 0.01; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2; 0.25; 0.3; 0.35; 0.4$; $m^\circ(\theta) = 1^\circ$. In this case, the following data was obtained (Table 2). To enhance clarity, a graph illustrating the relationship was created (Fig. 2).

Table 2. Relationship between root mean square error and distance to landmark

Distance from observational location (miles)	Root Mean Square Error Mo
1	0.02
5	0.23
10	0.21
15	0.32
20	0.45
25	0.58
30	0.7
35	0.84
40	0.99

Source: created by the authors

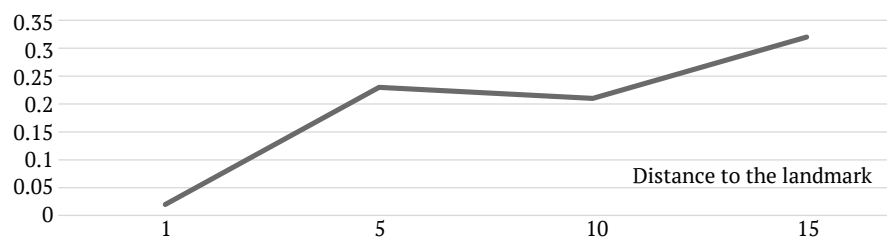


Figure 2. Graph showing the relationship between observed position accuracy and distance to the landmark

Source: created by the authors

The graph clearly demonstrates a trend: as the distance to the observation point increases, the root mean square error also rises, which in turn decreases the accuracy of measurements. Notably, the RMSE remains nearly constant between distances of 5 to 10 miles, indicating that measurement accuracy remains high within this range. This may be due to optimal observation conditions at these distances, where the impact of external factors is minimal. However, beyond this range, the error increases, negatively affecting accuracy. Calculating the RMSE in navigational measurements is crucial for assessing the accuracy of vessel positioning. This analysis helps understand how accuracy varies with increasing distance from the observation object. This is important for optimising navigation systems, as it allows adjusting them to achieve maximum accuracy at certain distances. It also assists in risk assessment and in anticipating potential errors during route planning.

In addition, considering RMSE enhances precision in vessel manoeuvres, contributing to navigational safety.

In modern navigation, the accuracy and reliability of navigational data are critical for ensuring the safety and efficiency of transportation (Melnik & Onyshchenko, 2021). Standard methods, such as the use of bearings and radar data, have their advantages; however, the development of new approaches can offer higher levels of accuracy. When comparing new methods to conventional ones, several key aspects should be considered. Standard practices may demonstrate satisfactory accuracy in stable navigational conditions, but their effectiveness often decreases under conditions of climate change, reduced visibility, or the presence of obstacles. Meanwhile, new approaches that integrate data from multiple sources, such as global navigation satellite systems (GNSS) and radar technologies, show higher accuracy in challenging conditions, owing to their ability to correct data in real time (Table 3).

Table 3. Comparative table of navigation methods: conventional and new approaches

Method	Advantages	Disadvantages	Impact of geoclimatic and weather conditions	Presence of obstacles	Measurement accuracy
Bearing	◆ Easy to use; ◆ low equipment cost	◆ Requires visibility of landmarks; ◆ accuracy decreases with distance	Poor visibility conditions (fog, rain) reduce accuracy	High sensitivity to obstacles	Moderate to high over short distances, reduced over long distances
Radar systems	◆ High effectiveness in poor weather conditions; ◆ operates at any time of day	◆ High equipment cost; ◆ sensitive to radio interference	Less sensitive to weather conditions	Can be limited by objects blocking radio signals	High, but decreases in the presence of radio noise
GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou)	◆ High accuracy in open spaces; ◆ global coverage	◆ Vulnerable to signal blockage (mountains, buildings); ◆ high system cost	Accuracy degrades in signal blockage conditions	Sensitive to densely built-up areas and natural obstacles	High, but decreases in challenging conditions
Combined methods (GNSS + radar)	◆ High accuracy due to real-time data correction; ◆ Data compatibility from various sources	◆ Complex data processing; ◆ High system cost	Less sensitive to weather changes, better in geoclimatic conditions	Reduced impact of obstacles due to data correction	Highest, due to integration of multiple technologies

Source: created by the authors based on N. El-Sheimy & Y. Li (2021)

Conventional navigation methods often rely on a single source of information, making them vulnerable to various errors. For example, inaccuracies in determining bearings can lead to significant discrepancies. In contrast, new methods that integrate different types of navigational data reduce the risk of errors and increase the reliability of location determination. Another key factor is adaptability to changing conditions. Conventional methods may require significant adjustments to recalibrate for new conditions, whereas modern technologies

often include built-in adaptive mechanisms. This enables quicker responses to environmental changes, which is critical in the rapidly shifting conditions of the marine environment.

Evaluating the effectiveness of new methods also includes cost analysis. While new technologies may require substantial initial investments, their ability to enhance accuracy and reliability can lead to substantial cost savings by reducing the risk of accidents and losses due to navigational errors (Table 4).

Table 4. Analysis of installation and maintenance costs for radar equipment and global navigation systems

Method	Minimum installation costs (USD)	Minimum maintenance costs (USD/year)	Notes
Radar equipment	15,000-50,000	2,000-5,000	Costs vary depending on the power and type of radar used.
Global navigation systems (GNSS)	10,000-30,000	1,000-3,000	Includes the cost of receivers, antennas, and software.

Source: created by the authors based on B. Bartel (2024)

Although installation costs may vary, investing in such technologies proves advantageous due to improved accuracy, reliability, and functionality in limited-visibility conditions. Radar systems enable rapid object detection and real-time monitoring, reducing accident risks and enhancing navigational safety. In turn, global navigation satellite systems demonstrate effectiveness across a wide range of conditions, offering global coverage. Both methods contribute to optimising maintenance and operational costs, making them economically sound investments in modern navigation systems.

Therefore, the comparative analysis of these methods against standard practices suggests that new approaches can greatly surpass conventional ones in aspects such as accuracy, reliability, and adaptability. Given the growing demands for safety and efficiency in navigation, investment in new navigation technologies can be essential for success in the maritime industry, safeguarding crew, cargo, and the environment. One area for improving vessel positioning methods is the integration of advanced technologies like GNSS, which offer high accuracy and data reliability. For example, the use of Differential GPS (DGPS) systems can significantly reduce errors caused by atmospheric interference or multipath effects, enhancing measurement accuracy to the centimetre level.

A critical aspect is data monitoring and analysis. The implementation of systems for collecting and analysing navigational data, alongside analytical tools capable of processing large data volumes, will help identify patterns that enhance navigational efficiency. The development and implementation of advanced software solutions that use artificial intelligence can allow for timely error detection in data and automatic route adjustments in real time. Attention should also be given to crew training. Modern navigation methods require high qualifications from seafarers. Regular training covering the latest navigation technologies and methods can improve crew competence in using navigation equipment effectively.

All these recommendations aim to mitigate risks associated with navigation errors, enhance the safety of crew and cargo, and optimise transportation processes. The introduction of a comprehensive approach to improving vessel positioning methods, encompassing technological, organisational, and training aspects, can significantly increase the efficiency of maritime transport processes and ensure reliable navigation in the face of modern challenges.

Discussion

The study reveals that innovations in navigational observation techniques have significantly enhanced the accuracy of vessel positioning. Specifically, the use of new technologies, such as automated coordinate determination systems, has markedly improved accuracy under conditions of limited visibility. For instance, integrating data from global navigation satellite systems with conventional navigation methods has substantially reduced positioning errors that previously occurred when relying solely on one method.

This was also explored by B. Wiśnicki *et al.* (2024), where results confirmed that navigation technologies, such as GPS and GLONASS, have greatly increased maritime transport accuracy, enabling vessels to make precise route calculations. The integration of automated ship control systems enables rapid responses to environmental changes, reducing the risk of accidents and delays. These innovations contribute to optimising fuel costs and reducing transit times, which are crucial factors for companies in the logistics sector. Research by J. de Vos *et al.* (2021) further demonstrated that technologies such as real-time monitoring systems and data analysis significantly enhance maritime transport safety. The use of drones to inspect vessel and cargo conditions, along with automated alert systems, has enabled quicker responses to emergencies. These innovations not only reduce the risk of accidents but also enhance the overall efficiency of maritime transport, creating safer conditions for crew and cargo alike.

Notably, the successful integration of innovations in navigation and safety technologies depends not only on technical aspects but also on companies' willingness to adapt to new market conditions. Training and upskilling of personnel are critical for the effective use of new technologies. Furthermore, cooperation between countries and regulatory bodies can promote the development of unified standards, improving the safety and efficiency of international maritime transport.

The study also discovered that cutting-edge technologies, such as radar systems, allow for the detection of objects at long distances, which is crucial for collision avoidance in challenging conditions. The use of radar, combined with directional data, has contributed to creating a more detailed picture of the surrounding environment, helping to reduce navigation risks in low visibility or adverse weather. This approach demonstrates how integrating various technologies can enhance overall maritime safety. L. Huang *et al.* (2022) concluded that radar systems have become a vital tool in modern navigation, providing detailed visualisation of the environment in low-visibility conditions. They not only enable the detection of other vessels but also facilitate weather analysis, contributing to safer route planning. With advancements in digital radar technology, data is processed in real time, enabling crews to make well-informed decisions more quickly and effectively.

M. Plaza-Hernández *et al.* (2021) established that integrating various technologies, such as radar systems, automated control systems, and monitoring technologies, provides a comprehensive approach to enhancing maritime transport safety. These technologies interact with one another, allowing for consolidated information on the condition of the vessel and its surroundings, thereby reducing the risk of accidents. In addition, this integration facilitates data exchange between vessels and ports, which is crucial for coordinated responses in emergency situations. These findings confirm that the integration of new technologies into navigation systems not only improves route accuracy but also the overall safety of maritime transport. For

instance, the reduction in accidents attributed to radar and automated control systems demonstrates the effectiveness of these solutions in practical application. Furthermore, the implementation of innovations in this field may enhance the competitiveness of companies in the global market, as safer and more efficient transport is a key factor for clients.

The study also demonstrated that innovative data-processing algorithms used in modern navigation systems contribute to improved accuracy and speed in obtaining location information. Specifically, the use of algorithms for correcting signal errors related to atmospheric conditions or obstacles has proven to be highly effective. This has substantially reduced the time needed to obtain accurate data, which is critical in situations that require prompt decision-making. P. Karagiannidis & N. Themelis (2021) similarly highlight the role of data-processing algorithms in enhancing the speed and accuracy of maritime transport, enabling the analysis of large volumes of information in real time. Through the application of machine learning and artificial intelligence, vessel systems can more quickly adapt to environmental changes, optimising routes and reducing fuel costs. This, in turn, increases the overall efficiency of logistical operations, which is crucial for maintaining competitiveness in the global market.

Conversely, D. Li *et al.* (2021) concluded that signal issues in navigation can significantly impact the safety and efficiency of maritime transport, as even minor disruptions may lead to serious consequences. Modern solutions include the use of multi-constellation navigation systems, which combine signals from various satellite systems to ensure data stability and accuracy. In addition, the implementation of backup communication technologies and signal-boosting antennas in remote areas helps to mitigate risks associated with navigation errors and communication losses. These findings are consistent with this study, as they underscore the importance of implementing modern data-processing algorithms to achieve high accuracy and speed in maritime transport. This suggests that investments in technology can significantly enhance navigation systems by reducing risks and optimising logistical processes. Moreover, the results highlighted the need to address signal issues, as stable communication is critically important for the successful operation of maritime transport in challenging conditions. Meanwhile, there is a need for further development of navigation technologies, since not all innovations can be universal. For example, it has been observed that in densely built or mountainous areas, the effectiveness of satellite systems may decrease, raising the need for alternative solutions for inland waterway navigation. This indicates that combining different navigation methods remains the optimal approach for achieving maximum accuracy.

T.E. Kim *et al.* (2022) also confirmed that navigation technologies face a range of challenges in specific maritime transport conditions, such as adverse weather or remote areas. In such situations, conventional systems may not provide the required accuracy, which could lead to delays or even accidents. In addition, natural obstacles such

as large waves and ice fields complicate navigation and require continuous advancements in technology. B. Wu *et al.* (2022) found that alternative solutions, such as using terrestrial radio-navigation systems or hybrid technologies, can significantly improve the accuracy of maritime transport under challenging conditions. For instance, combining satellite systems with radar and sensors can offer more reliable navigation even when standard signals are unavailable. Moreover, advancements in machine learning technologies enable the development of adaptive algorithms that account for specific environmental conditions, aiding route optimisation and risk reduction.

Comparing the data obtained in these studies makes it clear that adapting navigation technologies to the specific conditions of maritime transport is essential for ensuring their efficiency and safety. The analysis indicates that conventional navigation methods may be insufficient in extreme weather conditions or in the presence of natural obstacles, affirming the need for the development of new solutions. Therewith, alternative technologies such as hybrid systems and adaptive algorithms show significant potential to improve the accuracy and reliability of maritime transport, which could substantially enhance the overall efficiency of logistical operations. When discussing the advantages of new technologies, it is also important to consider the financial and technical aspects of their implementation. While modern systems can offer high precision, their installation and maintenance may require substantial investment. This could be a barrier for smaller companies or countries with limited resources. Therefore, it is essential to find a balance between the costs of new technologies and their effectiveness to ensure these innovations are accessible to a broad range of users.

E. Tijan *et al.* (2021) concluded that the cost of new technologies, such as advanced navigation systems and safety solutions, is a crucial factor to consider when planning investments in maritime transport. Although the initial costs of implementing these technologies can be considerable, their effectiveness in reducing accident risks and improving route management often justifies the expenditure. Consequently, investing in new technologies becomes not only an expense but a strategic step to ensure market stability and competitiveness. W. Zhu *et al.* (2021) found that achieving a balance between the costs and efficiency of maritime transport is a complex challenge that requires thorough analysis and strategic planning. Companies should assess not only the initial costs of adopting new technologies but also their impact on overall productivity and safety. Identifying an optimal balance between investment and achieved outcomes can significantly enhance profitability and ensure the successful execution of business strategies in the maritime sector.

An analysis of research findings reveals that investments in new technologies for maritime transport not only increase safety levels but also help reduce overall costs in the long term. Specifically, implementing effective navigation and monitoring solutions allows companies to

minimise delays and accidents, positively influencing financial performance. Thus, strategic investment in new technologies becomes a crucial factor in achieving a balance between costs and efficiency, promoting overall success in maritime transport.

Overall, this study confirms that innovations in navigational observation technology hold immense potential for improving the accuracy of ship location tracking. Given the diversity of conditions in which these technologies may operate, further research should focus on developing adaptive navigation systems capable of considering specific operational conditions. This approach will enable the maximum utilisation of the latest technologies and enhance the safety of maritime transport.

CONCLUSIONS

The research into innovations in navigational observation technology for accurately determining the location of vessels has shown that modern technologies significantly improve the accuracy and reliability of navigation systems. The integration of radar technologies with GNSS has provided more detailed and precise tracking of vessel positions under various conditions. This is particularly crucial in challenging weather situations or areas with limited visibility, where conventional navigation methods may struggle to perform effectively. The study also demonstrated that using intelligent data-processing algorithms enables rapid correction of navigational information, reducing the likelihood of errors. These algorithms can account for multiple factors affecting accuracy, such as atmospheric

conditions, local topography, and obstacles along the route. Furthermore, the incorporation of new technologies, such as differential correction systems for GNSS, has substantially reduced positioning errors, which is critical for the safety of maritime transport.

Thus, the results of the study confirm that innovations in navigational observation technology not only enhance the accuracy of vessel location tracking but also reduce risks at sea. These technologies support more efficient and safer transport, which is a vital factor in developing maritime infrastructure and boosting competitiveness in the global market.

The study was limited to the analysis of certain navigation technologies, such as radar systems and GNSS, without considering other potentially important methods that may impact vessel location accuracy. Further research should cover the effects of new technologies, such as data integration from various sources, the use of drones for environmental monitoring, adaptive signal-processing algorithms, and machine learning technologies, on the effectiveness of navigation systems in specific conditions, such as high levels of electromagnetic noise or challenging terrain. This would further enhance the accuracy of vessel location tracking

ACKNOWLEDGEMENTS

None.

CONFLICT OF INTEREST

None.

REFERENCES

- [1] Al Bitar, N., & Gavrilov, A. (2021). A new method for compensating the errors of integrated navigation systems using artificial neural networks. *Measurement*, 168, article number 108391. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108391.
- [2] Alizadeh, D., Alesheikh, A.A., & Sharif, M. (2021). Prediction of vessels locations and maritime traffic using similarity measurement of trajectory. *Annals of GIS*, 27(2), 151-162. doi: 10.1080/19475683.2020.1840434.
- [3] Arafat, M.Y., Alam, M.M., & Moh, S. (2023). Vision-based navigation techniques for unmanned aerial vehicles: Review and challenges. *Drones*, 7(2), article number 89. doi: 10.3390/drones7020089.
- [4] Asiyabi, R.M., Ghorbanian, A., Tameh, S.N., Amani, M., Jin, S., & Mohammadzadeh, A. (2023). Synthetic aperture radar (SAR) for ocean: A review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, 9106-9138 doi: 10.1109/JSTARS.2023.3310363.
- [5] Bartel, B. (2024). *Report UNAVCO resources: Permanent GPS/GNSS stations*. Retrieved from <https://surl.li/wbqenb>.
- [6] Blindheim, S., & Johansen, T.A. (2021). Electronic navigational charts for visualization, simulation, and autonomous ship control. *IEEE Access*, 10, 3716-3737. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3139767.
- [7] Comber, A., et al. (2023). A route map for successful applications of geographically weighted regression. *Geographical Analysis*, 55(1), 155-178. doi: 10.1111/gean.12316.
- [8] De Vos, J., Hekkenberg, R.G., & Banda, O.A.V. (2021). The impact of autonomous ships on safety at sea – A statistical analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 210, 107558. doi: 10.1016/j.ress.2021.107558.
- [9] Elsanhoury, M., Makela, P., Koljonen, J., Valisuo, P., Shamsuzzoha, A., Mantere, T., Elmusrati, M., & Kuusniemi, H. (2022). Precision positioning for smart logistics using ultra-wideband technology-based indoor navigation: A review. *IEEE Access*, 10, 44413-44445. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3169267.
- [10] El-Sheimy, N., & Li, Y. (2021). Indoor navigation: State of the art and future trends. *Satellite Navigation*, 2, article number 7. doi: 10.1186/s43020-021-00041-3.
- [11] Hoang, A.T., Foley, A.M., Nižetić, S., Huang, Z., Ong, H.C., Ölçer, A.I., Pham, V.V., & Nguyen, X.P. (2022). Energy-related approach for reduction of CO₂ emissions: A critical strategy on the port-to-ship pathway. *Journal of Cleaner Production*, 355, article number 131772. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131772.
- [12] Hong, Z., Petillot, Y., Wallace, A., & Wang, S. (2022). RadarSLAM: A robust simultaneous localization and

- mapping system for all weather conditions. *International Journal of Robotics Research*, 41(5), 519-542. doi: [10.1177/02783649221080483](https://doi.org/10.1177/02783649221080483).
- [13] Huang, L., Liu, C., Wang, H., Zhu, Q., Zhang, L., Han, J., Zhang, Y., & Wang, Q. (2022). Experimental analysis of atmospheric ducts and navigation radar over-the-horizon detection. *Remote Sensing*, 14(11), article number 2588. doi: [10.3390/rs14112588](https://doi.org/10.3390/rs14112588).
- [14] Karagiannidis, P., & Themelis, N. (2021). Data-driven modelling of ship propulsion and the effect of data pre-processing on the prediction of ship fuel consumption and speed loss. *Ocean Engineering*, 222, article number 108616. doi: [10.1016/j.oceaneng.2021.108616](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108616).
- [15] Kim, T.E., Perera, L.P., Sollid, M.P., Batalden, B.M., & Sydnese, A.K. (2022). Safety challenges related to autonomous ships in mixed navigational environments. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 21, 141-159. doi: [10.1007/s13437-022-00277-z](https://doi.org/10.1007/s13437-022-00277-z).
- [16] Li, D., Xu, J., He, H., & Wu, M. (2021). An underwater integrated navigation algorithm to deal with DVL malfunctions based on deep learning. *IEEE Access*, 9, 82010-82020. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3083493](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3083493).
- [17] Liu, B., Li, Z. C., Sheng, D., & Wang, Y. (2021). Integrated planning of berth allocation and vessel sequencing in a seaport with one-way navigation channel. *Transportation Research Part B: Methodological*, 143, 23-47. doi: [10.1016/j.trb.2020.10.010](https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.010).
- [18] Liu, C., Chu, X., Wu, W., Li, S., He, Z., Zheng, M., Zhou, H., & Li, Z. (2022). Human-machine cooperation research for navigation of maritime autonomous surface ships: A review and consideration. *Ocean Engineering*, 246, article number 110555. doi: [10.1016/j.oceaneng.2022.110555](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110555).
- [19] Lu, L., Li, G., Xing, P., Gao, H., & Song, Y. (2023). A review of stochastic finite element and nonparametric modelling for ship propulsion shaft dynamic alignment. *Ocean Engineering*, 286(Part 2), article number 115656. doi: [10.1016/j.oceaneng.2023.115656](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115656).
- [20] Martelli, M., Virdis, A., Gotta, A., Cassarà, P., & Di Summa, M. (2021). An outlook on the future marine traffic management system for autonomous ships. *IEEE Access*, 9, 157316-157328. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3130741](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130741).
- [21] Mazurek, G., Kulpa, K., Malanowski, M., & Droszcz, A. (2021). Experimental seaborne passive radar. *Sensors*, 21(6), article number 2171. doi: [10.3390/s21062171](https://doi.org/10.3390/s21062171).
- [22] Melnyk, O., & Onyshchenko, S. (2021). Ensuring safety of navigation in the aspect of reducing environmental impact. In Z. Hu, S. Petoukhov, F. Yanovsky & M. He (Eds.), *International symposium on engineering and manufacturing* (pp. 95-103). Cham: Springer. doi: [10.1007/978-3-031-03877-8_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9).
- [23] Naus, K., Wąż, M., Szymak, P., Gucma, L., & Gucma, M. (2021). Assessment of ship position estimation accuracy based on radar navigation mark echoes identified in an Electronic Navigational Chart. *Measurement*, 169, article number 108630. doi: [10.1016/j.measurement.2020.108630](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108630).
- [24] Plaza-Hernández, M., Gil-González, A.B., Rodríguez-González, S., Prieto-Tejedor, J., & Corchado-Rodríguez, J.M. (2021). Integration of IoT technologies in the maritime industry. In S. Rodríguez González (Ed.), *Distributed computing and artificial intelligence, special sessions, 17th international conference* (pp. 107-115). Cham: Springer. doi: [10.1007/978-3-030-53829-3_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53829-3_10).
- [25] Rodriguez-Alvarez, N., Munoz-Martin, J.F., & Morris, M. (2023). Latest advances in the global navigation satellite system – reflectometry (GNSS-R) field. *Remote Sensing*, 15(8), article number 2157. doi: [10.3390/rs15082157](https://doi.org/10.3390/rs15082157).
- [26] Shajahan, N., Barclay, D.R., & Lin, Y.T. (2024). Exploiting environmental asymmetry for vessel localization from the vertical coherence of radiated noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 156(1), 560-572. doi: [10.1121/10.0028003](https://doi.org/10.1121/10.0028003).
- [27] Tijan, E., Jović, M., Aksentijević, S., & Pucihar, A. (2021). Digital transformation in the maritime transport sector. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, article number 120879. doi: [10.1016/j.techfore.2021.120879](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120879).
- [28] Wiśnicki, B., Wagner, N., & Wołęjsza, P. (2024). Critical areas for successful adoption of technological innovations in sea shipping – the autonomous ship case study. *Innovation: European Journal of Social Science Research*, 37(2), 582-608. doi: [10.1080/13511610.2021.1937071](https://doi.org/10.1080/13511610.2021.1937071).
- [29] Wu, B., Yip, T.L., Yan, X., & Soares, C.G. (2022). Review of techniques and challenges of human and organizational factors analysis in maritime transportation. *Reliability Engineering & System Safety*, 219, article number 108249. doi: [10.1016/j.ress.2021.108249](https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108249).
- [30] Zeng, Y., Shen, S., & Xu, Z. (2023). Water surface acoustic wave detection by a millimeter wave radar. *Remote Sensing*, 15(16), article number 4022. doi: [10.3390/rs15164022](https://doi.org/10.3390/rs15164022).
- [31] Zhang, X., Wang, C., Jiang, L., An, L., & Yang, R. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*, 235, article number 109380. doi: [10.1016/j.oceaneng.2021.109380](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380).
- [32] Zhu, W., Wang, H., & Zhang, X. (2021). Synergy evaluation model of container multimodal transport based on BP neural network. *Neural Computing and Applications*, 33, 4087-4095. doi: [10.1007/s00521-020-05584-1](https://doi.org/10.1007/s00521-020-05584-1).

Євгеній Табачківський

Магістр

Національний університет "Одеська морська академія"

65052, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна

<https://orcid.org/0009-0005-1489-2091>

Михайло Бушля

Магістр

Національний університет "Одеська морська академія"

65052, вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна

<https://orcid.org/0009-0000-4200-0904>

Інновації в обсерваційній техніці навігації для точного визначення місцезнаходження кораблів

Анотація. Дослідження було проведено для вдосконалення методики визначення місцезнаходження судна, що дозволить підвищити точність та надійність навігаційних процедур. У процесі роботи були проаналізовані наявні методи визначення навігаційного положення корабля, зокрема з використанням пеленгів та радіолокаційних даних, здійснено їх порівняння, а також дана оцінка точності, ефективності та надійності цих методів. Результати показали, що точність і ефективність кожного методу значно залежать від навігаційних умов, таких як погода, географічне положення та тип судна. Виявлено, що традиційні методи, хоча й залишаються актуальними, мають суттєві недоліки, які можуть призводити до значних похибок у визначенні місцезнаходження. На основі виявлених недоліків були розроблені та випробувані нові підходи, що включають комбіноване використання пеленгів та радіолокаційних даних для підвищення точності. Порівняльний аналіз цих методів з традиційними практиками показав, що нові підходи забезпечують більшу точність та надійність в умовах змінних навігаційних обставин. Зроблені висновки стали основою для формулювання рекомендацій щодо покращення методик визначення місцезнаходження судна, що сприятиме підвищенню безпеки судноплавства та оптимізації транспортних процесів у морській галузі. Ці рекомендації включають вдосконалення використання сучасних технологій, таких як глобальні навігаційні системи та інтеграція різних джерел даних для підвищення надійності навігаційних рішень. Додатково було рекомендовано впровадження автоматизованих систем аналізу та обробки отриманих навігаційних даних для оперативного прийняття рішень під час складних навігаційних умов.

Ключові слова: пеленги; радіолокаційні дані; транспортні процеси; комбіноване використання; глобальні системи

Руслана Мельник

Аспірант

Вінницький національний технічний університет

21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

<https://orcid.org/0009-0003-9762-2657>

Сергій Цимбал*

Кандидат технічних наук, доцент

Вінницький національний технічний університет

21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-3066-4169>

Застосування технології Blockchain в логістиці та управлінні ланцюгами постачань

Анотація. У статті розглядається можливість застосування інноваційної інформаційної технології Blockchain у логістиці та управлінні ланцюгами постачань. На початку XXI століття відбулася значна зміна у розвитку цифрових технологій. Тепер інформація набуває все більшого значення як ресурс у суспільних та господарських процесах. Використання інформації у сучасних умовах необхідно для трансформації її у знання, які вимірюються збільшенням продуктивності, а згодом соціальний простір займає все більше місця у соціально-економічних відносинах. Відображено сутність та особливості технології Blockchain, а також розкрито необхідність її технічної впорядкованості. Blockchain – це багатофункціональна та багаторівнева інформаційна технологія, призначена для надійного обліку різних активів. Потенційно ця технологія охоплює все без винятку сфери економічної діяльності і має безліч областей застосування. Серед них: фінанси, економіка та грошові розрахунки, операції з матеріальними та нематеріальними активами. Впровадження Blockchain технології у будь-яку сферу бізнесу передбачає прийняття повністю прозорої та надійної інформаційної платформи, яка буде використовуватись учасниками того чи іншого процесу: чи то страхування фізичних осіб, приватизація нерухомості, управління поверненнями, надання логістичного сервісу або будь-який інший вид діяльності. Сучасне суспільство перебуває на такому інтелектуально-технічному рівні, при якому технічна побудова моделі самого себе є цілком реальним комп'ютерно-інженерним завданням. Сьогодні технічне моделювання та технічна нормалізація технології Blockchain знаходяться в зоні суворого процесу організації виробництва та економіки. Ключовим питанням статті є розкриття можливостей застосування Blockchain технології в логістиці та управління ланцюгами постачань загалом. Наведено приклади практичного застосування даної технології в логістиці, розкриті переваги і недоліки Blockchain, а також відображені бар'єри та труднощі, пов'язані з використанням даної технології

Ключові слова: blockchain технологія, управління ланцюгами постачань, blockchain технологія в логістиці, розумні контракти, розумні активи

Вступ

Враховуючи світові тенденції становлення цифрової економіки, доцільно розвивати інноваційну діяльність у напрямі віртуалізації бізнесу, що надає автономним та географічно розподіленим підприємствам широкі

можливості для комунікації та співробітництва з метою організації ефективних кіл постачань, що дозволяє у найбільш стислий термін з мінімальними витратами здійснювати постачання готової продукції кінцевому

Suggested Citation:

Melnyk, R., & Tsymbal, S. (2024). Application of Blockchain technology in logistics and supply chain management. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 153-160. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.153.

*Corresponding author



споживачеві. Поява нових IT-рішень та технологій відкриває в цьому напрямку абсолютно нові можливості для бізнесу. Цей процес ґрунтується на формуванні єдиного організаційно-технологічного середовища за рахунок об'єднання інтересів сторін ведення бізнесу. До основних переваг такого підходу належать: можливість освоєння нових ринків, скорочення витрат, трансфер технологій та ноу-хау, додаткові інвестиційні можливості, перерозподіл ризиків. Однак питання зацікавленості іноземних партнерів у веденні віртуального бізнесу безпосередньо пов'язані з проблемами безпеки інформаційного обміну та забезпечення довіри контрагентів [1].

У зв'язку з цим практична реалізація цього підходу у підвищенні ефективності ведення віртуального бізнесу та оптимізації процесів управління ланцюгами поставок бачиться у використанні технології Blockchain, оскільки вона орієнтована на світовий ринок і не вимагає формального дозволу функціонування на ньому (чим знімає обмеження на ведення бізнесу на невизнаній території), а також є низьковитратною технологією та не вимагає залучення нових основних фондів та співробітників до її реалізації.

Blockchain технологія є інноваційною платформою для створення децентралізованого та абсолютно прозорого механізму ведення транзакцій для різних галузей та сфер діяльності. Основною перевагою Blockchain є підвищення рівня довіри між контрагентами завдяки прозорості та простежуванню всіх видів транзакцій у будь-якій угоді. Технологія Blockchain бурхливо розвивається останні роки та можливість використання децентралізованого механізму в бізнесі залучили багато транснаціональних корпорацій. Привабливість Blockchain технології пояснюється можливістю підвищити рівень довіри між учасниками ланцюга постачання, забезпечення прозорості усіх транзакцій та своєчасний обмін інформацією між учасниками ланцюга.

Незважаючи на досить великий інтерес до проблематики використання технології Blockchain у логістиці, що викликано світовими тенденціями глобалізації та цифровізації всіх сфер економічної діяльності, цей напрямок знаходиться на початковому етапі розвитку у вигляді тестових програм та стартапів. Цей аспект викликає безліч питань як з боку прихильників даної технології, так і серед її супротивників. Незважаючи на високу перспективність використання технології Blockchain у плані підвищення довіри учасників угоди, скорочення витрат часу та ресурсів, багато аспектів економічного, соціального та правового регулювання залишаються відкритими, що, у свою чергу, вимагає вдосконалення понятійного та методологічного апарату технології Blockchain, розробки концептуальних принципів її впровадження у логістику та керуванні ланцюгами постачання, а також адаптації існуючих Сметодик до умов ведення бізнесу в рамках економічної та політичної блокади.

Загалом – це нова інформаційна парадигма, при якій учасникам ланцюга немає необхідності робити довірчі

відносини, тому що забезпечується повна прозорість угод і відкритість інформації, а всі угоди регулюються шляхом «розумних» контрактів і помилки, пов'язані з людським фактором, зводяться до мінімуму. Що стосується управління ланцюгами постачання, Blockchain технологія володіє рядом серйозних переваг та суттєвих обмежень.

Blockchain – це технологія надійного розподіленого зберігання записів про усі транзакції. Blockchain є ланцюжком блоків даних, обсяг якого постійно зростає в міру додавання нових блоків. Якщо говорити загалом, то Blockchain – це багатофункціональна та багаторівнева інформаційна технологія, призначена для надійного обліку різних активів [2]. Потенційно, ця технологія охоплює всі без винятку сфери економічної діяльності та має безліч сфер застосування. Серед них: фінанси, економіка та грошові розрахунки, а також операції з матеріальними та нематеріальними активами.

Будь-який актив, представлений на Blockchain, стає розумним активом, угоди з яким можна здійснювати за допомогою розумних контрактів. Всі активи можна зареєструвати в розподіленому журналі записів і керувати ними можуть усі власники секретного ключа – свого роду код доступу до активу. Прикладами розумних активів у сфері логістики можуть виступати безпілотні транспортні засоби, наприклад дрони або автомобілі. Вони є «розумними», тому що здатні не тільки переміщатися за допомогою управління ними через Blockchain, але й можуть самі себе обслуговувати. Наприклад, якщо в автомобілі ламається якась деталь, він автоматично виробляє внутрішню діагностику, виявляє поломку і відразу ж робить замовлення на нову запасну частину у того постачальника, якого вкаже користувач при внесенні цього автомобіля в Blockchain. Для цього користувачами системи створюється і на влаштовується відповідний розумний договір. Інший приклад – «розумний» рахунок фактура, створюваний у Blockchain між учасниками ланцюга постачання: наприклад, при отриманні певної партії товару, сканування останньої одиниці товару (або палети, коробки) на складі є умовою автоматичної оплати партії. Також, є можливість задавати інші умови оплати, наприклад, як тільки зміниться статус товару в Blockchain, він буде оплачений. По суті, розумний актив – це актив, зареєстрований у цифровому вигляді в Blockchain та керований за допомогою розумних контрактів

Розумні контракти – ідея, яка впливає з використання розумних актів всередині Blockchain. У контексті Blockchain розумні контракти означають угоди у розподіленому журналі записів, не обмежені простими купівля-продаж, в них можуть бути вбудовані і складніші функції. На відміну від традиційних контрактів, розумні завідомо забезпечують взаємну довіру між учасниками ланцюга постачання, так як по суті ця угода про виконання або невиконання певних дій. Класичний приклад такого контракту – торговельний автомат, який діє за певним алгоритмом та інструкціями, якщо, звичайно ж, він використовує справний. У даному

випадку розумним активом виступає сам автомат, а алгоритм прийому грошей, видачі товару та здавання – розумним контрактом. Використання розумних контрактів виключає можливі помилки через людський фактор, проте вимагає спочатку правильної настройки та обліку всіх можливих факторів та умов. Таким чином, можна сміливо стверджувати, що Blockchain технологія вже підготовлена для застосування у будь-якій сфері бізнесу. Більше того, вже існує спеціальна Blockchain платформа, під назвою Ethereum, що працює на «розумних» контрактах та адаптована під бізнес [3].

Ключова функція логістики полягає в організації наскрізного управління потоками ресурсів, товарів та сервісів з урахуванням поставлених цілей та наявних системних обмежень. Ланцюжки постачань, як основна технологія реалізації логістичного підходу до управління матеріальними та інформаційними потоками, дозволяють проводити планування, пошук, виробництво, розподіл та доставку продуктів та послуг від місця походження до споживання. При цьому ефективність управління постачанням в ланцюги визначається доступністю потрібного продукту в потрібний час і в потрібному місці оптимальну ціну. Динамічність та ускладнення процесів, пов'язаних із збільшенням обсягів інформації, а відповідно і підвищення вимог до товарів, послуг, процесів їх постачань та сервісного обслуговування, що постійно стимулюють процес оптимізації ланцюгів постачань за наступними пріоритетними напрямками: зниження запасів по всьому шляху руху матеріального потоку; скорочення часу проходження товарів з логістичного ланцюга; зниження транспортних витрат; зниження витрат на зберігання або їхнє скасування; скорочення витрат ручної праці та відповідних витрат на операції з вантажем.

Відповідно, при подібних якісних характеристиках виробленої продукції конкурентоспроможність підприємства визначатиметься його здатністю активно реагувати на запити споживачів, ефективно та вигідно постачати продукцію клієнтам. Особлива заслуга у прискоренні даних процесів належить застосуванню інформаційних технологій для управління процесами постачань продукції на всіх стадіях управління, починаючи від закупівлі сировини та закінчуючи постачанням клієнту готової продукції. При цьому інформатизація логістики продовжує свій розвиток у напрямі інтеграції функціональних ділянок логістичних ланцюгів, постійного оперативного обміну інформацією, підтримки прийняття рішень операторам логістичних процесів, контролю виконання завдань управління постачаннями та спрощення інтерфейсів взаємодії з користувачами. Відповідно роль інформаційних технологій у сучасному процесі управління постачаннями важко переоцінити, а основна їхня функціональність полягає у вирішенні наступних завдань: планування логістичних процесів у різних аспектах та на різних тимчасових горизонтах, у тому числі прогнозування попиту та планування потреби у матеріалах; координація

логістичних подій, операцій та процесів по всьому ланцюгу просування матеріальних цінностей та послуг; моніторинг та контроль протікання логістичних операцій. Ця функція закладає основи системи обліку запасів, постачань, продажів, витрат тощо. Поточний моніторинг покликаний створювати основи для регулювання процесів з метою підвищення їхньої безперервності; оперативне управління логістичними процесами, особливо постачаннями, транспортуванням, зберіганням, фізичною дистрибуцією тощо.

Результати

Ланцюг постачань, наприклад, виробничої компанії, складається з низки ресурсів: людей, фізичних актів, знань, процесів та фінансових договорів та транзакцій, які забезпечують переміщення товару від постачальника до клієнта. У максимальному ланцюзі постачань представляється достатньо складним завданням комплексно відслідковувати всі транзакції між усіма ланцюгами. Ця інформація зазвичай зберігається в декількох місцях (у кількох ланках ланцюга поставки) і доступна певним користувачам системи. У таких системах клієнти (кінцевий споживач або компанія в ланцюгах), як правило, мають обмежений обсяг інформації про діяльність усього ланцюга постачань. Звідси випливає, що доступ інформації базується на взаємному обміні даними, що можливе лише за довіри учасників один до одного.

Blockchain технологія може значно підвищити прозорість і моніторинг руху будь-яких потоків ланцюга постачань шляхом використання не змінюваних даних, розподіленого та контрольованого доступу користувачів до інформаційної системи. У цій роботі запропонована розподілена інформаційна система, яка використовує Blockchain технологію для збору, зберігання та управління ключовою інформацією про кожен індивідуальний продукт, протягом усього його життєвого циклу. Такі розподілені блоки інформації дозволяють безпечно створювати записи про транзакції для кожного окремого продукту, а також отримувати специфічну інформацію про продукцію. Ця інформація доступна всім учасникам ланцюга одночасно. Графічний варіант запропонованого розподіленої інформаційної системи Blockchain в ланцюзі постачань представлений на Рисунку 1.

Запропонований підхід має на увазі використання децентралізованої інформаційної системи, де Blockchain використовується для збору, зберігання та управління інформацією про кожен індивідуальний продукт протягом усього його життєвого циклу. Під час переміщення продукту від одного учасника ланцюга до іншого, він належить всім по черзі, наприклад, постачальникам, виробникам, дистриб'юторам і, нарешті, споживачам. Кожен із учасників відіграє важливу роль у системі та доповнює характеристики товару у його профілю – інформацію про поточний стан продукту в Blockchain. Кожен продукт має унікальний цифровий виття, що містить всю відповідну інформацію, що вноситься на різних етапах життєвого циклу продукції [4].

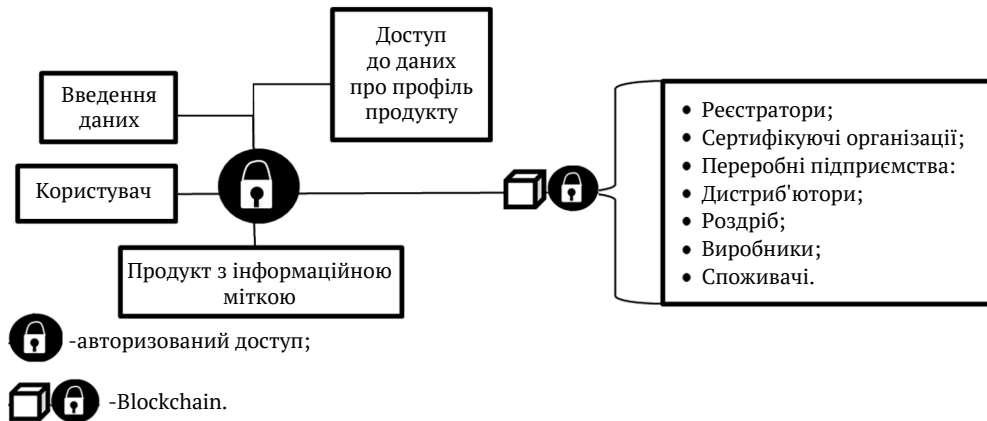


Рисунок 1. Пропонований варіант використання Blockchain у ланцюзі постачань

Джерело: розроблено авторами

Запропонована система складається з таких учасників:

- ◆ реєстратори – компанії, що забезпечують унікальну ідентифікацію кожного учасника ланцюга постачань у мережі;
- ◆ сертифікуючі організації – компанії, які розробляють стандарти роботи з Blockchain, проводять сертифікацію інших учасників;
- ◆ виробники, дистриб'ютори, роздріб, переробні компанії – учасники ланцюга постачань, які вводять дані, що відносяться до продукції в Blockchain;
- ◆ споживачі – кінцеві покупці продукту, в деяких випадках теж вводять дані про продукцію в Blockchain.

Кожному продукту у Blockchain прив'язується інформаційний код: це може бути штрих код, RFID мітка або QR код. Цей код є унікальним цифровим криптографічним ідентифікатором, який пов'язує фізичний продукт зі своєю віртуальною «ідентичністю» в мережі Blockchain. Ця віртуальна ідентичність так само являється частиною профілю продукту [5].

Учасники ланцюга постачань так само мають свої цифрові профілі, отримані під час реєстрації у мережі Blockchain. Дані профілі включають наступну інформацію: короткий опис учасника, його місцезнаходження, сертифікати та тип продукції, з якою учасник працює. Приватність даних про учасника може бути відрегульована для інших учасників ланцюга постачань, також, учасник може бути повністю анонімним, але тільки у разі отримання відповідного сертифіката, що підтверджує надійність його діяльності.

Реєстратори – це компанії, які забезпечують доступ до Blockchain учасникам ланцюга постачань вони забезпечують унікальну ідентифікацію кожного учасника у мережі. Після реєстрації, для кожного учасника реєструється пара криптографічних «ключів» закритого та відкритого типу. Відкритий ключ служить ідентифікатором учасника мережі, а закритий – перевіряє справжність учасника при взаємодіях з іншими у мережі Blockchain. Це дозволяє кожному продукту отримувати

електронний підпис від того чи іншого учасника, у міру просування цього продукту з ланцюга постачань.

Взаємодія у мережі Blockchain відбувається на основі програмного забезпечення, розробленого відповідальними сторонами від кожного учасника ланцюга постачань. Далі, після розробки та обліку всіх деталей взаємодії, програмне забезпечення встановлюється на комп'ютери учасників. Що стосується споживачів – для них випускається окреме програмне забезпечення з особливим інтерфейсом, забезпечуючи доступ до інформації про продукт, яка необхідна споживачу. Системне програмне забезпечення полегшує запис нових даних про нові продукти або додавання даних до старих. Як правило, програмний код для таких Blockchain платформ є змінним, та принцип роботи системи можна модифікувати, як, наприклад, це вже реалізовано у проекті Blockchain Ethereum. Правила доступу до даних та їх розподіленого зберігання вже прописані в самому Blockchain і не можуть бути змінені одним учасником, без підтвердження від іншими.

Застосування Blockchain у логістиці та керуванні ланцюгами постачань: введення даних. Кожен фізичний продукт у запропонованій розподіленій інформаційній системі Blockchain має бути представлений у цифровому вигляді в мережі так, щоб усі зацікавлені сторони мали прямий доступ до даних про нього. Це необхідно для проведення операцій та миттєвого оновлення інформації про продукт на шляху його життєвого циклу. Дані можуть вводитися як вручну, так і за допомогою перенесення інформації з етикетки продукції до системи при сканування. Дані, у запропонованій системі можна класифікувати [6]:

- ◆ Дані про власність – хронологічний список усіх попередніх власників продукту, включаючи поточний. Щоразу, коли відбувається обмін між двома учасниками ланцюга постачань, створюється новий запис про угоду та додається до профілю товару. Таким чином кожна певна угода відноситься до тієї чи іншої цифрової ідентичності учасника ланцюга в Blockchain, що

дозволяє системі зрозуміти, хто саме з учасників має право вносити дані до профілю продукту зараз.

- ◆ Дані про час – щоразу, коли створюється новий запис у профілі продукту, система автоматично реєструє дату і час нового запису, забезпечуючи хронологію зміни профілю продукту.

- ◆ Дані про місцезнаходження – дані, про те, де зараз продукт і де було зроблено останній запис у його профілі. Оскільки в системі є дані про місцезнаходження учасників ланцюга постачань, товару може бути присвоєний ідентифікатор розташування або надання даних GPS для відстеження його переміщення.

- ◆ Дані про продукт (специфікація) – це вся інформація, що стосується продукту: виробник, дата виробництва, його характеристики та інше.

Деякі продукти можна реєструвати в Blockchain з метою покращення їх якості. Наприклад, можна зареєструвати мобільний телефон у мережі та запрограмувати його на надання даних про продуктивність батареї під час роботи. Дані будуть доступні всім учасникам ланцюга постачань та допоможуть виробникам, як телефонів, так і акумуляторів, визначати вади в тому чи іншому телефоні та знаходити області для покращення.

Застосування Blockchain у логістиці та керуванні ланцюгами постачань: на прикладі виробника картонних коробів. Розглянемо реалізацію технології Blockchain на прикладі компанії, яка займається виробництвом картонних коробів. Передбачається, що всі учасники ланцюга постачань зареєстровані у мережі Blockchain та сертифіковані відповідними організаціями. Взаємодія між учасниками ланцюга постачань відбувається наступним чином [7]:

- ◆ Лісове господарство: зрубані дерева позначаються етикетками та вводяться в Blockchain як нові продукти з усіма характеристиками (наприклад, тип дерева та його вік). У Blockchain ініціюється та зберігається угода між лісовим господарством та виробником паперу отримання товару та оплата підтверджуються електронним підписом з обох сторін, яка з'являється після зчитування виробником паперу останньої етикетки на поставлених йому деревах.

- ◆ Виробник паперу: отримання дерев підтверджується після сканування етикеток, на цьому обмін між виробником паперу та лісовим господарством завершується і виробник отримує доступ до профілю продукту. Шляхом додавання різної сировини та змішування компонентів він отримує папір, і змінює профіль продукту відповідним чином, випускається нова етикетка для паперу.

- ◆ Виробник коробок: наступний учасник ланцюга постачань, аналогічним чином підтверджує отримання продукції (сканує) та партія автоматично оплачується. Після додавання до паперу сировини та компонентів, їх етикетки закриваються в Blockchain (цикл життя сировини та компонентів закінчено), і з'являється нова, що ідентифікує короб. Далі, після того, як угода ініційована

з виробником готової продукції, коробки поставляються наступному учаснику.

- ◆ Виробник готової продукції: виробник підтверджує отримання коробів від виробника коробів шляхом сканування. Далі він вкладає у них продукцію та випускає вже два види етикеток у системі Blockchain: для реєстрації короба та для реєстрації продукції, вкладеної в нього.

- ◆ Дистриб'ютор: наступний учасник, який починає рух товару (наприклад, у контейнерах) через кілька інфраструктурних об'єктів (наприклад, склади чи транспортні хаби). На кожному з локацій профіль продукту оновлюється шляхом сканування контейнера, що містить усі види продукції, інформація про контейнери оновлюється автоматично.

- ◆ Роздріб: цей учасник виймає продукцію з коробів та оновлює статус, реєструючи окремо товари та коробки у системі Blockchain. Далі, роздріб ініціює угоду з переробною компанією на постачань коробів для переробки. Відправивши їх переробній компанії, він ставить свій цифровий підпис до Blockchain, а компанія, що займається переробкою, оплачує партію, відсканувавши останню коробку. При цьому, вся попередня хронологія записів про короб зберігається в Blockchain.

- ◆ Переробна компанія: прийнявши коробки, компанія переробляє їх у сировину для паперу та створює новий продукт у мережі. Ініціювавши угоду з виробником паперу, постачає йому сировину. У цьому життєвий цикл короба закінчується. Однак, всі записи про рухи короба по ланцюгу поставки, зміни його статусу зберігаються в Blockchain.

Приклад, наведений вище, являє собою спрощений варіант використання Blockchain технології в ланцюгах постачань. Як можна зрозуміти, використання даної технології забезпечує прозорість усіх транзакцій пов'язаних з тим чи іншим продуктом, а здійснення всіх фінансових операцій вимагає залучення банків чи інших фінансових посередників. Так само, хронологія руху кожного продукту, зміна його статусів і всього його життєвого циклу зберігається в Blockchain і доступна всім учасникам ланцюга, які стосуються цього продукту.

Застосування Blockchain у логістиці та керуванні ланцюгами постачань: потенційні можливості для використання технології. Нижче наведені конкретні приклади застосування даної технології в логістиці та управлінні ланцюгами постачань (Рис. 2). Однією з цікавих можливостей Blockchain є управління «фізичним інтернетом», який, як правило, здійснюється за допомогою мікроплатежів. Так як будь-який актив є «розумним», він зареєстрований у Blockchain та володіє власним гаманцем. За допомогою переведення різного виду сум (навіть від 1 копійки) на рахунок транспортного засобу, можна навести цей транспортний засіб на рух навіть на частки секунд. Зрозуміло, для цього необхідний належним чином налаштований «розумний» договір [8].

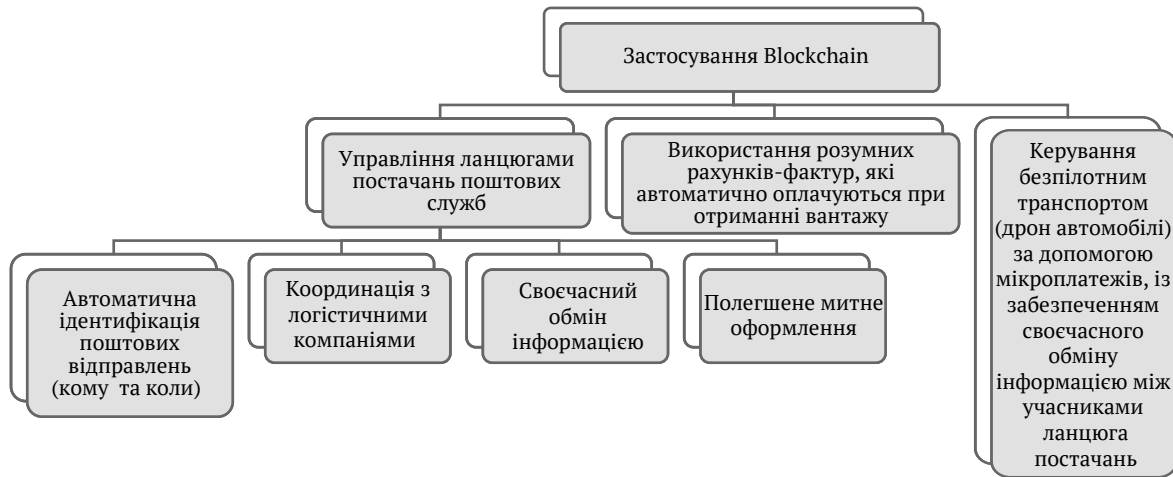


Рисунок 2. Застосування Blockchain технології в логістиці та управлінні ланцюгами постачань

Джерело: розроблено авторами

При переході на технологію Blockchain ланцюг постачань отримує ряд переваг, серед яких варто зазначити такі: підвищення безпеки ланцюга постачань (зниження ризику шахрайства); скорочення помилок; облік кількості, моменту передачі та маршруту руху матеріального потоку; відстеження документації; можливість прив'язки матеріального потоку до серійних номерів, штрих-кодів; обмін інформацією про процес виготовлення, збирання, постачань та експлуатації продукції між постачальниками та покупцями; прозорість транзакцій; вища довіра споживачів за рахунок високої швидкості транзакцій; можливість зворотного зв'язку в режимі реального часу.

Обслуговування матеріального потоку в ланцюзі постачань за допомогою технології Blockchain дозволяє скоротити термін виконання та доставки замовлення за рахунок зменшення кількості посередників у ланцюзі та збільшити реальну суму доходу безпосереднього перевізника. Використання технології Blockchain дозволяє скоротити витрати на обслуговування фінансового потоку за рахунок мінімізації ризиків, відсутності посередницьких банків, а відповідно одноразового стягнення комісії, скорочення витрат, пов'язаних із вартістю перевезення вантажу та зменшенням часу на обробку операцій. На думку аналітиків, оптимізація руху фінансового потоку кожному етапі дозволяє заощадити до 3,5 % річних [9].

Також варто відзначити крім сильних сторін ще й обмеження даної технології. Обмеженнями використання розподіленої інформаційної системи Blockchain є:

- ◆ Технологічні бар'єри – необхідність наявності великої кількості обчислювального та підтримуючого обладнання, постійної розробки програмного забезпечення, низька швидкість поширення блоків інформації та інше.

- ◆ Висока невизначеність – актуальне обмеження при використанні різних валют без прив'язки до курсу долара, євро, гривні, золота чи іншого.

- ◆ Необоротність платежів – неможливість повернути платіж за помилково вказаною адресою. Однак, при надсиланні коштів на неіснуючу адресу, повернути їх можливо.

- ◆ Сприйняття суспільством – консерватизм, зв'язування даної технології з тіньовим ринком чи сумнівним видом бізнесу.

- ◆ Складність побудови бізнес-моделей – необхідність «злому» звичного способу мислення та перехід на нову інформаційну концепцію. Також, складно врахувати інтереси всіх сторін.

- ◆ Державне регулювання – невідомо, як держава відреагує на використання Blockchain. В Україні даній темі поки не приділяється уваги, і невідомо взагалі, коли почнуть підіймати дане питання, враховуючи ситуацію в країні.

Висновки

На закінчення даної роботи слід зазначити, що завдання дослідження реалізовані, поставлена мета була досягнута. Таким чином, використання технології Blockchain в керуванні ланцюгами постачань має суттєві потенційні переваги, які актуальні для логістичної інфраструктури України. Узагальнюючи вище сказане, зауважимо, що Blockchain – це технологія надійного розподіленого зберігання записів про усю кількість створених коли-небудь транзакцій, що є відкритим реєстром.

Blockchain дозволяє забезпечити прозорість усіх транзакцій, пов'язаних з продуктом для всіх учасників ланцюга постачань. Використання цієї технології передбачає повну довіру між учасниками ланцюга постачань, оскільки рух усіх потоків відстежується в режимі реального часу, а всі угоди регулюються у вигляді «розумних» контрактів. Технологія Blockchain дозволяє керувати розумними активами, наприклад, безпілотними транспортними засобами. Ця технологія тісно пов'язана з «інтернетом речей» чи «фізичним інтернетом». Впровадження Blockchain має на увазі спільне

створення програмного забезпечення учасниками ланцюга постачань. З технологічної точки зору це складно, тому що необхідно забезпечити повноцінний функціонал роботи Blockchain для кожного учасника ланцюга

Технологія Blockchain спочатку базувалася на використанні Bitcoin, проте з часом були запропоновані платформи Blockchain, які працюють на більш стабільній валюті, прив'язаній до курсу інших валют або цінних металів. Такі платформи вже використовуються бізнесом. Так само, в останній рік набирає популярності Blockchain Ethereum, оскільки ця платформа працює повністю на «розумних» контрактах та адаптована під потреби бізнесу. Найбільш важливими перевагами використання Blockchain у ланцюгу постачань є:

підвищення безпеки ланцюга постачань, скорочення документації, відстеження документації та скорочення помилок, висока довіра споживачів за рахунок швидкості транзакцій та їх прозорості, можливість своєчасного обміну інформацією між учасниками ланцюга постачань, а також облік кількості, моменту передачі та маршруту руху матеріального потоку.

Впровадження технології Blockchain у ланцюг постачань вимагає подолання технологічних бар'єрів: придбання обчислювального та підтримуючого обладнання, розробку програмного забезпечення, створення інтерфейсів та інших технічних тонкощів, необхідні повноцінного функціонування ланцюга постачань цієї інноваційної системи.

Список використаної літератури

- [1] What is Blockchain technology, and what is its potential impact on the supply chain? (2016). Retrieved from <http://cerasis.com/2016/06/29/blockchain-technology/>.
- [2] Arvis, J.-F., Saslavsky, D., Ojala, L., Shepherd, B., Busch, C., Raj, A., & Naula, T. (2016). *Connecting to Compete 2016: Trade logistics in the global economy. The logistics performance index and its indicators*. Retrieved from https://wb-lpi-media.s3.amazonaws.com/LPI_Report_2016.pdf.
- [3] Gonchar, O., Zamkova, N., Polishchuk, I., Dovhan, Y. & Sokolovska, V. (2020). Oil and fat business of Ukraine: Marketing orientation for achieving competitive advantages. *European Journal of Sustainable Development*, 9(4), 261-272. doi: 10.14207/ejsd.2020.v9n4p261.
- [4] Haq, I., Monfared, R.P., Harrison, R., Lee, L., & West, A. (2010). A new vision for the automation systems engineering for automotive powertrain assembly. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23(4), 308-324. doi: 10.1080/09511921003596780.
- [5] Ream, J., Chu, Y., & Schatsky, D. (2016). *Upgrading blockchains: Smart contract use cases in industry*. New York: Deloitte University Press.
- [6] Pokrovskaya, O.D. (2018). Terminalistics as a new methodology for the study of transport and logistics systems of the regions. *MATEC Web of Conferences*, 216(61), article number 02014. doi: 10.1051/mateconf/201821602014.
- [7] Shifting patterns: The future of logistics industry. (2020). Retrieved from <http://www.pwc.com/gx/en/industries/transportation-logistics/publications/the-future-of-the-logistics-industry.html>.
- [8] Abeyratne, S.A., & Monfared, R.P. (2018). *Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger*. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(9), 1-10.
- [9] Blockchain technology: Possibilities for the U.S. postal service. (2016). Retrieved from <https://www.uspsaig.gov/sites/default/files/document-library-files/2016/RARC-WP-16-001.pdf>.

Ruslana Melnyk

Postgraduate Student
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-9762-2657>

Serhii Tsymbal

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3066-4169>

Application of Blockchain technology in logistics and supply chain management

Abstract. The article considers the possibility of using innovative information technology Blockchain in logistics and supply chain management. At the beginning of the 21st century, a significant change occurred in the development of digital technologies, a revolution. Now information is becoming more and more important every day as a resource in social and economic processes. The use of information in modern conditions is necessary to transform it into knowledge, which is measured by an increase in productivity, and subsequently the social space takes up more and more space in socio-economic relations. The essence and features of Blockchain technology are reflected, and the need for its technical order is also revealed. Today, Blockchain is a multifunctional and multi-level information technology designed for reliable accounting of various assets. Potentially, this technology covers all spheres of economic activity without exception and has many areas of application. Among them: finance, economics and monetary settlements, transactions with tangible and intangible assets. The introduction of Blockchain technology into any area of business involves the adoption of a fully transparent and reliable information platform that will be used by participants in a particular process: whether it is insurance of individuals, privatization of real estate, return management, provision of logistics services or any other type of activity. It should be noted that modern society at this stage of development is at an intellectual and technical level, at which the technical construction of a model of itself is a quite real computer engineering task. Today, technical modelling and technical normalization of Blockchain technology are in the zone of a strict process of organizing production and the economy. The key issue of the article is to reveal the possibilities of applying Blockchain technology in logistics and supply chain management in general. Examples of practical application of this technology in logistics are given, the advantages and disadvantages of Blockchain are revealed, and the barriers and difficulties associated with the use of this technology are also reflected

Keywords: Blockchain technology; supply chain management; Blockchain technology in logistics, smart contracts; smart assets

Ihor Vikovych*

Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0281-158X>

Orest Vozniak

Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6431-088X>

Yevheniia Yakovenko

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9065-5649>

Oleh Kotsiumbas

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University
79013, 12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6590-4022>

Investigation of air exchange at the workplace of a bus driver

Abstract. The focus on thermal comfort of the driver and passengers is important not only for reasons of convenience, but also for safety reasons. This article examines the microclimate at the driver's workplace, which is formed on the basis of heat exchange between the exterior and interior of the cabin, as well as in the cabin itself. The influence of various factors and operating conditions on the microclimate in the bus interior is analysed. Attention is focused on local thermal comfort devices, since thermal comfort systems now work in an integrated manner, paying special attention to local thermal comfort. A ventilation system was modelled, which works to take fresh air into the cabin with forced removal to the outside. The air exchange at the workplace of a city bus driver with injection fans mounted in the roof of the bus, one of which works to draw fresh air into the cabin and the other to force it out, at air blowing speeds for four modes from 0.1 to 0.5 m/s, was modelled. The organisation of air exchange at the driver's workplace is proposed, which can be used in the design of thermal comfort for new models of vehicles, especially large-sized ones, such as buses

Keywords: microclimate, thermal comfort, ventilation systems

Introduction

The requirements for the microclimate of passenger transport have increased significantly. This is especially true for public transport and long-distance routes. Scientific studies by a number of researchers have shown the impact of inappropriate impact of the working environment on work

fatigue and concentration, which is largely related to vehicle operation. Therefore, systems that provide an appropriate cabin climate are also important components of vehicle safety, especially during long trips when suitable climate is essential to maintain driver concentration. Not only does

Suggested Citation:

Vikovych, I., Vozniak, O., Yakovenko, Ye., & Kotsiumbas, O. (2024). Investigation of air exchange at the workplace of a bus driver. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 161-167. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.161.

*Corresponding author



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

the driver's condition, degree of fatigue and reaction time depend on the cabin climate, but also the well-being of the passengers. The main reasons for this are due to the state of contamination of the cab and interior, the concentration of exhaust gases, noise, vibration, unfavourable microclimate, time spent, work intensity, etc.

Results

Analysis of comfort factors and standards for their assessment

Noise in the car cabin affects the driver's functional state: physiological functions are disturbed, fatigue appears due to increased energy consumption and nervous and mental stress. Permissible noise levels in vehicle cabs should be considered: for passenger taxis and buses – 50-60 dBA, for trucks and cars – 60-70 dBA. The permissible level of vibrations is in the frequency range of 1-80 Hz, beyond which discomfort is observed. Permissible levels of external noise for vehicles should not exceed 84 dBA for cars, 92 dBA for trucks and buses, and 86 dBA for motorcycles. Such studies were conducted in accordance with standardised methods for large vehicles, namely not only for city buses, but also for a two-section hybrid bus [1] and an electric bus [2]. The complexity of noise measurements is confirmed by measurements [3], where a complex consisting of 10 microphones placed at a height of 1.6 m from the floor surface along the aisle between the seats was used.

Whereas noise and vibration levels are defined and reasonable, the concept of microclimate assessment is rather subjective. The current standards that present methods for assessing thermal comfort in the vehicle interior can be found in EN ISO 14505 [4], which consists of three parts, and the American ASHRAE 55 [5]. The European standard EN ISO 7730 [6] is used to estimate thermal comfort in

buildings and is based on the well-known Fanger theory [7] and the equivalent temperature model [8, 9].

More than 50 years ago, Fanger conducted a study in which subjects dressed in "standard" clothing performed "standard" activities. During the assessment, persons were exposed to different thermal conditions. According to their sensations, subjects rated the condition on the ASHRAE scale with 7 levels (-3: cold; -2: cool; -1: slightly cool; 0: neutral; 1: slightly warm; 2: warm; 3: hot). In his studies, subjects were offered to change their clothes, ambient temperature, to achieve a so-called neutral thermal state. Having analysed the system of thermoregulation and heat exchange of the human body, Fanger suggested the PMV index (Predicted Mean Vote [7]), according to the ASHRAE scale.

By introducing external physical quantities that affect heat transfer phenomena (air temperature, average radiation temperature, water vapour partial pressure and relative air velocity) and specific variables (thermal resistance of clothing, activity level, and average skin temperature) into the interrelationship of human body thermal equilibrium, the relationship between the generated and dissipated heat flux of the body is obtained. When there is an equilibrium heat balance, the heat produced by the human body is dissipated without increasing the activity of the body's thermoregulatory system [8-10]. PMV values vary from -3 to 3 on the ASHRAE scale (Fig. 1). It quantifies the average attitude of a group of subjects to comfort. This parameter is related to the PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) index, which represents the percentage of those who experience thermal discomfort. The value of 10% of the PPD index corresponds to the range from -0.5 to +0.5 for PMV on the Fanger scale. Even with PMV = 0, about 5% of the respondents feel uncomfortable.

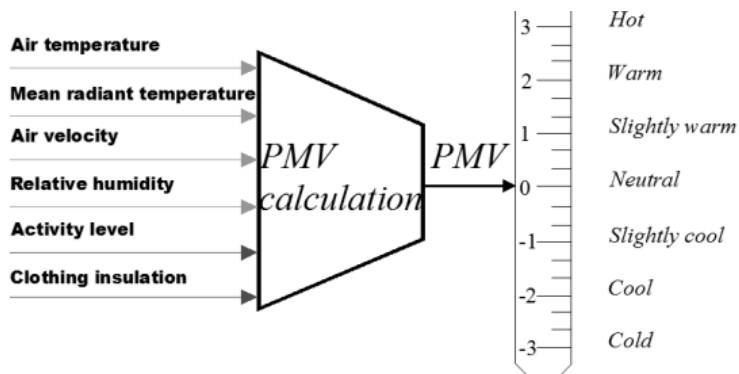


Figure 1. Fanger scale

Source: [7]

The expressions for calculating PMV are presented in [7]:

$$\begin{aligned} (PMV = & (0.303e^{0.303} + 0.028)\{(M - V) \\ & - 3.05 [5.733 - 0.007(M - V) - p_a] \\ & - 0.42[(M - V) - 58.15] - 0.0173M(5.87 - p_a) - \\ & - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - \\ & - (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\}, \end{aligned}$$

where:

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35.7 - 0.0275(M - W) - I_{a,cl}\{(M - W) - 3.05[5.73 - 0.007(M - W) - \\ & p_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 0.0173M(5.87 - p_a) - \\ & - 0.0014M(34 - t_a)\}. \end{aligned}$$

The indicator is determined from the following expression:

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)],$$

were: M – metabolic heat intensity [W/m^2]; W – activity level [W/m^2]; t_{cl} – the temperature at the level of the garment [$^{\circ}C$]; p_a – water vapour pressure [Pa]; t_a – air temperature [$^{\circ}C$]; $I_{(cl)}$ is the thermal insulation of clothing [Clo]; $f_{(cl)}$ is the clothing factor [-]; $t_{(mr)}$ is the average radiation temperature [$^{\circ}C$]; hc – convective heat transfer [$W/m^2^{\circ}C$].

Both ASHRAE 55 and EN ISO 7730 provide methods for evaluating the thermal environment of buildings to obtain a certain level of global comfort for occupants at a certain level of activity and clothing. ASHRAE 55 applies either the PMV-PPD method or the Standard Effective Temperature Comfort Zone (SET) method to air-conditioned spaces. It also provides an adaptive approach for determining acceptable thermal conditions in naturally ventilated rooms [4], while EN ISO 7730 proposes the PMV-PPD approach.

The EN ISO 14505 standard “Assessment of the thermal environment in vehicles” has three parts called: 1. Principles and methods for the assessment of thermal load; 2. Determination of equivalent temperature; 3. Assessment of thermal comfort using human occupants. In the first part of the standard there is a reference to EN ISO 7730, which suggests the use of PMV and PPD. Unfortunately, these two indices are generated, in particular, for homogeneous environments inside buildings. The second part of the standard proposes the T_{eq} index, an equivalent temperature index. This is a local and global index proposed by Nilsson in his doctoral thesis [8, 9].

The equivalent temperature is calculated using is estimated using the same method as the operating temperature for ambient air velocities less than 0.1 m/s. It is the average air temperature and the average radiation temperature. Convective heat transfer is to be taken into consideration. For values of ambient air velocity exceeding 0.1 m/s, the equivalent temperature is expressed as a function of air temperature, average radiation temperature, air velocity and thermal resistance of clothing [11, 12]. Several equivalent temperatures can be distinguished here: directional equivalent temperature mentioned two indices are generated, in general, for homogeneous environments inside buildings.

Part 2 of the standard provides for the T_{eq} index, which is equivalent temperature index. This index is both local – refers to heat transfer in the half-space in front of an infinitesimal plane and is described as a normal vector to the measurement plane at each point, determined by the magnitude and direction; omnidirectional equivalent temperature, which is around a part of the body or the whole body, measured, as a rule, with an ellipsoidal sensor; whole-body equivalent temperature, which refers to the entire human body and is a standardised value, as well as local equivalent. All of these equivalent temperatures can be determined using one or more hot film or ellipsoidal sensors or a heat dummy as described in EN ISO 14505/2. The equivalent temperature method using directional sensors or a heat manikin to assess thermal sensations in a vehicle has the main disadvantage that thermal sensations, primarily

due to localised heat sensitivity, are assessed using clothing-independent thermal comfort charts.

The third part of EN ISO 14505 specifies a direct method for assessing thermal comfort in vehicles, the main indicator of which is the Thermal Sensation Vote (TSV) of the people surveyed. The method measures and registers people's reactions to their thermal sensations (www.researchgate.net) in the environment quantitatively, using the same scale of values as PMV. TSV takes into account both psychological and physiological factors. Research using this method requires standardized questionnaires for a controlled and representative sample. By averaging the results, an assessment is made of the specific situation under study.

In general, ISO 14505 seems to be more sensitive to warm environment that ISO 14505 is only suitable for thermally neutral situations where latent heat of evaporation is a very small part of the total heat transfer of the human body. Furthermore, when it comes to thermal comfort in the vehicle cabin, other design parameters can affect passenger experience in unpredictable ways. One of these parameters are the parameters of thermal sensation and are less sensitive to the conditions of the cold environment compared to other approaches for non-isothermal environments, such as the Berkeley model [13]. This may mean from car seats, for example, the thermal conductivity of the seat upholstery [14–16]. The effect of changes in metabolic rate and activity on the thermal comfort zone of passengers in summer and winter, calculated using Fanger models, is shown in Figures 2a and 2b, respectively [13]. The metabolic rate expresses the rate of the transformation of chemical energy into mechanical and thermal work as a result of metabolic processes in the body, usually expressed per unit area of the total body surface. In ASHRAE 55, this indicator is expressed in metric units. Metabolic rate depends on activity and fitness level.

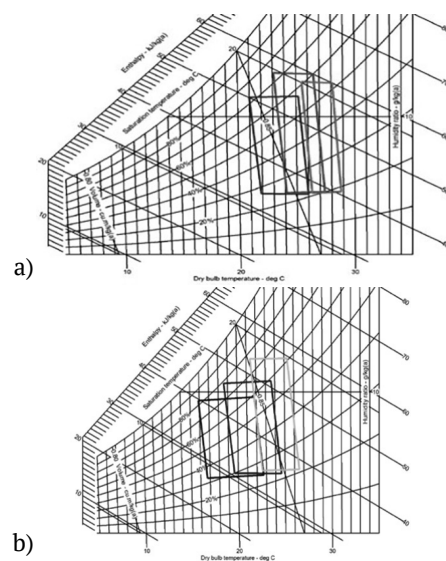


Figure 2. The effect of changes in metabolic rate and activity on the thermal comfort zone

Notes: a) in summer, b) in winter

Source: [13]

When the air temperature is low, convective heat loss increases as air movement is associated with increased activity. Because of this, the thermal load on the body's evaporative cooling system is reduced, and this leads to a wider range of activity before discomfort is felt. Thus, the maximum range of activity within which a person feels comfortable is achieved by minimising the dry thermometer temperature and relative humidity while compensating with an average radiant MRT temperature that is suitable to maintain comfort. Figure 2 (a, b) shows that with an increase in metabolic rate, the thermal comfort zone shifts to the left, which leads to a decrease in the boundaries of higher and lower temperature values.

Thermal insulation in clothing and its impact on the passenger's thermal comfort zone in summer and winter according to the Fanger models are shown in Figure 3 (a, b), respectively. In cold weather, the layering of insulating clothing can help keep a person warm. At the same time, if a person is involved in a high level of physical activity, such layers can prevent heat loss. Depending on the type of clothing material, air movement and relative humidity can reduce its insulating ability. Thus, all four mechanisms The main processes of heat exchange, including evaporation, convection, radiation, and thermal conductivity, are strongly influenced by clothing (hal.archives-ouvertes.fr). Shoes can reduce heat loss/gain from the floor. Clothing also usually prevents the movement of air near the skin surface, so convective and evaporative heat transfer from the skin can be neglected. Figure 3 (a, b) shows that with an increase in the amount of clothing or the level of thermal insulation, the thermal comfort zone shifts to the left, which leads to a decrease in the boundaries of higher and lower temperature values. On the other hand, when the amount of clothing or the level of thermal insulation decreases, the thermal comfort zone shifts to the right.

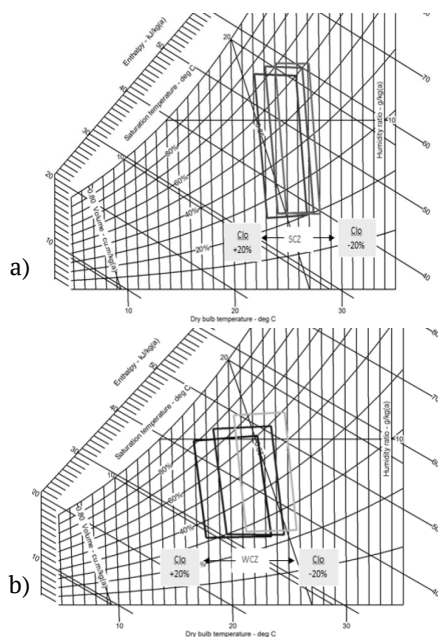


Figure 3. Effect of thermal insulation on the thermal comfort zone

Notes: a) in summer, b) in winter

Source: [13]

The sensitivity analysis associated with variations) in the air velocity in the cabin for the summer and winter passenger thermal comfort zones according to the Fanger models is shown in Figure 4 (a, b), respectively. The movement of air through the skin lowers body temperature through convective energy transfer and latent energy transfer, namely the evaporation of sweat from the skin. If the skin temperature is relatively high, the air removes some of the excess heat from the body. Thus, air velocity, especially if passengers wear light clothing, can be adjusted by modifying the fan settings to give passengers control over their local climate. Figure 3 (a, b) shows that as air speed increases, the thermal comfort zone is shifting to the right, which (doi.org) leads to an increase in the upper and lower temperature limits.

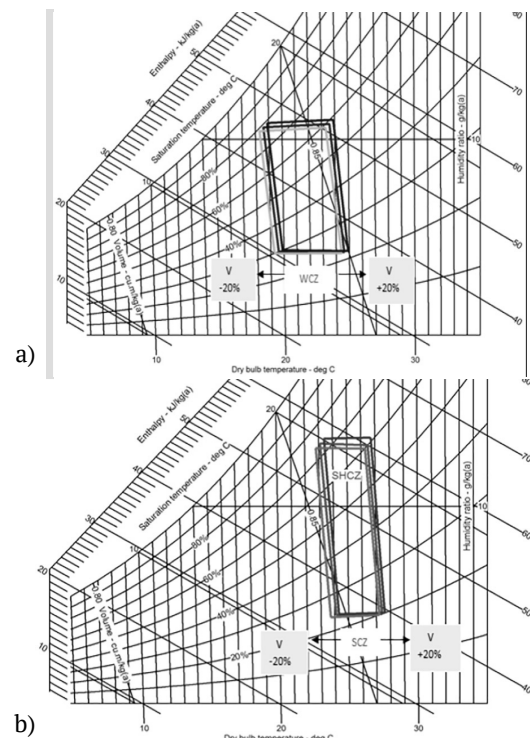


Figure 4. Influence of air velocity in the cabin on the thermal comfort zone

Notes: a) in summer, b) in winter

Source: [13]

Methods of increasing comfort

One of the options for providing a microclimate for passengers and improving the driver's working conditions is increasing the volume of fresh air supply. At a normal ambient temperature of +8 to +26°C, the air conditioning system provides the maximum level of fresh air supply (80-100%). In such conditions, air exchange is continuous and fast. At both low and high temperatures, the air conditioning system operates in what is known as mixed air flow mode. In this mode, fresh air is supplied to the cabin every 4-7 minutes. At the request of the passenger, the maximum volume of fresh air supplied by air conditioning systems, for example, in Mercedes-Benz Tourismo, Setra ComfortClass 500, TopClass 500 and S 531 DT

double-decker buses, can be increased by 33-40% due to the additional supply of outside air [17]. For example, in Setra TopClass coaches, fresh air passes through additional roof filters of the air conditioning system built into the La Linea construction elements. As a result, air exchange in these buses occurs every 5 minutes. In the Setra S 531 DT model, exhaust air is removed on the second floor through two ventilation diffusers and through the steps on the lower floor. The lower floor of the bus is ventilated through grilles in the driver's cab and in the floor. In all city buses and low-entry buses, the doors open at bus stops to provide a regular supply of outside air.

Paper [18] analysed Influence of different supply air velocities on air distribution in the car cabin. Figure 5 presents the temperature distribution at various values of the supply air velocity. At the supply air velocity) of 2 m/s and 3 m/s, the air velocity in front of the passengers' faces will be approximately 0.1~0.2 m/s. In this case, no passenger will feel cooling and will be very hot. If the supply air velocity is 4 m/s, the airflow velocity) in front of the passengers' faces will be about 0.3 m/s. In this situation, the air velocity is good – the dryness of the face is moderate and the passengers feel cool. If the air velocity is 5 m/s, the wind sensation on the face will be too intense.

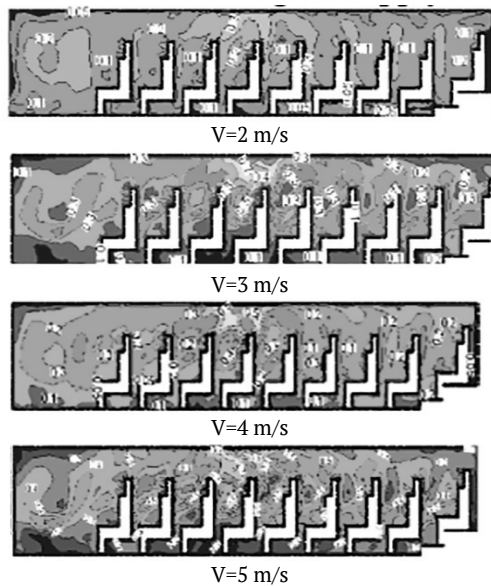


Figure 5. Effect of air velocity in the cabin on the temperature distribution in the bus cabin

Notes: a) in summer, b) in winter

Source: [19]

Simulation of air blowing and intake in the bus driver's cab

Let's consider the option of ventilating the workplace of a city bus driver with blower fans mounted in the roof of the bus. One fan works to draw fresh air into the cabin, and the other to force it out. Figure 6 shows the air inlet and outlet diagram.

Figure 7 shows the results of modelling the distribution of air masses at the bus driver's workplace at air blowing speeds of 0.1, 0.25, 0.35, and 0.5 m/s.

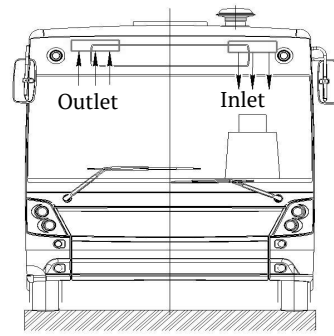


Figure 6. Scheme of air blowing and intake in the bus driver's cab

Source: developed by the authors

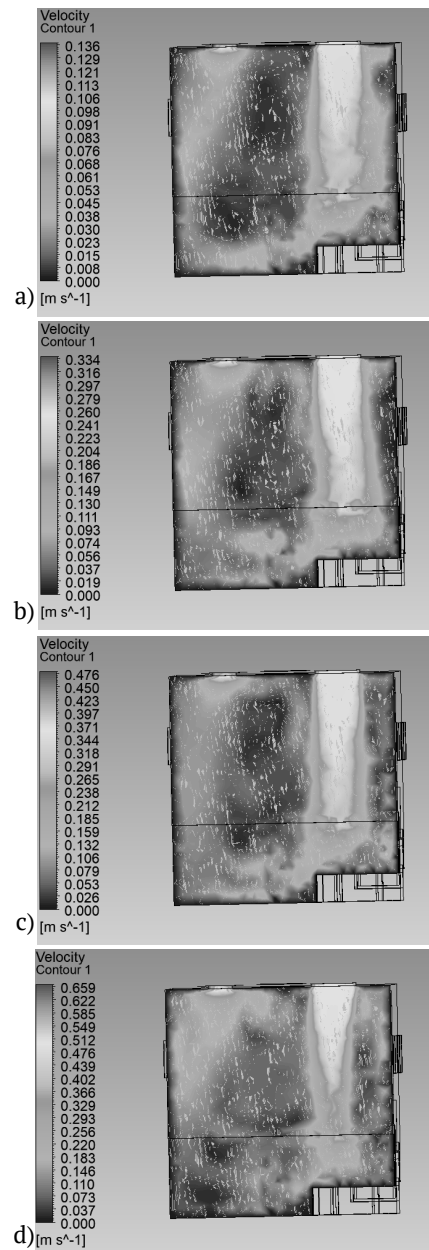


Figure 7. Distribution of air velocities at the bus driver's workplace

Notes: a) 0.1 m/s; b) 0.25 m/s; c) 0.35 m/s and d) 0.5 m/s

Source: developed by the authors

As can be seen from Figure 7a, the air blowout in the 1st mode is quite small. In the area of the driver's head, the air velocity fluctuates within 0.06-0.09 m/s, which is quite low to ensure the standard values of the ventilation system. Especially in hot weather, this air exchange may not be enough. Figure 7b illustrates that the driver's workplace in the 2nd mode of operation is better ventilated. We will have a velocity distribution in the range of 0.15-0.22 m/s, which significantly improves the ventilation of the driver's cab. At the 3rd mode (Fig. 7c) of fan operation in the driver's head area, the air velocity is 0.25-0.31 m/s, which corresponds to the standards, i.e., the ventilation works very well. In the area of the driver's legs, the air velocity drops to 0.21 m/s. When blowing with an air velocity of 0.5 m/s, which is the most intense ventilation, Figure 7d shows that at the level of the bus driver's head (doi.org) the air velocity will be (doi.org) in the range of 0.4-0.5 m/s (theses.ncl.ac.uk), and at the level of the legs and waist it will decrease to 0.25-0.3 m/s. Obviously, at the level of the head there is an excess of normalized values. From this we can conclude that the 4th maximum fan operation mode should be used for particularly hot weather.

Conclusions

We have modelled the air exchange at the workplace of a city bus driver with induction fans mounted in the roof of the bus, one of which works to draw fresh air into the cabin and the other to force it out at air blowing speeds in four modes from 0.1 to 0.5 m/s. In the first mode, the air velocity

in the driver's head area ranges from 0.06 to 0.09 m/s, which is quite low to ensure the standard values of the ventilation system. The mode with the maximum supply air velocity is recommended for use only in hot weather.

In the future, it is worth investigating the organisation of air exchange in ventilated seats. For backrests with only one fan, only the suction mode should be considered, for two, one should be placed in the middle part of the backrest for suction, and the other in the lower part for discharge. Alternatively, a combined blower is possible, where it is first used in suction mode and then for longer periods of time in the discharge mode. For a cushion, in the case of a standard inflator, we can definitely recommend the suction mode for the entire time. If two inflators are considered, one should be placed in the buttocks for suction and the other in the thighs for inflation.

A suggestion for further research would be to continue the simulation by changing the environmental conditions, for example, driving in a convertible, or further in the vehicle interior, but taking into account the time of year, for example, a spring day with an ambient temperature of about +15°C, while the temperature in hot summer is +40°C. The option of simulating warm/cold air being blown through the headrest is also worthy of note. This would allow monitoring of thermal comfort in a different situation and provide other data to identify more significant differences between the modes. This could also be extended to observe the homogeneity of air distribution, which is another parameter that affects the final thermal comfort.

References

- [1] Konieczny, Ł., Burdzik, R., Jaworski, R., & Wierzbicki, S. (2018). Analysis of noise inside bus of hybrid bus vehicles. *Vibroengineering Procedia*, 19, 194-198. doi: 10.21595/vp.2018.20229.
- [2] Misanovic, S., Taranovic, D., Maljkovic, M., & Milicic, B. (2018). Measurement noise level of E-bus HIGER KLQ6125GEV3 on the polygon. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271, article number 012018. doi: 10.1088/1757-899X/1271/1/012018.
- [3] Orczyk, M. (2018). Analysis of internal noise of public transport buse. *WUT Journal of Transportation Engineering*, 121(null), 295-305. doi: 10.5604/01.3001.0014.461.
- [4] ISO 13731:2001. (2006). *Ergonomics of the thermal environment - evaluation of thermal environments in vehicles*. Retrieved from https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/09cca904-4779-4ff5-85c3-48335ef23779/en-iso-13731-2001?srsltid=AfmBOoomu5k71SO6zLozeFr-ASv3JVWc8Fm-pt8dR5az2QbTFHla_UTz.
- [5] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013. (2013) *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Retrieved from <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>.
- [6] ISO 7730:2005. (2005). *Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/39155.html>.
- [7] Fanger, P.O. (1980). Proposed Nordic standard for ventilation and thermal comfort. In *Proceeding international conference on building energy management*. Florida: Elsevier.
- [8] Nilsson, H.O., & Holmér, I. (2002). *Definitions and measurements of equivalent temperature, European Commission cost contract no smt4-ct95-2017. Development of standard test methods for evaluation of thermal climate in vehicles*. Reading: LPP.
- [9] Nilsson, H.O. (2007). Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. *Building and Environment*, 42, 4000-4005.
- [10] Voychyshyn, Y.I., Yakovenko, E.I., Horbay, O.Z., Holenko, K.E., & Burian, M.V. (2022). Modelling the thermal comfort of a city bus by the PMV method using the CBE Thermal Comfort Tool. *Modern Technologies in Engineering and Transport*, 2 (19), 32-41. doi: 10.36910/automash.v2i19.901.

- [11] Foda, E., Almesri, I., Awbi, H.B., & Sirén, K. (2011). Models of human thermoregulation and the prediction of local and overall thermal sensations. *Building and Environment*, 46(10), 2023-2032. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.04.010.
- [12] Alahmer, A., Abdelhamid, M., & Omar, M. (2013). Design for thermal sensation and comfort states in vehicles cabins. *Applied Thermal Engineering*, 36, 126-140. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.056.
- [13] Alahmer, A., & Omar, M. (2013). *Vehicular cabins' thermal comfort zones; fanger and berkley modelling*. *Vehicle Engineering*, 1(1), 19-32.
- [14] Kernysky, I., et al. (2021). Development of comfort and safety performance of passenger seats in large city buses. *Energies*, 14(22), article number 7471. doi: 10.3390/en14227471.
- [15] Cengiz, T.G., & Babalik, F.C. (2007). An on-the-road experiment into the thermal comfort of car seats. *Applied Ergonomics*, 38, 337-347. doi: 10.1016/j.apergo.2006.04.018.
- [16] Oi, H., Tabata, K., Naka, Y., Takeda, A., & Tochihara, Y. (2012). Effects of heated seats in vehicles on thermal comfort during the initial warm-up period. *Applied Ergonomics*, 43, 360-367. doi: 10.1016/j.apergo.2011.05.013.
- [17] A place to enjoy the ride: Basic Plus control area and Comfort Plus control area. (n.d.). Retrieved from https://www.mercedes-benz-bus.com/uk_UA/models/tourismo-rhd/comfort-and-design/comfort.html.
- [18] Yang, H., Wang, Y., & He, T. (2015). The analysis on the effect of passenger car air conditioning and distribution with different inlet parameters. In *International conference on information sciences, machinery, materials and energy (ICISMME 2015)* (pp.229-233). Amsterdam: Atlantis Press. /doi: 10.2991/icismme-15.2015.45.

Ігор Вікович

Доктор технічних наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0281-158X>

Орест Возняк

Доктор технічних наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6431-088X>

Євгенія Яковенко

Кандидат технічних наук, доцент
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9065-5649>

Олег Коцюмбас

Кандидат технічних наук, доцент
Національний університет «Львівська політехніка»
79013, вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6590-4022>

Дослідження повітрообміну на робочому місці водія автобуса

Анотація. Акцент на тепловому комфорті водія і пасажирів є важливим не тільки з міркувань зручності, але і з міркувань безпеки. У статті досліджується мікроклімат на робочому місці водія, який формується на основі теплообміну як між зовнішнім і внутрішнім простором салону, так і в самому салоні. Проаналізовано вплив різних чинників та умов експлуатації на мікроклімат в салоні автобуса. Увагу зосереджено на локальних пристроях теплового комфорту, оскільки термокомфортні установки працюють тепер комплексно, приділяючи особливу увагу локальному тепловому комфорту. Проведено моделювання системи вентиляції, яка працює на забір свіжого повітря в салон з примусовим видаленням назовні. Змодельовано процес повітрообміну на робочому місці водія міського автобуса з вмонтованими в дах автобуса нагнітаючими вентиляторами, один з яких працює на забір свіжого повітря в салон, а інший на примусове видалення назовні при швидкостях видування повітря від 0,1 до 0,5 м/с для чотирьох режимів роботи вентиляторів. Запропоновано організацію повітрообміну на робочому місці водія, яка може бути застосована при проектуванні теплового комфорту в нових моделях транспортних засобів, особливо великогабаритних, до яких належать автобуси

Ключові слова: мікроклімат салону; тепловий комфорт; система вентиляції; автобус; водій

Олександр Шмерего*

Завідувач сектору

Державний науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

01601, вул. Богомольця, 10, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0009-0006-2870-700X>

Сергій Чуйко

Доктор філософії, доцент

Державний університет «Житомирська політехніка»

10005, вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-7052-5158>

Сергій Цимбал

Кандидат технічних наук, доцент

Вінницький національний технічний університет

21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-3066-4169>

Особливості проведення досліджень аварійних процесів в електрообладнанні транспортних засобів на ділянці електричного кола: генератор – акумуляторна батарея

Анотація. У статті представлені результати і визначені проблеми на підставі проведення комплексних експертних досліджень умов, за яких виникають аварійні режими роботи електрообладнання транспортних засобів на ділянці електричного кола: генератор – акумуляторна батарея. Електричні пристрої складають значну частину причин пожеж транспортних засобів. Усі електричні пристрої в автомобілі підключаються до основного джерела живлення, акумулятора та генератора, за допомогою проводки. Структура електропроводки складається з провідника, який передає електричні сигнали, і ізолятора, що оточує провідник. В основному, форма і структура провідника, а також товщина ізолятора розроблені по-різному в залежності від різниці в допустимому струмі. Тому дуже небезпечно налаштовувати ланцюг, який підключає кілька електричних пристроїв до одного запобіжника, або необережно підключати зовнішню проводку для підключення окремих електричних виробів. Перевантаження у ланцюзі може спричинити коротке замикання електропроводки та пошкодження ізоляції через перегрів, що може призвести до прямого ризику займання автомобіля. Зроблено припущення, що серед найімовірніших причин пожежі – несправності проводки, які найчастіше приводять до короткого замикання. Ізоляція, порушена з тієї чи іншої причини, надає для оголених частин дротів можливість зімкнутися між собою або з «масою» автомобіля. Внаслідок протікання по дротам струму короткого замикання, надмірно великого для проводки даного перетину, починають нагріватися. Через високу температуру плавиться і запалюється ізоляція, від неї – прилеглі деталі з пластику та інших горючих матеріалів. Згідно з результатами проведеного дослідження, було встановлено, що причиною пожежі в розглянутому автомобілі став тепловий вплив електричного струму в зоні загоряння. Це призвело до займання ізоляції дроту, через який, відповідно до конструктивного рішення, під час роботи двигуна внутрішнього згоряння мав передаватися струм від автомобільного генератора до бортової електромережі. З огляду на різноманітність сучасних транспортних засобів іноземного виробництва та постійне вдосконалення їхньої електротехнічної

Suggested Citation:

Shmerego, O., Chuiko, S., & Tsymbal, S. (2024). Particularities of conducting emergency processes in electrical transportation facilities at the electric stake dalliance: Generator – battery. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 168-176. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.168.

*Corresponding author



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

конструкції, виникає необхідність розширення та розвитку інформаційної бази, а також створення доступних довідників з експлуатації, методик проведення експертиз і досліджень електрообладнання

Ключові слова: пожежна безпека; транспортний засіб; генератор; пожежа; судова експертиза

Вступ

Пожежі на транспортних засобах виникають через механічні та електричні несправності під час експлуатації, людський фактор, дорожньо-транспортні пригоди і спричиняють втрату майна або навіть загрозу для життя людей. Приблизно 50 % пожеж на транспортних засобах трапляються в моторному відділенні, потім у вантажному відсіку, колесах і передніх сидіннях. Сучасний транспортний засіб наділений інноваціями у сфері безпеки, оснащений вдосконаленими функціями, які забезпечують комфорт, зручність і продуктивність, що відрізняє їх від своїх попередників. Разом з тим, в автотранспортних засобах конструктивно поєднано системи і елементи, які у випадку аварійних режимів роботи чи несправностей можуть не лише призвести до дорожньо-транспортної пригоди (ДТП), але й викликати пожежу [1].

В Україні, як і в світі, наявна тенденція до зростання кількості пожеж на транспорті. У більшості випадків такі види пожеж призводять до травматизму та людських жертв. Майже кожна друга пожежа автотранспортних засобів пов'язана із електричним струмом [2]. Електричні пристрої складають значну частину причин пожеж транспортних засобів. Однією з найбільш пожежонебезпечних ділянок у транспортних засобах є силовий провід, який використовується для заряджання акумуляторної батареї. На цьому проводі можуть з'являтися оплавлення, що зазвичай виникають після термічного пошкодження його ізоляції.

Судова експертиза, що стосується вивчення обставин виникнення пожеж у транспортних засобах, є однією з найскладніших серед експертних досліджень. Вона передбачає детальний аналіз інформації, отриманої під час огляду пошкодженого транспортного засобу, а також систематизацію свідчень очевидців. Проведення таких досліджень базується на спеціальних знаннях експертів у таких напрямках: 10.8 – «Дослідження обставин виникнення та поширення пожеж і дотримання вимог пожежної безпеки», 10.18 – «Дослідження технічної експлуатації електроустаткування» та 10.2 – «Дослідження технічного стану транспортних засобів». У сучасних умовах ці експертизи виконуються висококваліфікованими фахівцями в експертних установах.

Цей вид експертної діяльності має свої специфічні особливості, які охоплюють пізнавальні, організаційні, процесуальні аспекти та інші важливі сфери професійного експертного аналізу. Досвід проведення експертних досліджень за цим напрямком показує, що постійне вдосконалення електротехнічної конструкції сучасних транспортних засобів викликає необхідність вдосконалення та розвитку інформаційної бази та створення доступних довідників по

експлуатації, методик проведення експертиз і експертних досліджень електрообладнання.

Згідно із статистичними даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2023 році на транспортних засобах сталося 3613 пожеж, що становить 5,3 % від загальної кількості пожеж. Прямі збитки збільшилися в порівнянні з 2022 роком на 67,2 % та становлять 1 млрд 178 млн 687,3 тис. грн (5,1 % від загальної суми прямих збитків). Побічні збитки становлять 2 млрд 209 млн 268,8 тис. грн (зростання у 2,3 раза; 3,7 % від загальної суми побічних збитків). На цих об'єктах загинула 41 людина та 127 людей отримали травми. Загалом, упродовж 2023 року під час пожеж транспортних засобів 2970 од. техніки було знищено та 2661 од. техніки було пошкоджено [3].

За даними [4] у США пожежі на транспортних засобах становлять приблизно 16 відсотків від загальної кількості зареєстрованих пожежних подій у 2018–2022 роках. Ці пожежі спричинили більше смертей серед цивільного населення, ніж пожежі нежитлових будівель і житлових будинків. За оцінками, у 2018–2022 роках у середньому за рік було зареєстровано 119 681 пожежу автомобільного транспорту. На ці пожежі припадає 56 відсотків пожежно-транспортних засобів і 61 відсоток усіх пожежно-транспортних засобів на автодорогах. Вони спричинили в середньому 380 загиблих серед цивільного населення (65 відсотків), 783 поранених серед цивільного населення (59 відсотків) та матеріальні збитки на 765 мільйонів доларів (35 відсотків) [4]. Основними причинами пожеж транспортних засобів аналізуються електричні фактори, механічні фактори, дорожньо-транспортні пригоди, недбалість, підпали, витік газу тощо. Більшість пожеж, за винятком дорожньо-транспортних пригод і підпалів, спричинені конструктивними дефектами та недбалістю управління транспортним засобом.

Так як стверджено у [2] майже кожна друга пожежа автотранспортних засобів пов'язана із електричним струмом. Пожежонебезпечними режимами несправностей електрообладнання транспортних засобів є струмове перенавантаження, коротке замикання та підвищений перехідний опір [5]. Пожежна безпека автотранспортних засобів залежить від надійної роботи всієї системи електрообладнання, її вузлів і агрегатів. Для виникнення пожежі необхідний досить потужний тепловий імпульс, який призведе до нагрівання речовини або матеріалу та спричинить загоряння. Очевидно, що оцінка пожежної небезпеки електрообладнання повинна бути пов'язана з оцінкою теплового нагрівання окремих елементів. Тому необхідно проаналізувати тепловий стан найбільш пожежонебезпечних елементів електрообладнання.

Великий обсяг теоретичних та експериментальних досліджень відносно пожежної безпеки транспортних засобів викладений у працях О. В. Бажинова, М. М. Кравцова, О. В. Лазаренка, А. Ф. Гаврилюка, L. Makovicka, C. Ferrone, та ін. [1, 2, 5–8, 9], де досліджувались основні фактори, що впливають на виникнення пожеж на автомобілях через короткі замикання у бортовій електромережі, вплив аварійних режимів роботи бортових електромереж транспортних засобів та їх пожежонебезпечність, ризики відмови електричних систем тощо. Разом з тим дослідженню пожежонебезпечних режимів роботи бортової електромережі автомобіля на ділянці електричного кола «генератор – акумуляторна батарея» у цих роботах приділено недостатню увагу.

Результати

У зв'язку з урізноманітненням бортових систем автомобілів бортова електромережа транспортних засобів модифікується і розширюється, через що зростає небезпека виникнення пожежі. Відомо, що проводка автомобіля з часом може пошкоджуватися через вібрацію, тертя або вплив навколишнього середовища. Пошкоджені або зношені проводи можуть призвести до короткого замикання, відмови електричних систем або навіть до пожежі. В електротехнічних системах автомобілів, з огляду на досліджувані явища та процеси, електрообладнання на ділянці «генератор – акумуляторна батарея» зазвичай є доволі надійною частиною. У цій системі, за винятком генератора, немає відкритих обертових вузлів, що робить її менш вибагливою в експлуатації. При дотриманні правил використання вона може функціонувати без несправностей протягом тривалого часу та не потребувати значного обслуговування.

Цікаво, що для роботи цього обладнання користувачеві не обов'язково знати всі технічні особливості його конструкції, зокрема електронні комунікації та елементи блоку керування (реле-регулятора) й інші складові. Відсутність цих знань не впливає на надійність його функціонування. Однак для забезпечення стабільної та безвідмовної роботи важливо дотримуватися рекомендацій виробника щодо експлуатації, зокрема щодо режимів заряджання акумулятора та використання накопиченої енергії.

Практика показує, що сучасні транспортні засоби оснащені складними електронними системами регулювання, які мають високий запас надійності та багатифункціональність. Водночас їхня складність може спричинити додаткові ризики, включаючи можливі відмови та несправності, які, у певних випадках, можуть не лише виводити з ладу окремі компоненти, а й створювати загрозу займання. Однією з потенційно пожежонебезпечних зон є силовий провід, який забезпечує зарядку акумуляторної батареї. Термічні пошкодження його ізоляції часто призводять до оплавлення, що може бути хибно інтерпретоване як ознака короткого замикання та помилково визначене як причина пожежі. Згідно з конструктивними особливостями,

коли генератор не працює, струм не повинен проходити через цей провід. Однак виявлені пошкодження ізоляції свідчать про наявність аномальних режимів роботи генератора під час його функціонування.

Як відомо, генератор відповідає за зарядку акумулятора і постачання електроенергії до всіх електричних систем автомобіля під час роботи двигуна. Вал генератора обертається завдяки крутному моменту, який передається від шківів на колінчастому валу двигуна за допомогою клиновидного або поліклинового ремня. Передаточне число клиноремінного приводу становить 1,7–2,5. Під час руху автомобіля частота обертання колінчастого вала на холостому ходу в сучасних двигунах внутрішнього згоряння становить 500–800 об./хв., а максимальна – 4000–5000 об./хв. Відповідно, вал генератора може обертатися зі швидкістю до 8000–10000 об./хв. (5000–6000 об./хв. у дизельних двигунах).

Напруга на виході генератора, відносно маси автомобіля, до якої підключені мінусові контакти генератора та акумуляторної батареї, залежить від швидкості обертання його вала. Чим вона вища, тим більша напруга. Однак електрообладнання автомобіля, зокрема електролампи, контрольно-вимірювальні прилади та блоки керування, розраховані на стабільну напругу 12 або 24 В постійного струму. Для підтримки цього рівня, незалежно від частоти обертання генератора та підключеного навантаження, використовується регулятор напруги.

Якщо частота обертання колінчастого вала двигуна знижується нижче 500–800 об./хв., напруга генератора стає меншою за напругу акумуляторної батареї. У разі незняття батареї з генератора починається її розряд на генератор, що може викликати перегрів ізоляції обмоток генератора та розряд акумулятора. Це стосується систем із генераторами постійного струму. У генераторах змінного струму зниження напруги нижче рівня акумуляторної батареї не спричиняє її розряд, оскільки діодний випрямляч запобігає зворотному протіканню струму (за умови його справної роботи). При збільшенні частоти обертання колінчастого вала генератор знову підключається до системи електрообладнання, що забезпечується реле-регулятором.

Генератор розрахований на певну максимальну силу струму. Проте в разі несправностей, таких як значний розряд акумуляторної батареї чи коротке замикання, він може видавати струм, що перевищує допустиме значення. Тривала робота в такому режимі призводить до перегріву та пошкодження ізоляції обмоток. Для захисту генератора від перевантаження використовується обмежувач струму. Регулятор напруги та обмежувач струму зазвичай об'єднані в єдиний пристрій – реле-регулятор. У генераторах змінного струму окремий обмежувач струму може бути відсутнім, однак у їх конструкції передбачені пристрої, що виконують аналогічні функції.

Використання технологій та електронних компонентів у розробці регуляторів напруги дозволило суттєво зменшити їхні розміри й інтегрувати безпосередньо

в корпус генератора. Генератори змінного струму, оснащені вбудованим регулятором напруги, зазвичай називають генераторною установкою. Однак підвищена насиченість електронними елементами цього електрообладнання збільшує ймовірність його відмов. У деяких випадках такі відмови можуть призводити до аварійних ситуацій, зокрема до займання.

Аналіз пожежі автомобіля Skoda Superb Elegance 1.8 TSI/118kW 7AG, що сталася 21.01.2011 р., показав, що осередок займання розташовувався в зоні головного гальмівного циліндра з вакуумним підсилювачем гальм. При цьому бачок для гальмівної рідини з полімерного матеріалу та гумовий вакуумний шланг повністю вигоріли. На металевому корпусі підсилювача залишилися невеликі сірі плями окалини, а на лівій частині балки замка капота спостерігалися значні термічні пошкодження, які виражалися в повному вигорянні лакофарбового покриття та появі шару іржі. Найбільші пошкодження отримала передня ліва верхня частина корпусу акумуляторної батареї – вона була сильно оплавлена та обвуглена. Плюсова клемка акумулятора повністю розплавилася, а силовий провід, який до неї підключався,

відокремився та залишився висіти попереду батареї. На силовому проводі, що передавав напругу від генератора для зарядки акумулятора, на відстані 10-15 см від клемки залишилися залишки вигорілої ізоляції у вигляді білого попелу. Це місце розташовувалося приблизно за 5 см від переднього лівого кута акумулятора.

Слід зазначити, що тепловий вплив на матеріали і конструкції автомобіля в ході пожежі призводить до формування на них слідів термічних уражень, які специфічні для кожного виду матеріалу. Термічні ураження у більшості випадків спостерігаються візуально, але в залежності від ступеня термічної зруйнованості матеріалу під впливом тепла пожежі можуть і бути не видимі оку і виявлятися за допомогою інструментальних методів і технічних засобів. При поглибленому діагностуванні ступінь термічного ураження будь якого матеріалу слід класифікувати двома основними параметрами-температурою і тривалістю нагрівання. Причому вплив температури є більш істотним ніж тривалість.

На Рисунку 1 представлено частину моторного відсіку досліджуваного автомобіля за результатами експертного огляду.

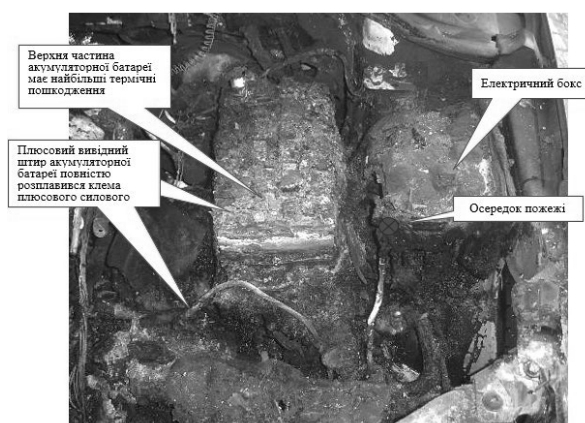


Рисунок 1. Вид на ліву частину моторного відсіку досліджуваного автомобіля

Джерело: фото авторів

На оголеному силовому проводі (поз. СП), що передавав напругу від генератора до розподільчої рейки для зарядки акумуляторної батареї, відсутні сліди

розплавленого полімерного матеріалу, які спостерігаються на інших плюсових проводах, підключених до цієї рейки (Рис. 2).

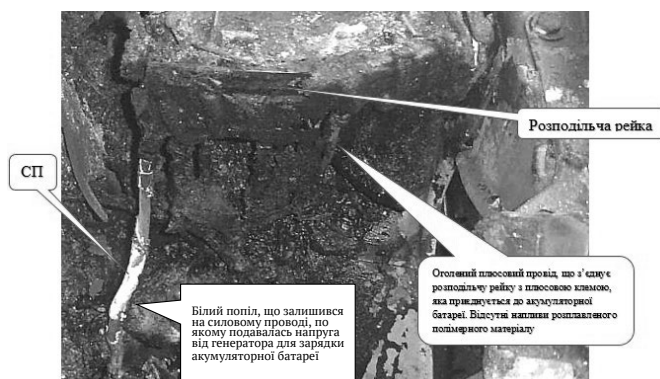


Рисунок 2. Фрагмент блоку, в якому встановлені реле та електрозапобіжники у моторному відсіку

Джерело: фото авторів

Експертне дослідження встановило, що причиною пожежі в досліджуваному автомобілі стало теплове вплив електричного струму в осередку займання. Це призвело до загоряння ізоляції проводу, який за конструктивним задумом під час роботи двигуна мав передавати струм від генератора до бортової електромережі. Однак відповідно до технічного рішення, коли генератор не працює (автомобіль перебував на стоянці під час займання), струм через цей провід не повинен був протікати. Проте ознаки перегріву, зокрема в місці болтового з'єднання проводу з розподільчою рейкою, свідчать про наявність аномальних режимів роботи генератора під час його функціонування. Це могло спричинити нагрівання у зоні з'єднання через неякісний електричний контакт. Крім того, експлуатація генератора змінного струму в даному автомобілі вимагала ретельного дотримання правил підключення до бортової електромережі. Ці роботи повинні були бути виконані на заводі-виробнику, оскільки автомобіль був нещодавно придбаний в автосалоні. Наявність значних перехідних опорів у зазначеному з'єднанні суперечить вимогам безпеки щодо використання електрообладнання автомобільної електромережі.

Відомо, що в генераторі змінного струму обертовою частиною є ротор. У генераторах марки Bosch (та більшості аналогічних моделей) ротор виконує функцію електромагніту (індуктора), що створює магнітне поле. Під час його обертання в обмотках статора наводиться електрорушійна сила, унаслідок чого генератор виробляє електроенергію [10]. Напруга до індуктора подається через роторні (колекторні) кільця та щітки. Колекторні кільця – це два мідні (інколи сталеві) кільця, розташовані на задній частині ротора. Вони обертаються разом із ротором і колінчастим валом двигуна. Щітки, виготовлені з бронзографітового матеріалу, притискаються до кілець за допомогою пружин, забезпечуючи безперервний контакт. Завдяки цьому струм передається від нерухомої частини генератора до його рухомої частини.

Нерухомою частиною генератора є статор, що містить ізольовані між собою обмотки, які створюють магнітне поле. Коли ротор обертається, його магнітне поле також рухається, проходячи через котушки статора. Це викликає утворення електричних потоків у статорних обмотках і наведену електрорушійну силу, яка формує змінну напругу, що використовується для заряджання акумуляторної батареї. Оскільки бортова електромережа автомобіля, включно з акумуляторною батареєю, працює на постійному струмі, а генератор виробляє змінний струм, необхідне його перетворення. Для цього використовується діодний блок (випрямляч), розташований у задній частині генератора. Діод є електронним елементом із двома контактами, який пропускає струм тільки в одному напрямку, виконуючи функцію випрямлення. Діодний блок містить дев'ять діодів, з яких три є додатковими. Виводи статорних обмоток з'єднані з основними діодами, які випрямляють напругу для живлення бортової електромережі та зарядки акумулятора. Крім того, ці виводи підключені до трьох додаткових діодів, що забезпечують подачу напруги до регулятора напруги та контрольної лампи зарядки.

Регулятор напруги обмежує вихідну напругу генератора до заданого значення (приблизно 14 В), запобігаючи її надмірному зростанню. Контроль напруги в бортовій електромережі здійснюється через додаткові діоди діодного мосту, що дозволяє регулятору керувати магнітним полем ротора генератора змінного струму. Якщо напруга в бортовій мережі падає нижче допустимого рівня, регулятор збільшує її, посилюючи магнітне поле ротора, яке індукуює більшу електрорушійну силу в статорних обмотках, що призводить до підвищення вихідної напруги генератора. У разі перевищення допустимого рівня напруги регулятор зменшує її, послаблюючи магнітне поле, що, своєю чергою, знижує вихідну напругу генератора, подану на бортову електромережу. На Рисунку 3 представлена схема зарядження акумуляторної батареї автомобіля від джерела живлення, трифазного генератора змінного струму.

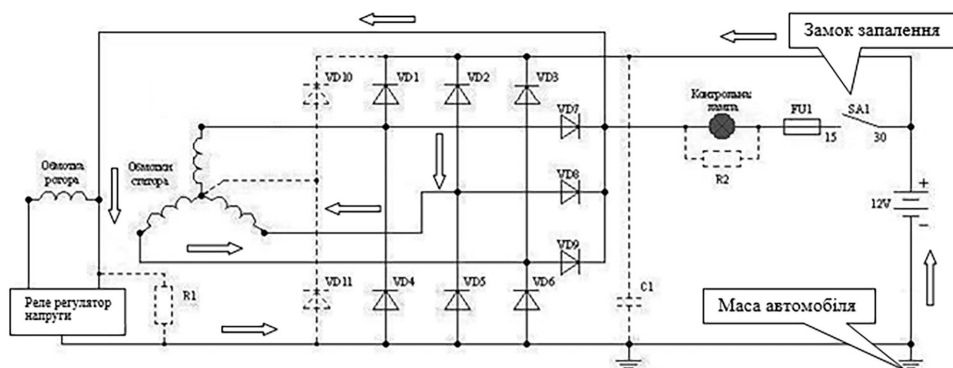


Рисунок 3. Схема зарядження акумуляторної батареї від джерела живлення, трифазного генератора змінного струму на автомобілі

Примітки: → напрямок протікання електричного струму після пошкодження діоду (діодів) діодного блоку та електронних приладів реле регулятора на досліджуваному автомобілі

Джерело: розроблено авторами

Контрольна лампа зарядки, розташована на панелі приладів, виконує не лише функцію індикації несправності генератора, а й забезпечує його запуск, формуючи електричне коло живлення для обмотки збудження при вимкненому двигуні. У разі несправності лампи її функцію частково компенсує паралельно підключений резистор R2 (опором 470 Ом), що допомагає стабільному запуску генератора. Як тільки двигун починає працювати, генератор змінного струму починає виробляти електроенергію. Основні діоди направляють струм до акумуляторної батареї, а додаткові постачають напругу до регулятора напруги. Оскільки контрольна лампа підключена між цими діодами, при справному генераторі різниця напруг між ними наближається до 0 В, тому лампа не горить.

У процесі експлуатації електросистем автомобіля можуть виникати аварійні режими роботи, які поділяються на зовнішні та внутрішні. До зовнішніх належать короткі замикання у ланцюгах живлення або навантаження електромережі. Внутрішні несправності, які є більш різноманітними, зазвичай спричинені пошкодженням діодів випрямного блоку генератора або інших електронних компонентів. Порушення ізоляції, що спричиняють короткі замикання в елементах електрообладнання автомобіля, зазвичай виникають через контакт із гарячими або рухомими деталями, а рідше – внаслідок перетирання об гострі краї конструкційних елементів.

Ще однією, хоча й менш поширеною, причиною загоряння є порушення контакту в роз'ємах силових проводів, що супроводжується іскрінням, перегрівом і подальшим займанням ізоляції. Іноді короткому замиканню або погіршенню контакту передують збої у роботі електрообладнання, тому такі несправності не можна ігнорувати. Рідше трапляються випадки виходу з ладу електроприладів, у яких виникає внутрішнє замикання, особливо якщо вони не захищені запобіжниками. Найчастіше це стосується стартера, реле його приводу або вимикача маси. У таких ситуаціях дроти перегріваються, ізоляція плавиться та може зайнятися. Основними причинами подібних відмов є зношення механізмів і фізичне старіння матеріалів.

Аварії, спричинені виходом з ладу діодів випрямного блоку генератора через електричний або тепловий пробій, зазвичай є найсерйознішими, оскільки супроводжуються протіканням аварійних струмів великої сили в електричному колі, де виникла несправність. Варто зазначити, що пробій діода може призвести як до його перетворення з напівпровідникового елемента на звичайний провідник, так і до розриву електричного кола, в якому він встановлений. На Рисунку 4 представлений діодний блок генератора досліджуваного автомобіля з наслідками пожежі.

На Рисунках 5 і 6 представлено процес вимірювання провідності діода генератора вивід якого від'єднаний від його корпусу.



Рисунок 4. Діодний блок (випрямлювач), що був встановлений у генераторі змінного струму автомобіля, який досліджується

Джерело: фото авторів

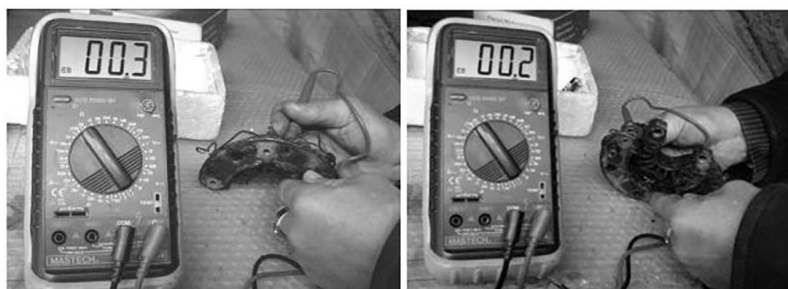


Рисунок 5, 6. Процес вимірювання провідності діоду, вивід якого від'єднаний від його корпусу

Джерело: фото авторів

Слід відзначити, що зазначені електроприлади можуть спричиняти підвищення температури у разі виникнення аварійного режиму при протіканні через них електричного струму. Тому під час цих досліджень

був детально проаналізований ступінь пошкоджень діодного блоку, реле напруги та частково розібраного генератора, який був встановлений на досліджуваному автомобілі (Рис. 7).

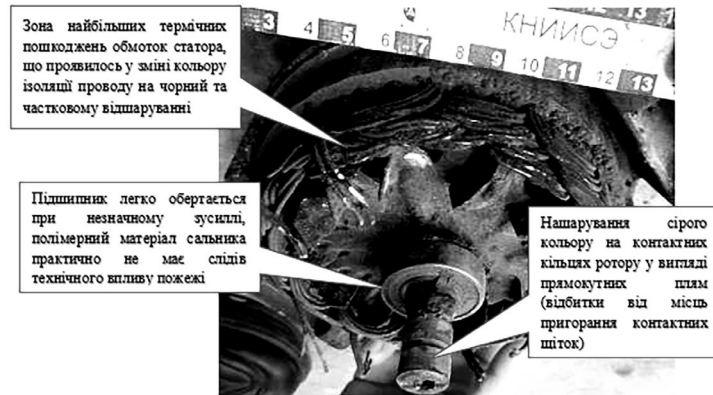


Рисунок 7. Генератор змінного струму, що був встановлений на досліджуваному автомобілі (задня кришка знята)

Джерело: фото авторів

На діодному блоці (випрямлячі), що був встановлений у генераторі досліджуваного автомобіля, контактні пластини виводів діодів не мають нашарувань кіптяви, яка присутня на вивідних дротах. Це свідчить про значний рівень їх нагріву на момент пожежі, оскільки кіптява не залишилась на цих пластинах. На одному з діодів зазначена пластина відокремилась від корпусу. За допомогою мультиметра була виміряна електропровідність усіх діодів, і виявилось, що цей діод з напівпровідника перетворився на провідник електричного струму (відбувся його пробій), а інші діоди не мали електропровідності (перегоріли). Це свідчить про протікання струму високої сили через ці діоди, що стало можливим через їх пробій до виникнення пожежі в автомобілі.

На частині проводів обмоток статора генератора змінного струму, встановленого на досліджуваному автомобілі, виявлено зону найбільших термічних пошкоджень. Це проявилось у зміні кольору ізоляції проводу на чорний та частковому її відшаруванні. На контактних кільцях ротору генератора спостерігаються нашарування сірого кольору у вигляді прямокутних плям, що є відбитками від пригорянь контактних щіток. Це свідчить про протікання електричного струму через обмотку індуктора ротора генератора, коли ротор не обертався. Водночас задній підшипник ротора обертається легко при незначному зусиллі, а полімерний матеріал зовнішнього сальника цього підшипника майже не має слідів термічного впливу від пожежі (Рис. 7), що вказує на невеликий рівень термічного впливу на нього. Отже, описані термічні пошкодження зазначених частин генератора досліджуваного автомобіля стали наслідком протікання надмірного електричного струму через ці ділянки, а не через вплив пожежних факторів на сам генератор.

Висновки

Отже, під час роботи двигуна, через поганий контакт між клемою силового плюсового проводу, що йде від плюсового виводу генератора, та місцем його з'єднання з розподільчою рейкою плюсових проводів, через незатягнуту гайку у цьому з'єднанні, відбулося підвищення напруги на обмотках статора генератора. Це сталося через те, що регулятор напруги в бортовій мережі автомобіля, через великий перехідний опір у цьому з'єднанні, не отримував необхідних значень напруги, які згідно з конструкцією електричного обладнання повинні були обмежуватись.

Згідно з результатами проведеного дослідження, було встановлено, що причиною пожежі в досліджуваному автомобілі стала теплова дія електричного струму в місці виникнення пожежі, що призвело до займання ізоляції проводу, по якому, згідно з конструкцією, під час роботи двигуна внутрішнього згорання, мав подаватись струм від автомобільного генератора до бортової електричної мережі. Причиною нагріву місця з'єднання проводу з розподільчою рейкою стало неналежне встановлення контакту між клемою проводу та точкою його приєднання до рейки через незатягнуту гайку в цьому з'єднанні. Процес подачі струму, який спричинив аварійну ситуацію, відбувався від акумуляторної батареї до однієї з фазних обмоток генератора (у зворотному напрямку) при вимкненому двигуні автомобіля, в результаті пробою силового діода (діодів) випрямляючого блоку, що був встановлений в цьому генераторі, а також через вихід з ладу електронних компонентів реле регулятора напруги. Пробій діода стався через підвищення напруги на обмотках статора генератора при працюючому двигуні, яке було викликане поганим електричним контактом у з'єднанні силового проводу з розподільчою рейкою.

Це призвело до того, що не відбулося своєчасне обмеження зарядного струму шляхом зменшення напруги на обмотці збудження генератора (індукторі), оскільки регулятор напруги у бортовій мережі автомобіля не отримував необхідних значень напруги через великий перехідний опір у цьому з'єднанні струмоведучих елементів, що за конструктивним рішенням автомобіля мало обмежуватися.

З огляду на зазначене, можна зробити обґрунтований висновок, що різноманіття сучасних транспортних засобів іноземного виробництва та постійне

вдосконалення їх електротехнічної конструкції вимагають удосконалення та розвитку інформаційної бази, а також створення доступних довідників, що містять інформацію щодо експлуатації, методик проведення експертиз та досліджень електрообладнання сучасних транспортних засобів. Адже тільки за умови встановлення судовими експертами фактів наявності аварійних та наднормативних режимів у роботі цих засобів, органи суду та досудового слідства отримують можливість ухвалювати обґрунтовані рішення, що стосуються встановлення дійсних обставин події.

Список використаної літератури

- [1] Gavrilyuk, A.F. (2018). *Fire hazard of wheeled vehicles*. Lviv: LDU BZHD.
- [2] Bazhynov, O.V., & Kravtsov, M.M. (2022). *Danger of vehicles*. Kharkiv: IE L.A. Starichenko.
- [3] Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2023. (2024). Retrieved from <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/5/7/2/12.pdf>.
- [4] Gavrilyuk, A.F., & Lyn, A.F. (2017). *Fire protection of wheeled vehicles and ways to improve it*. *Fire Safety: Scientific Collection*, 31, 11-16.
- [5] Makovicka, L., & Svetlik, J. (2007). Fire of personal motor vehicle. *Badania i Rozwoj*, 3, 117-121.
- [6] Lazarenko, O., Loik, V., Shtain, B., & Riegert, D. (2018). Research on the fire hazards of cells in electric car batteries. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, 52(44), 58-67. doi: 10.12845/bitp.52.4.2018.7.
- [7] Bykov I.M., & Lazarenko O.V. (2019). Fire fighting and other emergency work in electric cars. *Fire Safety*, 34, 54-58. doi: 10.32447/20786662.34.2019.09.
- [8] Ferrone, C., & Sinkovits, C. (2006). Fire and explosion investigations: Why heavy trucks may burn. In *ASME 2006 International mechanical engineering congress and exposition* (pp. 49-58). Chicago: American Society of Mechanical Engineers. doi: 10.1115/IMECE2006-13305.
- [9] Pyndus, Y.I., & Zaverukha, R.R. (2016). *Electrical and electronic equipment of cars*. Ternopil: TNTU.

Oleksandr Shmereggo

Head of the Sector

State research and forensic center of the ministry of internal affairs of Ukraine

01601, 10 Bogomolets Str., Kyiv, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0006-2870-700X>

Serhiy Chuiko

Doctor of Philosophy, Associate Professor

State University "Zhytomyr Polytechnic"

10005, 103 Chudnivska Str., Zhytomyr, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-7052-5158>

Serhii Tsymbal

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

Vinnitsia National Technical University

21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnitsia, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0003-3066-4169>

Particularities of conducting emergency processes in electrical transportation facilities at the electric stake dalliance: Generator – battery

Abstract. The article presents the results and identified problems in the context of conducting comprehensive expert investigations into emergency conditions and the operation of electrical equipment of transport vehicles in the electric stake area: generator – rechargeable battery. Electrical devices are a significant part of the causes of fires in transport vehicles. All electrical devices in the car are connected to the main power supply, battery and generator, through additional wiring. the structure of electrical wiring consists of a conductor, which transmits electrical signals, and an insulator, which releases the conductor. Basically, the shape and structure of the conductor, as well as the thickness of the insulator, are divided differently depending on the difference in the permissible flow. It is therefore not safe to adjust the connector that connects a number of electrical devices to one device, or it is inadvisable to connect external wiring to connect several electrical devices. If the re-engineering is blocked, which exceeds the permissible flow at the lance, there may be a short-circuit in the electrical wiring and damage to the insulation due to overheating, which can lead to a direct risk of seizing the car. It is common knowledge that among the most common causes of fires are wiring faults, which most often lead to a short circuit. If the insulation is damaged for these and other reasons, the exposed parts of the wires have the potential to come into contact with each other or with the "mass" of the car. the darts, as a result of the flow of a short flow through them, which is too great for passing through this crossbar, begin to heat up. Due to the high temperature, the insulation melts and ignites, along with adjacent parts made of plastic and other flammable materials. Based on the results of the investigation, it was established that the cause of the fire in the monitored car was the manifestation of the thermal effect of an electric shock in the installed core, which called for the insulation of the wire along which we will make constructive decisions during the operation of the internal combustion engine installed on the vehicle, so that a stream is supplied from the vehicle generator to the on-board electrical system. The diversity of current transport means of foreign production and the constant development of their electrical design necessitates the need for thorough development of the information base. creation of available operating evidence, methods of conducting examinations and expert investigations of electrical equipment

Keywords: fire safety; transport equipment; generator; fire; ship examination

Сергій Цимбал*

Кандидат технічних наук, доцент

Вінницький національний технічний університет

21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-3066-4169>

Віктор Глиняний

Аспірант

Вінницький національний технічний університет

21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

<https://orcid.org/0009-0006-4209-8378>

Аналіз сучасного стану перевезень пасажирів на приміських маршрутах

Анотація. Приміські пасажирські перевезення є невід'ємною частиною транспортної системи, що забезпечує мобільність населення та сприяє економічному розвитку регіонів. У статті проведено аналіз сучасного стану перевезень пасажирів автомобільним транспортом на приміських маршрутах, виявлено основні проблеми та визначено шляхи їх вирішення. Досліджено ключові фактори, що впливають на якість транспортного обслуговування, зокрема порушення розкладу руху, переповненість транспорту у години пік, нерегулярність рейсів та низький рівень інтеграції з міськими маршрутами. Особливу увагу приділено технічному стану рухомого складу, проблемам інфраструктури та безпеки перевезень. Встановлено, що велика частина автобусного парку є застарілою, що спричиняє значні екологічні, технічні та експлуатаційні труднощі. Розглянуто питання тарифної політики та необхідність запровадження єдиної системи електронного квитка, що сприятиме зручності пересадок і підвищенню ефективності транспортної системи. Виявлено фактори, які ускладнюють інтеграцію приміського та міського транспорту, такі як різні тарифні системи та відсутність узгоджених графіків руху. У статті запропоновано комплекс заходів щодо удосконалення приміських пасажирських перевезень, зокрема оновлення рухомого складу відповідно до сучасних екологічних стандартів, оптимізацію маршрутної мережі, модернізацію інфраструктури та впровадження сучасних технологій управління транспортом. Визначено важливість посилення контролю за безпекою перевезень і боротьби з нелегальними перевізниками. Наголошено на необхідності комплексного підходу до реформування приміських перевезень шляхом державного регулювання, підвищення інвестиційної привабливості транспортної галузі та використання новітніх цифрових технологій. Реалізація цих заходів сприятиме підвищенню рівня комфорту, безпеки та ефективності пасажирських перевезень, що в перспективі забезпечить стійкий розвиток транспортної системи країни.

Ключові слова: приміські пасажирські перевезення; автомобільний транспорт; маршрутна мережа; рухомий склад; інфраструктура; електронний квиток; безпека перевезень; оптимізація маршрутів

Вступ

Перевезення пасажирів автомобільним транспортом на приміських маршрутах є важливим елементом транспортної системи будь-якої країни. Ефективне функціонування цієї системи забезпечує мобільність

населення, доступність робочих місць, закладів освіти, медичних установ та інших соціально значущих об'єктів. Однак у сучасних умовах спостерігається низка проблем, пов'язаних із якістю обслуговування,

Suggested Citation:

Tsymbal, S., & Glynianyi, V. (2024). Analysis of the current state of passenger transportation on suburban routes. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 10(2), 177-181. doi: 10.63341/vjmet/2.2024.177.

*Corresponding author



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

недостатньою розвиненістю маршрутною мережі, застарілим рухомим складом та незадовільним рівнем безпеки перевезень. Метою цієї статті є аналіз основних проблем функціонування приміських пасажирських перевезень автомобільним транспортом та визначення напрямків їх удосконалення.

Результати

Приміські перевезення є проміжною ланкою між міськими та міжміськими транспортними перевезеннями. Приміські пасажирські перевезення відіграють важливу роль у забезпеченні мобільності населення, особливо для людей, які мешкають у передмістях, але працюють або навчаються в містах. Вони з'єднують великі міські агломерації з навколишніми населеними пунктами, сприяючи економічному та соціальному розвитку регіонів. Однак сучасний стан приміських перевезень характеризується низкою проблем, які значно впливають на якість транспортного обслуговування, безпеку та комфорт пасажирів. Багато з цих проблем накопичувалися протягом тривалого часу через недостатнє фінансування, застарілу інфраструктуру, відсутність координації між перевізниками та регулюючими органами [5, 6]. У цій статті розглянуто основні проблеми приміських перевезень, їхні причини, наслідки для населення та можливі шляхи вирішення.

1. Низька якість транспортного обслуговування. Однією з ключових проблем приміських перевезень є низька якість надання транспортних послуг. Вона проявляється у таких аспектах [6]:

- ◆ Часті порушення розкладу руху. Через технічний стан транспортних засобів, низький рівень контролю з боку перевізників і дорожні затори автобуси та маршрутні таксі часто не дотримуються графіка руху. Це створює незручності для пасажирів, особливо в години пік.
- ◆ Переповненість транспорту. У ранкові та вечірні години пік пасажиропотік значно зростає, що призводить до переповнення автобусів і маршрутних таксі. Це негативно позначається на комфорті та безпеці поїздки.
- ◆ Нерегулярність рейсів. У вечірній час та у вихідні дні кількість рейсів значно скорочується, що створює проблеми для тих, хто працює у нестандартний графік або потребує транспорту у вечірній час.

2. Застарілий рухомий склад [5]. Велика частина автобусів, що використовуються для приміських перевезень, знаходиться в експлуатації понад встановлені терміни. Це спричиняє такі проблеми:

- ◆ Низький рівень комфорту. Відсутність сучасної кліматичної системи, незручні сидіння, погане освітлення салону та інші фактори знижують рівень задоволеності пасажирів.
- ◆ Підвищений рівень аварійності. Застарілі транспортні засоби мають більший ризик технічних несправностей, що може призвести до аварійних ситуацій.
- ◆ Негативний вплив на екологію. Багато автобусів працюють на дизельному паливі, що призводить до значних викидів шкідливих речовин у повітря.

3. Недостатня інтеграція з міським транспортом [1, 3]. Для ефективного функціонування транспортної системи важливо забезпечити безперервну інтеграцію між приміськими та міськими маршрутами. Однак на практиці існує низка труднощів:

- ◆ Відсутність узгоджених розкладів. Приміські автобуси часто не враховують графіки міського транспорту, що ускладнює пересадки.
- ◆ Різні тарифні системи. Пасажири змушені купувати окремі квитки на різні види транспорту, що підвищує витрати та ускладнює користування послугами.
- ◆ Недостатня кількість пересадкових вузлів. У багатьох містах відсутні спеціально облаштовані пересадкові термінали, що змушує пасажирів долати великі відстані між зупинками.

4. Відсутність належної інфраструктури [3, 4]. Стан транспортної інфраструктури напряму впливає на якість приміських перевезень. Основні проблеми:

- ◆ Поганий стан доріг. Через низьку якість дорожнього покриття зростає зношення транспортних засобів та збільшується час у дорозі.
- ◆ Незручні зупинки. Багато автобусних зупинок не мають накриття, освітлення та інформаційних табло, що ускладнює очікування транспорту.
- ◆ Застарілі автостанції. Багато приміських вокзалів не відповідають сучасним стандартам комфорту та безпеки.

Модернізація інфраструктури потребує значних інвестицій, але вона є ключовою для підвищення якості перевезень.

5. Низький рівень безпеки [6]. Безпека пасажирів повинна бути головним пріоритетом транспортної системи, однак існують серйозні проблеми:

- ◆ Порушення водіями правил дорожнього руху. Часті перевищення швидкості, ігнорування правил обгону та недотримання дистанції створюють ризики аварій.
- ◆ Перевантаження транспортних засобів. Велика кількість пасажирів у години пік перевищує нормативні показники безпеки.
- ◆ Недостатній контроль за технічним станом транспорту. Відсутність регулярних перевірок сприяє експлуатації несправних транспортних засобів.

6. Висока частка нелегальних перевізників. В Україні поширена проблема нелегальних маршрутних таксі, які працюють без відповідних ліцензій. Основні ризики:

- ◆ Відсутність контролю за технічним станом таких транспортних засобів.
- ◆ Порушення прав пасажирів (відсутність страхування, необґрунтовані підвищення тарифів).
- ◆ Зниження податкових надходжень до бюджету.

Причини зазначених проблем є багатогранними та взаємопов'язаними. Серед основних можна виділити [4-6]:

- ◆ Недостатнє фінансування. Обмеженість бюджетних коштів, що виділяються на розвиток та підтримку приміських перевезень, призводить до зношеності

рухомого складу та інфраструктури. Відсутність інвестицій у модернізацію транспорту та інфраструктури знижує якість надання послуг та безпеку перевезень.

◆ Неефективне управління. Відсутність чіткої стратегії розвитку приміських перевезень, слабка координація між різними рівнями влади та перевізниками, а також недостатній контроль за виконанням нормативних актів призводять до хаотичного розвитку ринку та погіршення якості послуг.

◆ Застаріла нормативно-правова база. Багато нормативних актів, що регулюють сферу приміських перевезень, не відповідають сучасним реаліям та потребують

оновлення. Це створює правові колізії та ускладнює діяльність перевізників.

◆ Соціально-економічні фактори. Зростання урбанізації, зміни в структурі зайнятості населення та інші соціально-економічні процеси впливають на попит на приміські перевезення та створюють нові виклики для транспортної системи.

Для підвищення ефективності приміських пасажирських перевезень необхідно здійснити комплекс заходів, спрямованих на модернізацію транспортної системи, покращення якості обслуговування та підвищення рівня безпеки (Рис. 1).



Рисунок 1. Варіанти вдосконалення системи перевезень пасажирів на приміських маршрутах

Джерело: складено авторами

1. Оновлення рухомого складу. Сучасні автобуси повинні відповідати екологічним стандартам (Євро-5 та Євро-6), мати зручні сидіння, систему клімат-контролю, інформаційні табло та забезпечувати безпеку пасажирів. Для цього необхідно стимулювати перевізників до оновлення автопарку шляхом надання пільгових кредитів та лізингових програм.

2. Впровадження системи єдиного електронного квитка. Єдиний електронний квиток дозволить пасажирам зручно пересідати з одного виду транспорту на інший, не витрачаючи час на купівлю окремих квитків. Це сприятиме інтеграції приміських перевезень з міськими маршрутами та поліпшенню загальної логістики.

3. Оптимізація маршрутної мережі. Слід переглянути існуючі маршрути, враховуючи реальні потреби пасажирів, зміну густоти населення та транспортні потоки. Важливо запровадити додаткові маршрути у години пік та забезпечити кращу зв'язність між різними населеними пунктами.

4. Використання сучасних технологій для управління перевезеннями. Важливим кроком є впровадження GPS-моніторингу руху транспорту, що дозволить контролювати виконання розкладів, уникати затримок та збоїв у роботі маршрутів. Також слід розвивати мобільні додатки для пасажирів, які інформуватимуть про час прибуття автобусів, завантаженість маршрутів та можливі альтернативні варіанти пересування.

5. Підвищення рівня безпеки перевезень. Необхідно запровадити жорсткіший контроль за технічним

станом транспортних засобів та професійним рівнем водіїв. Важливим заходом є регулярне проходження водіями курсів з безпечного керування транспортними засобами та культури обслуговування пасажирів.

6. Покращення інфраструктури. Розвиток автобусних зупинок, облаштування комфортних автостанцій, створення безпечних пішохідних переходів та зручних місць для очікування сприятиме підвищенню якості перевезень.

7. Легалізація та контроль за перевізниками. Для боротьби з нелегальними перевезеннями необхідно посилити контроль з боку державних органів, запровадити систему штрафів та стимулювати перевізників до роботи в легальному секторі через прозорі умови конкуренції.

Висновки

Удосконалення системи перевезення пасажирів автомобільним транспортом на приміських маршрутах є ключовим завданням для підвищення рівня мобільності населення та поліпшення якості транспортних послуг. Запропоновані заходи, такі як оновлення рухомого складу, впровадження електронного квитка, оптимізація маршрутної мережі та підвищення безпеки перевезень, сприятимуть розвитку сучасної, зручної та ефективної системи громадського транспорту. Для успішної реалізації цих заходів необхідна співпраця державних органів, транспортних компаній та громадськості. Лише комплексний підхід дозволить створити комфортні умови для пасажирів та забезпечити стабільний розвиток транспортної системи.

Список використаної літератури

- [1] Bilichenko, V.V., Tsymbal, S.V., & Korobov, S.S. (2018). System approach to improving the production system of urban passenger transportation. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, 1(10), 17-21.
- [2] Bilichenko, V.V., Tsymbal, S.V., & Romanyuk, S.O. (2015). Heuristic approach to forming a route network of urban passenger transportation. In *Bus construction and passenger transportation in Ukraine: Abstracts of reports of the All-Ukrainian scientific and practical conference* (pp. 59-61). Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House.
- [3] Dolia, V.K. (2011). *Passenger transportation*. Kharkiv: Publishing house "Fort".
- [4] Kopyak, N.V. (2009). Main directions of development of suburban passenger transportation. *Bulletin of NTU*, 19.
- [5] Krystopchuk, M.E. (2009). Efficiency of the passenger transport system of suburban communication. (Doctoral dissertation, Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov, Kharkiv, Ukraine).
- [6] Krystopchuk, M.E., & Lobashov, O.O. (2012). *Suburban passenger transportation*. Kharkiv: NTMT.
- [7] Marunych, V.S., & Shmorgun, L.G. (2017). Organization and management of passenger transportation. Kyiv: Millennium.
- [8] Myronenko, V.K., Gaba, V.V., Matsyuk, V.I., Hrushevska, T.M., & Kostyushko, V.P. (2014). Field studies and mathematical models of suburban passenger transportation. *Science-Intensive Technologies*, 24(4), 496-502. doi. 10.18372/2310-5461.24.7523.
- [9] Tsymbal, S.V., & Bilyk, M.S. (2016). Foreign experience in organizing urban passenger transportation. In *XLV Scientific and technical conference of the faculty of mechanical engineering and transport*. Vinnytsia: VNTU.

Serhii Tsymbal

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3066-4169>

Viktor Glynianyi

Postgraduate Student
Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0006-4209-8378>

Analysis of the current state of passenger transportation on suburban routes

Abstract. Suburban passenger transportation is an integral part of the transport system, ensuring population mobility and contributing to the economic development of regions. The article analyses the current state of passenger transportation by road on suburban routes, identifies the main problems and determines ways to solve them. The key factors affecting the quality of transport service are studied, in particular, disruption of the traffic schedule, overcrowding during peak hours, irregularity of flights and a low level of integration with urban routes. Particular attention is paid to the technical condition of rolling stock, infrastructure problems and transport safety. It was found that a large part of the bus fleet is outdated, which causes significant environmental, technical and operational difficulties. The issue of tariff policy and the need to introduce a single electronic ticket system are considered, which will facilitate the convenience of transfers and increase the efficiency of the transport system. Factors that complicate the integration of suburban and urban transport, such as different tariff systems and the lack of coordinated traffic schedules, are identified. The article proposes a set of measures to improve suburban passenger transportation, in particular, updating rolling stock in accordance with modern environmental standards, optimising the route network, modernising the infrastructure and introducing modern transport management technologies. The importance of strengthening control over transportation safety and combating illegal carriers is determined. The need for a comprehensive approach to reforming suburban transportation through state regulation, increasing the investment attractiveness of the transport industry and using the latest digital technologies is emphasised. The implementation of these measures will contribute to increasing the level of comfort, safety and efficiency of passenger transportation, which in the future will ensure the sustainable development of the country's transport system

Keywords: suburban passenger transportation; road transport; route network; rolling stock; infrastructure; electronic ticket; transportation safety; route optimisation

ВІСНИК МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТУ

Науковий журнал

Том 10, № 2, 2024

Заснований у 2015 р. Виходить 2 рази на рік

Оригінал-макет видання виготовлено
у Вінницького національного технічного університету

Редагування англomовних текстів:

С. Воровський, К. Касьянов

Комп'ютерна верстка:

М. Блімар

Підписано до друку 26 грудня 2024 р.
Формат 29,7х42 ½. Умов. друк. арк. 21,3
Наклад 50 прим.
Зам. №2025-016

Адреса редакції:

Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
Email: info@met-journal.com.ua
<https://met-journal.com.ua/uk>

Адреса видавництва:

Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
Email: rvv@vntu.edu.ua
<https://press.vntu.edu.ua>

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT

Scientific Journal

Volume 10, No. 2, 2024

Founded in 2015. Published 2 times per year

The original layout of the publication is made in
Vinnytsia State Technological University

Editing English-language texts:

S. Vorovsky, K. Kasianov

Desktop publishing:

M. Blimar

Signed for print of December 26, 2024. Format 9,7x42 ½
Conventional printed pages 21,3
Circulation 50 copies
Ord. №2025-016

Editors office address:

Vinnytsia National Technical University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
Email: info@met-journal.com.ua
<https://met-journal.com.ua/en>

Publishing Address:

Vinnytsia State Technological University
21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine
Email: rvv@vntu.edu.ua
<https://press.vntu.edu.ua>